

DOI.org/10.5281/zenodo.399005

УДК 621.791

К.А. Молоков, А.В. Сахарова, М.В. Михалев

МОЛОКОВ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., доцент,  
e-mail: spektrum011277@gmail.com

САХАРОВА АНЖЕЛИКА ВАДИМОВНА – студент, e-mail: lika.sakharova.96@mail.ru

МИХАЛЕВ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ – студент, e-mail: mixaljov\_mv@students.dvfu.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

*Дальневосточный федеральный университет*

Суханова ул., 8, Владивосток, 690950

## Оценка пределов выносливости сварных соединений по критерию распространяющихся трещин

**Аннотация:** Отличительная черта сварного шва и зоны термического влияния – значительная неоднородность механических характеристик, диаметра зерна, а также присутствие различных концентраторов напряжений, провоцирующих появление усталостных трещин. Известно, что основным фактором, влияющим на вероятность появления и скорость развития макротрещин, является уровень напряженного состояния, а также структурная и механическая неоднородность металла сварных соединений. Уровень напряженного состояния, в свою очередь, во многом зависит от остаточных сварочных напряжений и локальных физических концентраторов напряжений.

В данной работе предлагаются авторские модель и подход к оценке эффективных коэффициентов концентрации напряжений для сварных соединений с дефектами в виде подрезов, пор и других концентраторов напряжений с позиции распространяющихся трещин под действием стационарной переменной нагрузки. Предложенная модель основана на решении Кирша для круглого отверстия в условиях плосконапряженного состояния под действием одноосной нагрузки. Результаты модели экспериментально проверены на углеродистых сталях и сталях феррито-перлитного класса. Получены значения пределов выносливости по критерию распространяющихся трещин в зависимости от размера дефекта. Вычислены размеры трещин (зародившихся в области действия концентрации напряжений и не развивающихся) в зависимости от диаметра кругового отверстия в пластине. В отличие от упомянутой модели в монографии Г.М. Хажинского, предложенная методика дает асимптотическое приближение предела выносливости к значению  $\sigma_{-1}/3$  с возрастанием макроконцентратора напряжений в виде отверстия. Модель построена для бесконечной пластины и не учитывает изменение поля напряжений от действия ограниченности размеров.

Предложенная модель не рассматривает коррекцию решения Кирша как необходимость при изменении поля напряжений от появления зарождающейся трещины в области максимальной концентрации напряжений. Модель базируется на рассмотрении примыкающей области с повышенными напряжениями к кромке отверстия как к области, наиболее интенсивно набирающей повреждения возле концентратора напряжений под действием циклических нагрузок.

**Ключевые слова:** сварное соединение, предел выносливости, дефект, концентратор напряжения, страгиваемая макротрещина, усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений.

### Постановка задачи

Несмотря на то что уровень сварочного производства позволяет получать качественные сварные соединения, на практике не всегда удастся обеспечить отсутствие технологических дефектов сварки, особенно в металлоемких крупногабаритных конструкциях. Велика вероятность пропустить дефект, недопустимый по своим геометрическим характеристикам или свойствам.

Величину переменных напряжений симметричного цикла внешней нагрузки на элемент конструкции можно представить как предел выносливости элемента с концентрацией напряжений и без нее. Предел выносливости элемента конструкции без концентрации равноценен пределу выносливости материала  $\sigma_{fr}$ . Для элемента конструкции с концентратором напряжений величина внешней нагрузки может либо привести, либо не привести к развитию трещины до критических значений. Таким образом, мы имеем величину нагрузки, которая провоцирует появление трещины в концентраторе, но её недостаточно для продолжения движения трещины до критических размеров. Так, величина переменной нагрузки, которой ещё недостаточно для развития трещины до критических размеров, может считаться пределом выносливости элемента конструкции с концентратором напряжений, или «пороговым» пределом выносливости, по критерию распространяемых трещин. Этот «пороговый» предел выносливости будет зависеть от формы и размера концентратора. Построив модель, с помощью которой можно рассчитать «пороговые» пределы выносливости для концентраторов различной формы и размеров, можно рассчитать эффективные коэффициенты концентрации напряжений, если известен предел выносливости материала.

Предел выносливости материала феррито-перлитного класса можно вычислять с учетом структурно-механических характеристик [3]. В работах [1, 3, 5] предлагается на базе полуэмпирических моделей и структурно-механического подхода определять предел выносливости. Авторы [5, 4] исследовали величину дефекта концентратора напряжений, размер которого уже не влияет на предел выносливости. В этих работах ими определена зависимость, положенная в основу инженерного подхода к оценке выносливости конструкций по данным испытаний гладких и надрезанных образцов на воздухе. Она позволяет вычислять радиус фронта начальной распространяемой полукруговой трещины, базируясь только на известном пределе выносливости симметричного цикла.

### Разработка математической модели

Построение математической модели для описания распространяемых трещин от концентраторов напряжения в виде круговых вырезов или отверстий позволит перенести результаты исследования (с учетом коррекции) на различные сварные соединения. По мере уменьшения внешней нагрузки, стремящейся к  $\sigma_{-1}/3$  для концентратора с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений равным 3, логично положить, что даже для физически больших концентраторов напряжения появление трещины не будет спровоцировано этим концентратором. Таким образом, для рассматриваемого концентратора с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений равным  $\alpha_T$  трещины не будут распространяться при напряжениях  $< \sigma_{-1}/\alpha_T$ . Это известный предельный случай для любых макроконцентраторов напряжений.

В модели [5] результаты эффективных коэффициентов концентрации напряжений хорошо согласуются с экспериментальными данными для области геометрически малых концентраторов напряжений, здесь зависимость представлена в следующем виде [5]:

$$\sigma_{th-1k} = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt[4]{1 + \frac{F_d}{\sqrt{F_0}}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{th-1k}$  – пороговое напряжение или предел выносливости по внешней нагрузке, при котором трещина является распространяемой за зону области действия концентратора, МПа;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости неповрежденного материала при отсутствии концентрации напряжений, МПа;  $\sigma_{-1}/\sigma_{th-1k}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений. Остальные аргументы, входящие в (1), зависели от формы концентратора, которая представляла собой глухое отверстие диа-

метром  $d$  от 40 до 500 мкм и глубиной  $h$  с учетом глубины выхода сверла [6]. Площадь сечения данного дефекта с учетом выхода сверла подсчитывалась по формуле

$$F_d = d \cdot h - \frac{d^2}{4\sqrt{3}}, \quad (2)$$

а расчетная площадь трещины, образовавшейся в области концентратора, вместе с площадью сечения искусственного дефекта, образованного сверлением, равна

$$F_0 = \frac{\pi}{2} a_0^2, \quad (3)$$

где  $a_0$  – радиус начальной полукруговой трещины, инициированной искусственным дефектом, м:

$$a_0 = 10^{-3} \left( \frac{81}{\sigma_{-1}} \right)^{2,3}. \quad (4)$$

Расчет по зависимостям (1)–(4) дает хорошее согласование с экспериментальными данными только для ограниченных размеров искусственных дефектов. В [5] указывается на ухудшение согласования с экспериментом уже при радиусах отверстий 1,5 мм и более. Модель (1) дает завышенные значения эффективного коэффициента концентрации напряжений.

Рассмотрим бесконечную пластину с концентратором напряжения в виде сквозного отверстия. Будем учитывать только окружные напряжения  $\sigma_\theta$ , образованные концентратором напряжений (рис. 1).

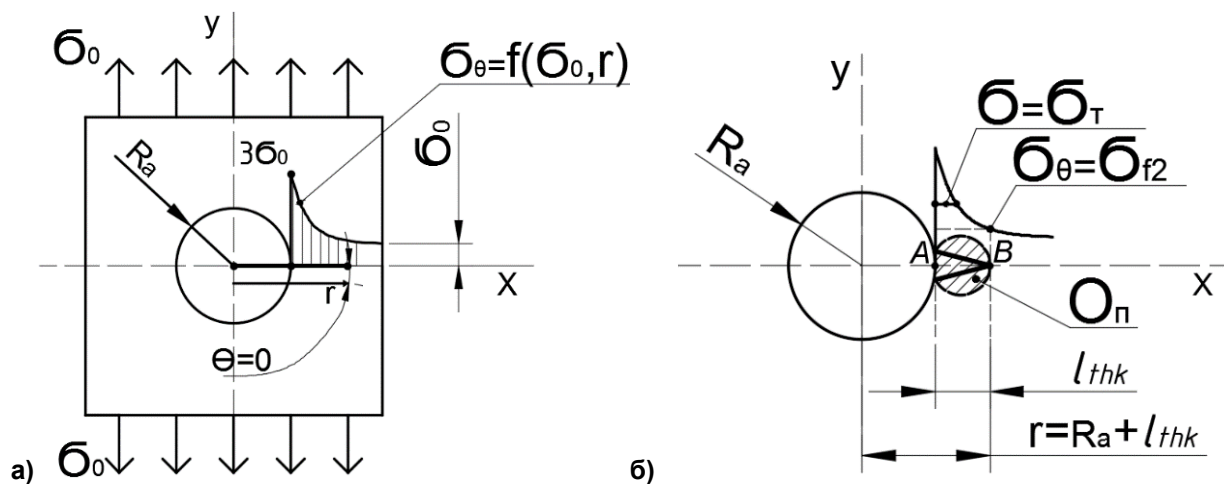


Рис. 1. К минимальному размеру трещины от макроконцентратора: а – окружные напряжения при одноосном растяжении пластины с круговым отверстием; б – схематизация области повреждения на кромке кругового отверстия.

Примем в первом приближении, что радиальные напряжения несущественны в инициировании трещины, перпендикулярной внешней нагрузке в прилегающей к отверстию пластической области. Тем не менее, если сравнивать области пластичности при плоской деформации, где учитываются все 3 компоненты напряжений и одноосное напряженное состояние, то размеры этой области вдоль оси  $X$  значительно разнятся как на уровне предела текучести  $\sigma_T$  (рис. 2,а), так и на уровне предела выносливости эпюр (рис. 2,б). На рис. 3 в изометрии показаны эпюры интенсивности напряжений при плоской деформации и одноосном напряженном состоянии совместно и области на уровне предела выносливости стали 50. Радиус кругового отверстия  $R_a = 0,001$  м.

В связи с данным фактом значительного расхождения эпюр  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_i$  введем поправку  $K_r$  для уточнения радиуса вектора. Перенесем данную поправку как поправку к радиусу отверстия  $R_a$ . Этот перенос справедлив, так как отношение любой точки рассматриваемой эпюры напряжений к радиусу этого отверстия – величина постоянная для конкретной внешней нагрузки и формы рассматриваемого концентратора.

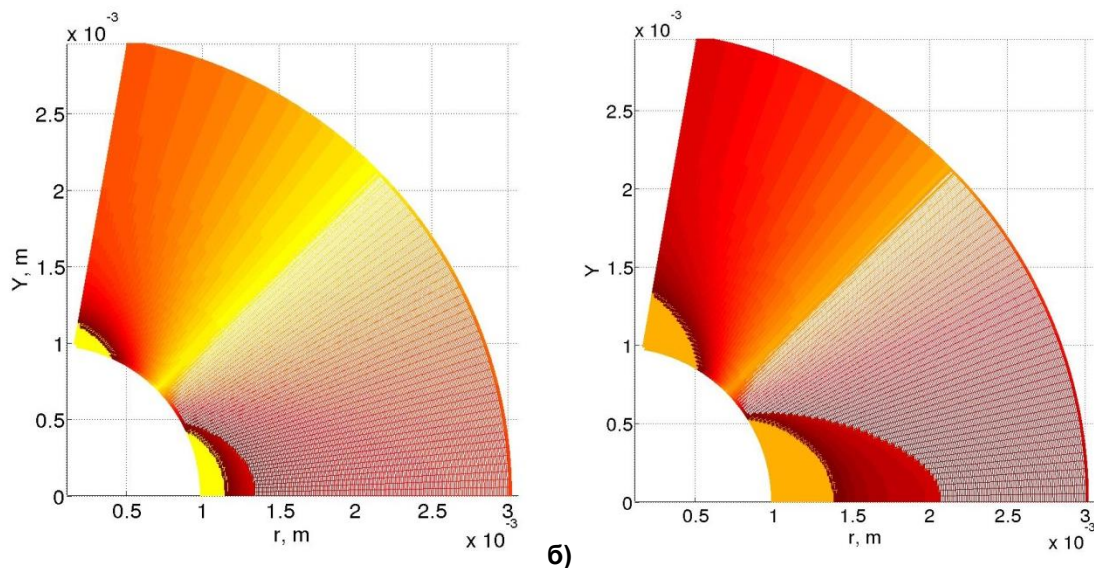


Рис. 2. Области в виде кругового отверстия в пластине, примыкающие к концентратору напряжений под действием  $\sigma_0 = 200$  МПа, на уровне напряжений: а)  $\sigma_T = 350$  МПа; б)  $\sigma_T = 240$  МПа.

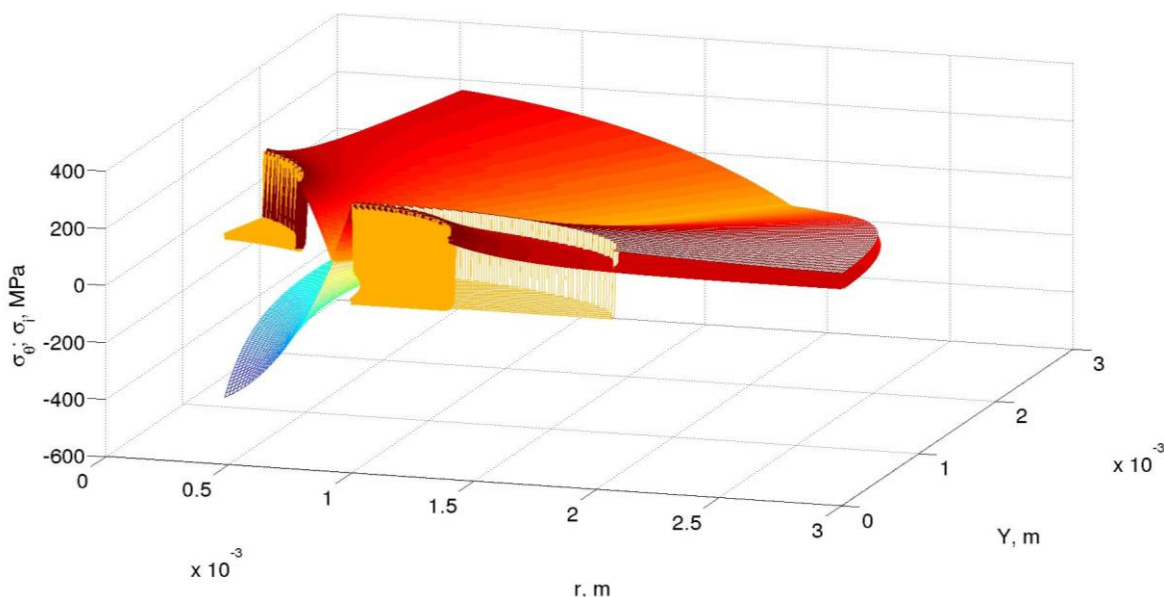


Рис. 3. Сравнение поверхностей интенсивности напряжений  $\sigma_i$  при плосконапряженном состоянии с поверхностью одноосных круговых напряжений  $\sigma_\theta$ :  $\sigma_0 = 200$  МПа,  $\sigma_T = 240$  МПа.

Эпюра окружных напряжений в направлении внешней нагрузки  $\sigma_0$  выражена через радиус отверстия  $R_a$  и радиус-вектор  $r$ , который представим как  $r = R_a + l_{thk}$ , тогда из решения Кирша в полярной системе координат имеем

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_0}{2} \left[ 2 + \left( \frac{R_a/K_r}{R_a/K_r + l_{thk}} \right)^2 + 3 \left( \frac{R_a/K_r}{R_a/K_r + l_{thk}} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где  $l_{thk}$  – длина страгиваемой трещины, образованной в области, набирающей поврежденность, которую провоцирует макроконцентратор, м. Все трещины больше  $l_{thk}$  будут распространяемыми при всех других равных условиях, поэтому назовем  $l_{thk}$  пороговым размером распространяемой трещины для элемента с концентратором напряжений. Положим, что трещина существует в области повреждения  $O_{II}$  (см. рис. 1,б), тогда критерием ее распространения будет условие

$$\sigma_\theta|_{l_{thk}} \geq \sigma_{fr}, \quad (6)$$

а под действием симметричной переменной внешней нагрузки напряжения в области действия концентратора будут изменяться близко к симметричному циклу [2], тогда:

$$\sigma_{\theta}|_{l_{thk}} \geq \sigma_{-1}. \quad (7)$$

Границу – как условие распространяемых трещин – в этом случае можно записать, подставив в решение (5) вместо  $\sigma_{\theta}$  предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , а вместо  $l_{thk}$  – его выражение через внешние напряжения  $\sigma_0$ . Тогда из условия страгивания трещины, линейной механики разрушения (ЛМР), для краевой трещины имеем

$$l_{thk} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{thr}}{1,12 \cdot \sigma_0} \right)^2, \quad (8)$$

где  $K_{thr}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при действующем цикле с асимметрией  $r_{oc}$ . В данном конкретном случае рассматриваем симметричный цикл, тогда  $K_{thr} = K_{th-1}$ . Если найти изменение поправки  $K_r$  в зависимости от радиуса-вектора  $r$  или  $R_a$  и решить (5) относительно  $\sigma_0$ , суть  $\sigma_0$  – предел выносливости, будем иметь значение предела выносливости для элемента конструкции с концентратором  $R_a$ . Это значение предела выносливости будет пороговым  $\sigma_{th-1k}$  и отражать критерий образовавшейся и распространяющейся трещины за область  $O_{п}$ .

Если в зависимости (1) положить

$$\frac{\sigma_{th-1k}}{\sigma_{-1}} = 0,8, \quad (9)$$

то величина радиуса образовавшейся полукруговой трещины будет подчиняться зависимости (4) при всех значениях радиуса отверстия  $R_a = d/2$  при равенстве  $d = h$  в (2). В этом случае поправку  $K_r$  на радиус отверстия можно вычислить как

$$K_r = \frac{a_0}{R_a}, \quad (10)$$

где  $a_0$  рассчитывается по (4) – это справедливо для сталей с временным пределом прочности от 350 до 1400 МПа;  $R_a$  – радиус отверстия, полученный при том же условии (9). Для определения  $R_a$  соответствующему условию (9) положим  $K_r = 1$ ,  $\sigma_{\theta} = 0,8\sigma_{-1}$ , представим  $R_a/K_r + l_{thk} = r$  и решим полученное уравнение (5) относительно  $r$ . Получаем

$$r = \sqrt{(R_a)^2 + (R_a)^2 \cdot \sqrt{7}}. \quad (11)$$

Теперь, с учетом (8), имеем

$$\frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{th-1}}{1,12 \cdot 0,8 \cdot \sigma_{-1}} \right)^2 = R_a \left( \sqrt{\sqrt{7} + 1} - 1 \right), \quad (12)$$

или

$$R_a = \frac{K_{th-1}^2}{\pi \cdot (1,12 \cdot 0,8 \cdot \sigma_{-1})^2 \cdot (\sqrt{\sqrt{7} + 1} - 1)}. \quad (13)$$

Подставляя (13) и (4) в (10), находим поправку на радиус отверстия:

$$K_r = \frac{10^{-3} \pi \cdot 81^{2,3} \cdot (\sqrt{\sqrt{7} + 1} - 1) \cdot (1,12 \cdot 0,8)^2}{(\sigma_{-1})^{0,3} \cdot K_{th-1}^2}. \quad (14)$$

После подстановки (7), (14) и (8) в (5) и решения его численно относительно  $\sigma_0$ , где суть  $\sigma_0$  – предел выносливости, пороговый  $\sigma_{th-1k}$ , или критерий распространяемых трещин после зарождения в макроконцентраторе:

$$\sigma'_0 \geq \sigma_{thrk}, \quad (15)$$

где  $\sigma'_0$  и  $\sigma_{thrk}$  – внешняя нагрузка с заданной асимметрией цикла и пороговый предел выносливости нераспространяющихся трещин при этой асимметрии соответственно.

Для расчета предела выносливости неповрежденного материала следует пользоваться зависимостью, учитывающей характеристики его структуры. Например, для околошовной зоны сварных соединений и зоны термического влияния (ЗТВ) характерна структурная неоднородность, предел выносливости которой  $\sigma_{-1}$  рассчитывается в соответствии с известной работой [3]:



$$\sigma_{-1} = 0,7\sigma_T \left[ \pi \cdot l_0 \cdot \left( \frac{0,7\sigma_T}{K_{th-1}} \right)^2 + 1 - \mu + \mu^2 \right]^{-0,5} \quad (16)$$

где  $l_0$  – максимальный размер микротрещины, не влияющий на предел выносливости;  $\sigma_T$  – предел текучести материала на уровне 0,2% по условной диаграмме растяжения;  $K_{th-1}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при асимметрии  $r_{oc} = -1$ .

### Материальная база

В массе и объеме сварных конструкций значительную долю занимают феррито-перлитные стали. В кораблестроении существует множество случаев, когда в конструкциях появляются макротрещины, но такие дефекты не имеют большого значения относительно работоспособности и надежности, так как являются нераспространяемыми трещинами. Известно, что в сварных соединениях из феррито-перлитных сталей дефекты шва и околошовной зоны могут находиться на поверхности или в толще феррито-перлитного материала. Кроме того, причиной торможения трещин могут быть ситуации, при которых трещина проходит зону повышенных напряжений и останавливается, когда недостаточно уровня напряжений для её продвижения.

Предложенная модель оценки надежности конструкций с концентраторами напряжений на предмет распространения трещин нами проверялась на различных феррито-перлитных материалах, 4 из которых приведены в таблице. Вместе с механическими характеристиками: пределом временной прочности  $\sigma_B$ , пределом текучести  $\sigma_T$ , относительным сужением  $\Psi$ , коэффициентом степенного упрочнения  $m$  и диаметром эффективного зерна  $d_3$  – в ней приведено значение предела выносливости  $\sigma_{-1}$ , вычисленное согласно (16).

### Характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\Psi$	$m$	$d_3$ , мкм	$\sigma_{-1}$ , МПа
Сталь 10	320	190	0,73	0,17	66	135,4
СтЗсп	450	270	0,71	0,16	37	192
22К	540	310	0,69	0,16	30	220
Сталь 50	680	350	0,62	0,16	25	247

### Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными

С использованием зависимости (5) нами были построены кривые – для сталей (см. таблицу), пороговых напряжений предела выносливости  $\sigma_{th-1k}$  симметричного цикла в зависимости от размера дефекта в виде кругового отверстия (рис. 4). Эти кривые ограничивают область сверху, когда напряжения внешней нагрузки  $\sigma'_0$  не приводят к распространению трещины, спровоцированной макроконцентратором. На этом же графике для сравнения приведены результаты экспериментальных данных, взятых из работ [5, 6]. Многие экспериментальные исследования посвящены появлению трещин около отверстий, диаметры которых незначительны и приближаются к микродефектам. Но экспериментальных данных для больших диаметров отверстий очень мало: такие испытания очень трудоемки. Поэтому вопросы теоретической оценки зарождения трещин, а также их остановки за область действия высоких напряжений от концентратора при известных характеристиках внешнего нагружения остаются актуальными. На графиках пороговые напряжения приводятся в нормированных значениях к пределу выносливости неповрежденного материала без концентраторов напряжения (рис. 4).

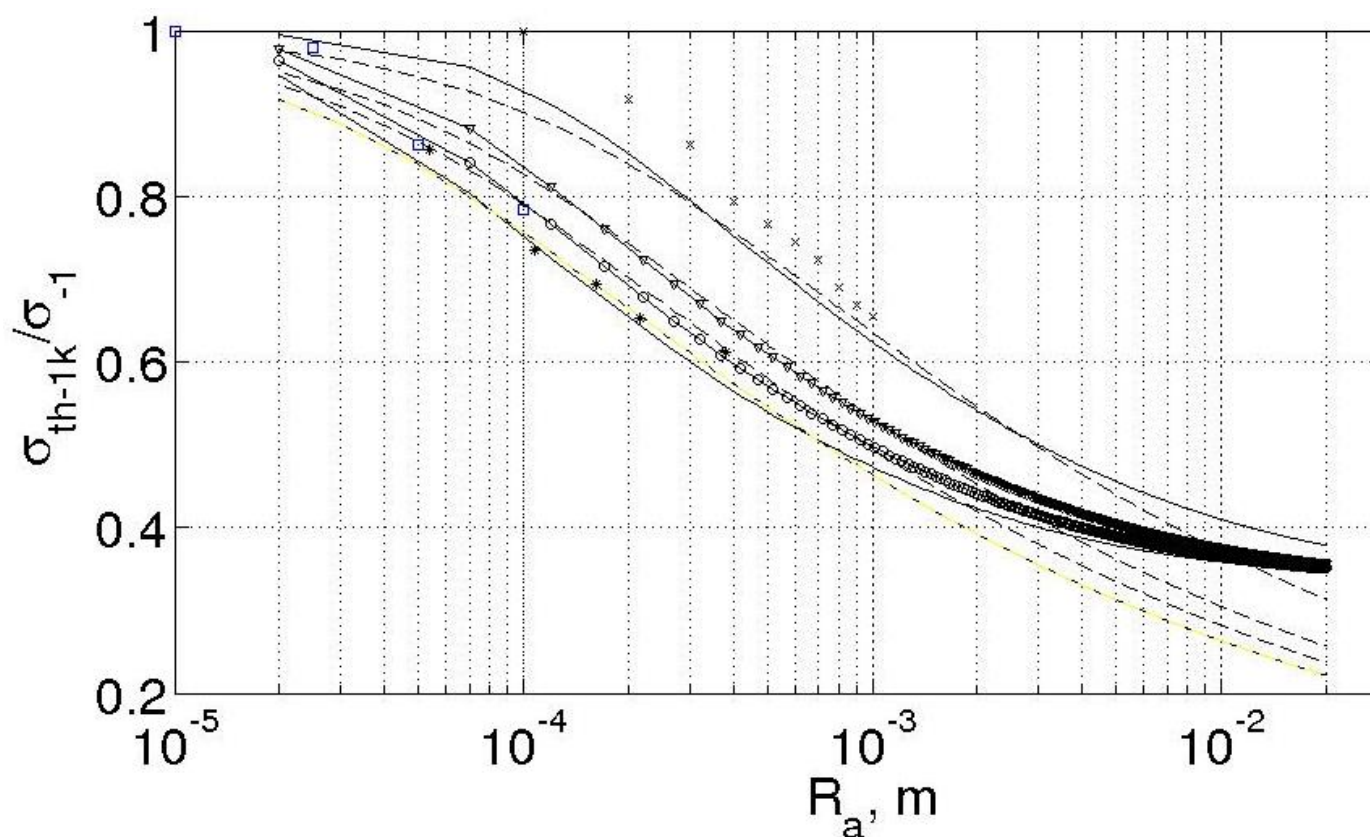


Рис. 4. Кривые зависимости эффективного коэффициента концентрации (обратное значение к  $\sigma_{th-1k}/\sigma_{-1}$ ) в зависимости от радиуса кругового отверстия. Здесь \*,  $\square$  и  $\times$  – экспериментальные данные из [6] (аналог – сталь 50) и [5] (сталь 10) соответственно; — теория по (5) для стали 50 (кривая снизу) и стали 10 (кривая сверху); - - - теория (1);  $\odot$  и  $\nabla$  – сталь 22К и Ст3 соответственно.

Также интересен вопрос для развивающейся трещины в области высокой концентрации напряжений, какой максимальной длины трещина достигнет при выходе из этой области, прежде чем остановится. Будем называть эту длину – *пороговая длина трещины, зародившейся в известном концентраторе*, или просто *пороговая длина трещины концентратора*. Ее расчет покажет, можно ли продолжать эксплуатацию конструкции или нет (в последнем случае – если по техническим требованиям трещина такой длины недопустима).

На рис. 5 предложены зависимости изменения пороговой длины трещины концентратора в зависимости от размера концентратора. Она спровоцирована напряжениями от концентратора и является неразвивающейся при пороговом пределе выносливости  $\sigma_{th-1k}$  элемента с концентрацией напряжений.

Сравнение теоретических кривых на рис. 4 с экспериментальными данными показывает хорошее согласование результатов предложенной нами модели при макроконцентраторах малого размера. Для больших радиусов  $R_a$  круговых отверстий экспериментальных значений на графиках не приведено, однако характер кривых по предложенной методике является адекватным по сравнению с моделью (1). Модель (1) показывает что для некоторых сталей уже при  $R_a > 10$  мм трещины будут развиваемые при внешней нагрузке, составляющей  $< \sigma_{-1}/3$ . Такое обстоятельство противоречит существующим и известным апробированным положениям: трещина не развивается при напряжениях ниже предела выносливости неповрежденного материала. В то время как (5) показывает, что с увеличением радиуса кругового отверстия  $\sigma_{th-1k}$  приближается асимптотически к  $\sigma_{-1}/3$ , и это является адекватным поведением и не противоречит известным фактам в ЛМР.

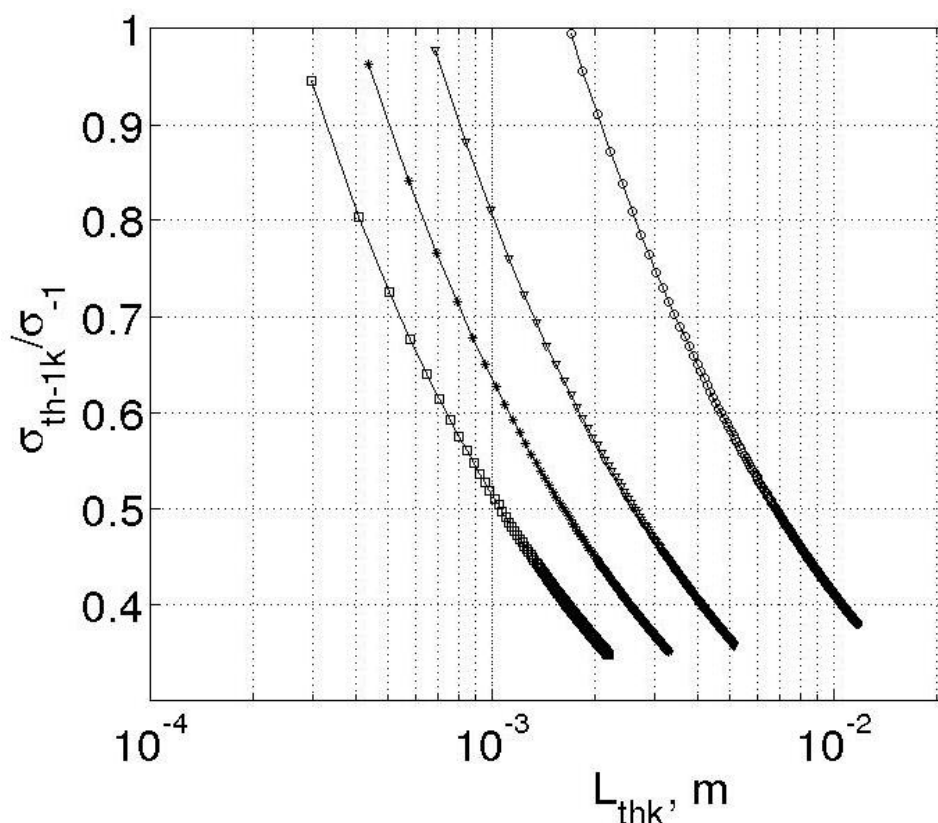


Рис. 5. Кривые изменения допустимого эффективного коэффициента концентрации напряжений от максимальной пороговой трещины, образованной в концентраторе для различных сталей:  $\square$  – сталь 50;  $\odot$  – сталь 10;  $\nabla$  – сталь Ст3; \* – сталь 22К.

### Обсуждение результатов

Чтобы воспользоваться диаграммами предельного распространения трещин (см. рис. 4 и рис. 5), нужно знать внешнюю нагрузку  $\sigma'_0$ , предел выносливости неповрежденного материала  $\sigma_{fr}$  и радиус макроконцентратора  $R_a$ . По известному значению  $R_a$  проводим вертикальную линию до пересечения с кривой определенного материала (см. рис. 4) и находим значение отношения  $\sigma_{th-1k}/\sigma_{-1}$  по вертикальной оси. Отсюда произведение  $K \cdot \sigma_{-1}$ , где  $K$  – найденное значение по вертикальной оси – будет предельной внешней нагрузкой, при которой трещина еще не распространяемая. Если внешняя нагрузка выше, чем  $\sigma_{th-1k}$ , то для данного концентратора трещина, зародившаяся в нем, будет распространяемой и достигнет критической величины.

Следующая стадия – определение максимальной длины трещины, которая является нераспространяемой при данной внешней нагрузке. Для этого нужно использовать диаграмму максимальной пороговой трещины (см. рис. 5). Отложим значение отношения  $\sigma_{th-1k}/\sigma_{-1}$ . Далее, до пересечения с кривой соответствующего материала, проводим горизонтальную линию и отмечаем пороговую длину трещины  $L_{thk}$ .

### Выводы

Следует отметить, что при малых значениях  $L_{thk}$ , таких, когда  $L < L_{thk}$  и  $\frac{\sigma_{th-1k}}{\sigma_{-1}} > 0,8$ , при визуальном контроле трещину можно не увидеть, так как на практике граница пороговых напряжений может быть неустойчива, и следует считать, что трещины такого размера не влияют на предел выносливости. Этот случай относится к физически малым концентраторам напряжения.

С учетом полученных результатов можно сделать вывод: для некоторых материалов, например хрупких, и сталей повышенной прочности с низкой пластичностью пороговый размер трещины может оказаться больше критического размера макротрещины, т.е.  $L_{thk} > L_c$ . В таком



случае нужно опираться на величину  $L_c$ , и ситуация хрупкого разрушения от макроконцентратора приобретает первостепенное значение. Для сталей повышенной прочности обычно  $L_c$  невелико, и для сравнимо больших концентраторов, таких, где  $\frac{R_a}{L_c} > (1 \div 3)$ , трещины могут достигать своего критического размера даже при внешней нагрузке немногим выше  $\sigma_{-1}/3$  – в случае концентратора в виде кругового отверстия. Таким образом, сравнительно большие концентраторы представляют большую опасность для сталей повышенной прочности или сталей с низкой пластичностью, если нет четко выверенной периодической диагностики конструкции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гридасов А.В. Влияние типа и геометрических параметров сварного соединения на долговечность сварных конструкций теплоэнергетических объектов // Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта: сб. Вып. 45. Владивосток: ДВГТУ, 2005. С. 254–257.
2. Кишкин Б.П. Конструкционная прочность материалов. М.: МГУ, 1976. 184 с.
3. Матохин Г.В., Горбачев К.П., Воробьев А.Ю. Основы оценки прочности и долговечности сварных конструкций. Владивосток: ДВГТУ, 2008. 270 с.
4. Молоков К.А. Оценка пределов усталости в зоне концентраторов напряжения // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы региональной науч.-техн. конф. Ч. 2. Владивосток: ДВГТУ, 2006. С. 295–300.
5. Хажинский Г.М. Основы расчетов на усталость и длительную прочность. М.: ЛЕНАНД, 2016. 168 с.
6. Murakami Y. Theory of Elasticity and Stress Concentration. John Wiley & Sons, Ltd, 2017, 446 p.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE THE NEXT PAGE](#)

**Welding, related processes and technologies**

DOI.org/10.5281/zenodo.399005

Molokov K., Sakharov A., Mikhalev M.

KONSTANTIN MOLOKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
e-mail: spektrum011277@gmail.com

ANZHELIKA SAKHAROVA, Student, e-mail: lika.sakharova.96@mail.ru

MIKHAIL MIKHALEV, Student, e-mail: mixaljov\_mv@students.dvfu.ru

Department of Welding, School of Engineering

*Far Eastern Federal University*

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690950

## **Crack propagation-based assessment of the endurance limits of welded joints**

**Abstract:** The welded joint and heat-affected zone are characterized by considerable heterogeneity of mechanical properties, diameter of grain, as well as by the existence of different stress concentrators which provoke the appearance of fatigue cracks. It is known, that the main factor that influences on the possibility of the appearance and the propagation rate of microcracks is the level of the stress condition, as well as the structural and mechanical discontinuity of the metal of welded joints. The level of the stress condition largely depends on residual welding stress and local physical stress concentrators.

The article presents the authors' model and approach to the assessment of the effective coefficients of the stress concentrations for welded joints having the defects like undercuts, reeds, and other stress concentrators caused by propagating cracks that are generated by the stationary variable load. The proposed model is based on Kirsch solution for circular hole in the conditions of plane stress state under the influence of uniaxial load. The results of the model have been checked experimentally on carbon and ferrite-pearlite steels. The values of the endurance limits, the propagation of cracks depending on the size of the defect being the criterion, have been obtained. The sizes of the cracks that appear in the area of stress concentration and do not propagate in relation to the diameter of the circular hole in the plate have been calculated. Unlike the model presented in G.M. Charzynski's monograph this one gives an asymptotic approximation of the endurance limit to the value  $\sigma_{-1}/3$  with the macroconcentrator stress increase in the shape of a hole. The model is built for infinite plate and it takes no account of change in the stress field conditioned by limited sizes. The presented model does not take into consideration the correction of Kirsch solution as a necessity under changes of the stress area caused by the appearance of cracks in the area of maximum stress concentration. The model is based on the consideration of the area with higher stresses adjacent the edge of the hole as the area gaining the most intense damages near the stress concentrator under the action of cyclic loads.

**Key words:** welded joint, endurance limit, defect, stress concentrator, breakloose macrocrack, fatigue crack, stress intensity factor.

### REFERENCES

1. Gridasov A.V. Influence of the type and geometric parameters of the welded joint to endurance of welded structures of thermal power facilities. Research on improving the efficiency of shipbuilding and ship repair. Vol. 45. Vladivostok FESTU, 2005, p. 254-257.
2. Kishkin B.P. Structural strength of materials. Moscow, Moscow State University, 1976, 184 p.
3. Matokhin G.V., Gorbachev K.P., Vorobyov A.Y. A framework for assessing the strength and durability of welded structures. Vladivostok, FESTU, 2008, 270 p.
4. Molokov K.A. Estimating fatigue endurance limit in the zone of stress concentrators. Youth and scientific and technical progress: Materials of regional scientific and engineering. conf. Part 2. Vladivostok, FESTU, 2006, pp. 295-300.
5. Charzyński G.M. The calculation basis on fatigue and endurance. Moscow, LENAND, 2016, 168 p.
6. Murakami Y. Theory of Elasticity and Stress Concentration. John Wiley & Sons, Ltd, 2017, 446 p.