

**Е.А. Кривоносова**

**E.A. Krivonosova**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

## **КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ**

### **CRITERIANES OF MEASURING OF FATIGUE PROPERTY OF WELDING METAL**

Приведен анализ критериев оценки сопротивления развитию усталостных трещин в низкоуглеродистых, средне- и высоколегированных сварных швах.

**Ключевые слова:** металл сварных швов, усталость, трещины, коэффициент интенсивности напряжений, критерий оценки.

The analysis methods of fatigue crack resistant of welding metal of low carbon steel, middle- and high-ligature steel is considered.

**Keywords:** methods analysis of fatigue property, welding metal, crack resistant, stress intensity range, criterion of measuring.

Проблема повышения сопротивления усталости металла сварных швов остается актуальной несмотря на значительные усилия инженерной науки и практики в данном направлении. При испытании усталостных свойств металла сварных швов неизбежно возникает проблема малых размеров образца, к которым не всегда можно корректно применить традиционные методы измерения усталостных свойств, применяемые для образцов стандартных размеров. Описать процесс усталостного разрушения металла сварных швов (зарождение и развитие усталостной трещины) с единых позиций пока еще не удастся. При анализе стадии зарождения трещины от концентратора обычно используют традиционные представления об усталости при циклическом деформировании, тогда как анализ стадии роста трещины выполняют с помощью механики разрушения [1].

Исследования в области механики разрушения твердого тела при переменных нагрузениях позволили установить, что скорость распространения усталостной трещины при изгибе  $v = \frac{dl}{dN}$  является функцией размаха коэф-

фициента интенсивности напряжений  $K_I$ . Эта зависимость, известная как кинетическая диаграмма усталостного разрушения (рис. 1), была принята за основу. Диаграмма имеет три характерных участка. На участке 1 при значениях  $K_I$ , меньших порогового коэффициента страгивания трещины  $K_{th}$ , трещина практически не растет. Значение  $K_{th}$  устанавливают экспериментально как максимальное значение  $K_I$ , при котором скорость роста усталостной трещины не превышает  $3 \cdot 10^{-10}$  м/цикл на протяжении  $10^6$  циклов.

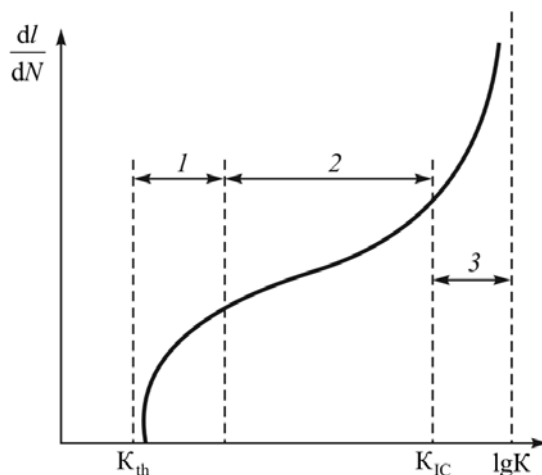


Рис. 1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Условно принимают, что при  $K_I = K_{th}$  происходит переход от первой стадии развития разрушения ко второй, причем скорость роста трещины скачком возрастает от нуля до  $5 \cdot 10^{-8}$  м/цикл. Участок 2 кинетической диаграммы разрушения может составлять значительную часть ресурса конструкции. Скорость роста трещины на этом участке подчиняется уравнению Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot K_I^m,$$

где  $C$  и  $m$  – параметры материала, определяемые экспериментально.

Зависимость этой скорости от  $K_I$  степенная (в логарифмических координатах выглядит как наклонный отрезок прямой).

Средний участок кинетической диаграммы усталостного разрушения, исследованием которого, как наиболее важного с прикладной точки зрения, ограничиваются в большинстве случаев, характеризуется скоростью роста трещины около  $10^{-8}$  м/цикл.

Участок 3 кинетической диаграммы – участок ускоренного роста трещины ( $\frac{dl}{dN} > 10^{-6}$  м/цикл), предшествующий переходу к скачкообразному

продвижению при пределе циклической трещиностойкости, близкому по значению к вязкости разрушения  $K_{IC}$ .

Коэффициент интенсивности напряжений вычисляли по справочным данным для плоских образцов с острым концентратором [2]:

$$K_1 = \frac{6M}{tW^2} \sqrt{\pi l} Y(\alpha), \quad \alpha = l/W,$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $t$ ,  $W$ ,  $l$  – размеры образца;  $Y(\alpha)$  – тарировочный коэффициент, определяемый из соотношения

$$Y(\alpha) = 1,122 - 1,4\alpha + 7,33\alpha^2 - 13,08\alpha^3 + 14\alpha^4.$$

Дополнительно учитывали границы применимости формулы для коэффициента интенсивности напряжений:  $\alpha = \frac{l}{W} \leq 0,6$ .

**Методика малообразцовых испытаний на усталостный изгиб металла сварных швов.** Испытания проводили на образцах металла сварного шва углеродистых [2–5], а также средне- [6, 7] и высоколегированных сталей [8–13]. В первом случае сварные швы выполнялись электродами типа Э46 в канавку на полосах стали Ст. 3 толщиной 6 мм за один проход. При таких условиях сварки существовали определенные ограничения по размерам образца. Для исследований из металла сварных швов изготавливали образцы Шарпи (ГОСТ 9454–78, тип 14). Вид концентратора V-образный, длина  $L = 55$  мм, ширина  $t = 2,5 \pm 0,05$  мм, высота  $W = 8 \pm 0,01$  мм. Надрез ориентировали таким образом, чтобы трещина прошла через шов параллельно направлению сварки (рис. 2).

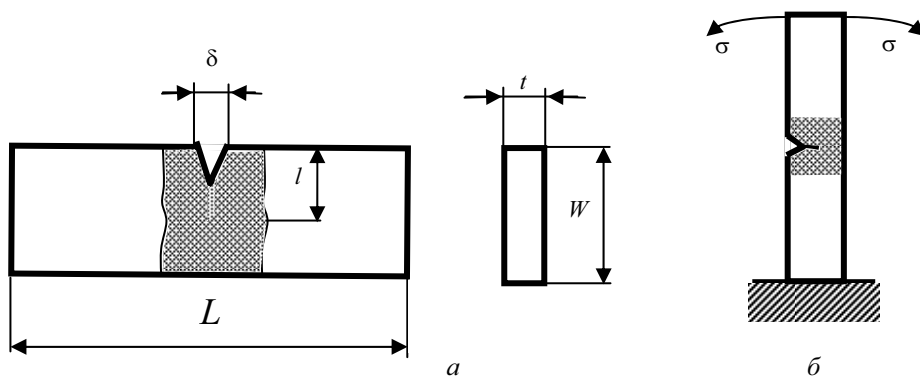


Рис. 2. Образцы для усталостных испытаний (а, штриховкой указано расположение зоны сварного шва) и схема нагружения образца (б)

Для испытаний была разработана специальная установка испытания на усталостный изгиб, состоящая из силового блока, на базе модернизированной машины для усталостных испытаний, оптической системы наблюдения за ростом трещины, системы контроля числа оборотов, а также тарировочного приспособления. Вообще, для определения порогового коэффициента интенсивности напряжений достаточно испытать один образец, выращивая трещины разных длин и добиваясь их торможения. Однако для получения необходимого 95%-ного уровня надежности, принятого в технических расчетах, испытания повторяли на 3–4 образцах металла шва для каждого состава электродного покрытия, а результаты статистически обрабатывались.

Периодически по мере роста трещины проводилась тарировка нагрузки на образец по величине прогиба  $\Delta$ , задаваемого машиной, для каждой длины трещины.

**Результаты исследований.** В ходе испытаний фиксировали кривые роста длины трещины  $l$  при увеличении числа циклов нагружения  $N$ . Вид кривых роста трещины для некоторых сварных швов представлен на рис. 3.

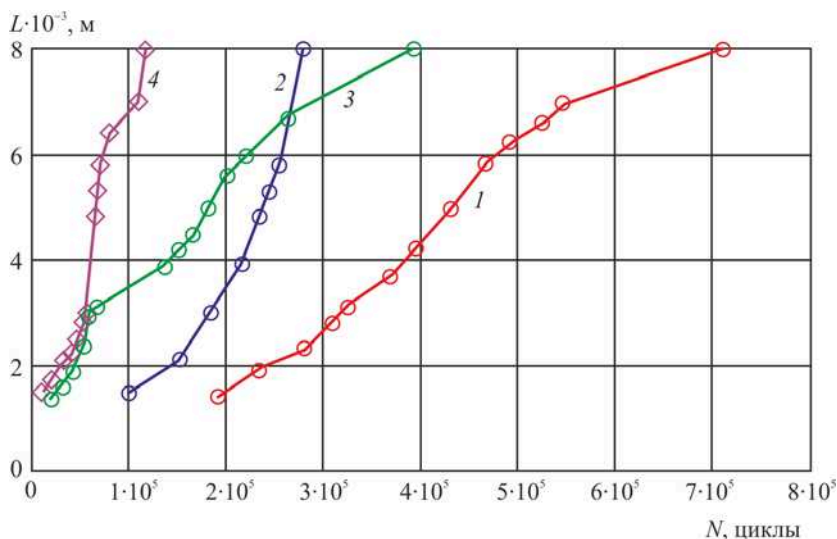


Рис. 3. Зависимость длины усталостной трещины  $L$  от числа циклов усталостных испытаний  $N$  для металла шва электродов: 1 и 3 – электрод 1808 ( $\Delta = 1$  и 1,5 мм); 2 и 4 – электрод 1809 ( $\Delta = 1$  и 1,5 мм)

Для металла шва всех составов характерно достаточно плавное нарастание длины трещины с увеличением числа циклов нагружения без перегибов до длины примерно  $l = 5 \dots 6$  мм. При этом пределе на кривых появляется перегиб, связанный с изменением схемы изгиба. При уменьшении рабочего сечения образца схема изгиба, выполняющаяся в начале испытания, нарушает-

ся, деформирование становится возможным в нескольких направлениях и эффект сосредоточенности деформации исчезает, на кривых  $l = f(N)$  наблюдается замедление роста длины трещины.

Кроме того, длина трещины  $l = 5 \dots 6$  мм является пределом применимости формулы для определения тарировочного коэффициента  $Y$  в уравнении Пэриса. Для сохранения корректности последующего анализа характера усталостного разрушения ограничивались областью начальных и средних длин трещин.

Этапу зарождения трещины предшествует инкубационный период, изменяющийся в зависимости от состава шва, структуры и величины изгибающего момента. Для прогиба  $\Delta = 1$  мм инкубационный период составляет  $(2 \dots 3) \cdot 10^5$  циклов для швов с грубой структурой и  $(7 \dots 8) \cdot 10^5$  циклов для мелкозернистых швов. Эти трещины зарождаются тем раньше, чем выше уровень циклических напряжений и «грубее» структура металла шва. Подобную зависимость инкубационного периода зарождения трещины от уровня напряжений наблюдали в работе [8]. Аналогичные наблюдения были сделаны в других работах для низколегированных сталей: сопротивление развитию усталостных трещин и более высокие значения  $K_{th}$  характерны для сталей с грубой структурой (исследования проводились не на сварных швах).

Кинетические диаграммы усталостного разрушения металла сварных швов были построены для среднего интервала разрушения, как наиболее важной с прикладной точки зрения.

Для обработки кинетических диаграмм усталостного разрушения сварных швов использовали два варианта математического приближения экспериментальных результатов:

– по уравнению Пэриса 
$$\frac{dl}{dN} = C \cdot K_I^m,$$

– по экспоненциальной зависимости 
$$\frac{dl}{dN} = A \cdot \exp(a \cdot K_I),$$
 где  $C, A, m$

и  $a$  – параметры, зависящие от материала и формы образца.

Результаты выравнивания экспериментальных данных для металла сварных швов углеродистых сталей представлены на рис. 4, на котором совмещены два варианта выравнивания. В результате сравнения точности приближения экспериментальных данных математическими кривыми установлено, что наибольшей точностью обладает приближение по уравнению Пэриса. Таким образом, было решено ограничиться первым вариантом выравнивания. На рис. 5 приведены зависимости скорости распространения трещины от коэффициента интенсивности напряжений в логарифмическом масштабе.

Интересным является тот факт, что кинетические диаграммы разрушения металла шва электрода 1808 хорошо совпадают с результатами, получен-

ными в работах Екобори для кривых скорости распространения усталостных трещин в малоуглеродистой стали, построенными по результатам развития микро- и макротрещин. Показатель уравнения Пэриса в опытах Екобори  $m = 3$ , в наших опытах – 2,1–2,6. Вообще, показатель уравнения Пэриса для материалов этого класса может изменяться в пределах от 2 до 7.

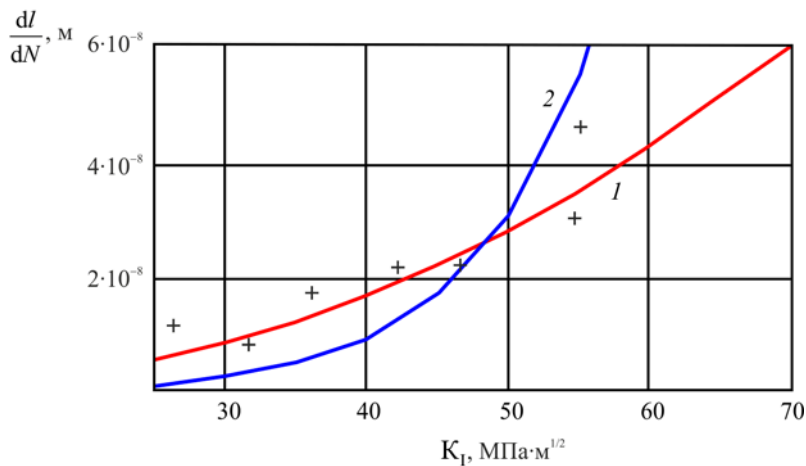


Рис. 4. Выравнивание кинетической кривой усталостных испытаний для металла шва электрода 1808: 1 – по уравнению Пэриса  $\frac{dl}{dN} = C \cdot K_I^m$ ,  $C = 4,14 \cdot 10^{-12}$ ;  $m = 2,26$ ; 2 – по экспоненциальной зависимости  $\frac{dl}{dN} = A \cdot \exp(a \cdot K_I)$ ,  $A = 10^{-9}$   $a = 0,115$ ; + – экспериментальные точки

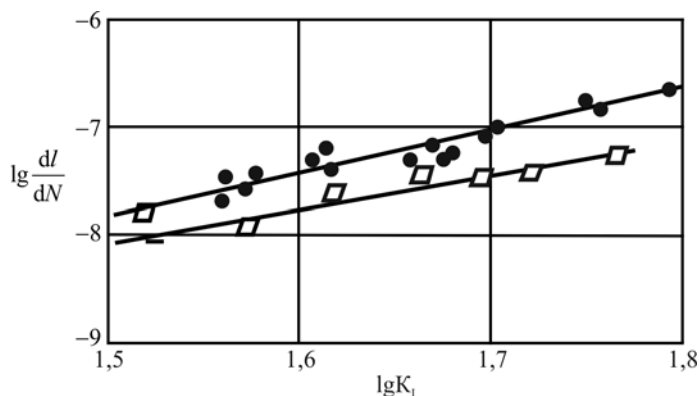


Рис. 5. Зависимость скорости распространения трещины от коэффициента интенсивности напряжений для металла шва электродов типа Э46: 1 – ОК46,  $m = 2,4$ ; 2 – Эл. 1808,  $m = 2,26$

В процессе испытаний на металле шва некоторых электродов наблюдался эффект появления дополнительных трещин, развивающихся по линии сплавления. Аналогичные эффекты, в частности влияние создающих концентрацию напряжений дефектов, таких как подрезы, поверхностные поры, неправильная форма шва, мелкие трещины, не выявленные при контроле неразрушающими способами, отмечены в работе [1].

Сказываются и внутренние дефекты, расположенные вблизи поверхности металла. На рис. 6 представлена ситуация появления и развития дополнительных трещин от неметаллических включений и макродефектов вблизи края усталостного излома.

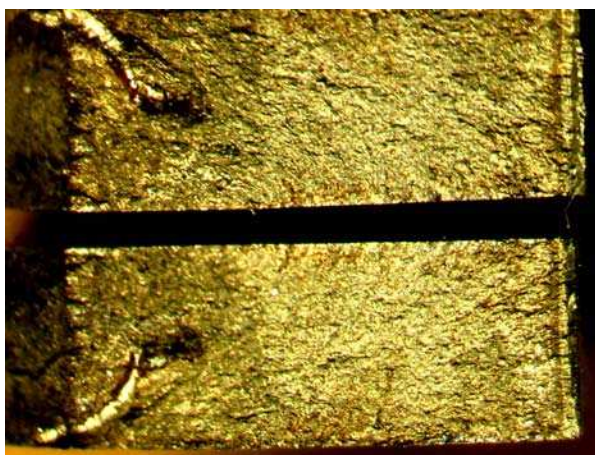


Рис. 6. Трещина от внутреннего макродефекта в металле шва низкоуглеродистой стали.  $\times 20$

Сделаем следующие выводы:

1. При испытании усталостных свойств металла сварных швов неизбежно возникает проблема малых размеров образца, к которому не всегда можно корректно применить традиционные методы измерения усталостных свойств, применяемые для образцов стандартных размеров.

2. Предложена методика испытаний с использованием образцов малых размеров на усталостный изгиб металла сварных швов, позволяющая корректно оценить характер усталостного разрушения в области начальных и средних длин трещин.

3. Установлено, что для кривых скорости распространения усталостных трещин в металле сварного шва низкоуглеродистой стали, построенными по результатам развития микро- и макротрещин, показатель уравнения Пэриса равен 2,1–2,6. Вообще, показатель уравнения Пэриса для материалов этого класса может изменяться в пределах от 2 до 7.

## Список литературы

1. Radai D. Design and analysis of Fatigue Resistant Welding Structures. – Abington Publishing, 1990. – 380 p.
2. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вассерман Н.Н. Структурные аспекты усталостного разрушения металла сварных швов // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 9. – С. 20–23.
3. Структурные факторы хладостойкости сварных швов / В.М. Язовских, Е.А. Кривоносова, В.И. Шумяков, И.Ю. Летагин, Н.В. Вылежнева // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 12–14.
4. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вылежнева Н.В. Влияние неметаллических включений на развитие деформации сварных швов // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 36–39.
5. Оптимизация состава электродного покрытия с силикомарганцем в качестве раскислителя / В.М. Язовских, Е.А. Кривоносова, В.И. Шумяков, И.Ю. Летагин // Сварка в Сибири. – 2005. – № 2. – С. 46–48.
6. Кривоносова Е.А., Рудакова О.А. Влияние структуры отдельных слоев сварных швов стали 10Г2ФБЮ на сопротивление усталостному разрушению // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 6–9.
7. Кривоносова Е.А., Рудакова О.А. Определение характеристик сопротивления усталости многослойных сварных швов стали 10Г2ФБЮ // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 29–36.
8. Влияние режима сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, О.А. Рудакова, Г.В. Встовский // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 23–27.
9. Кривоносова Е.А., Саломатова Е.С., Рудакова О.А. Влияние состава электродного покрытия на процессы структурообразования в сварных швах высоколегированных сталей // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 103–108.
10. Разработка методики исследования коррозионной усталости сварных соединений магистральных газонефтепроводов / О.А. Рудакова, Е.А. Кривоносова, Е.С. Захарова, М.Х. Арипов // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 58–64.
11. Структурные особенности деформирования сварных швов высоколегированных сталей / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, Е.С. Саломатова, А.И. Горчаков // Сварка и диагностика. – 2011. – № 3. – С. 14–17.
12. Кривоносова Е.А., Синкина Е.А., Горчаков А.И. Влияние типа покрытия электродов на коррозионную стойкость металла шва стали 08Х18Н10Т // Сварочное производство. – 2012. – № 4. – С. 38–41.



13. Кривоносова Е.А. Оценка размеров зоны повышенной пластической деформации при усталостном разрушении металла сварного шва // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 71–76.

Получено 15.02.2013

**Кривоносова Екатерина Александровна** – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990 Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: katerinakkkkk@mail.ru).

**Krivososova Ekaterina Aleksandrovna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: katerinakkkkk@mail.ru).