

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.672.052.2:539.422.24

Серенко А.Н.*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КИНЕТИКУ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ. ЧАСТЬ I

В первой части статьи анализируются факторы, влияющие на кинетику развития усталостных трещин в основном металле и сварных соединениях. Результаты испытаний образцов знакопеременным плоским изгибом позволили установить линейную зависимость между обратной величиной скорости роста трещины и ее относительной длиной, что дает возможность достаточно просто оценить степень влияния остаточных напряжений на долговечность сварных конструкций.

Ключевые слова: остаточные напряжения, развитие усталостных трещин, сварные соединения.

Серенко О.М. Оцінка впливу залишкових напружень на кінетику розвитку вто- мних тріщин в зварних з'єднаннях. Частина I. У першій частині статті аналі- зуються чинники, що впливають на кінетику розвитку втомих тріщин в основно- му металі і зварних з'єднаннях. Результати випробувань зразків знакозмінним пло- ским вигином дозволили встановити лінійну залежність між зворотною величиною швидкості росту тріщини і її відносною довжиною, що дає можливість досить просто оцінити ступінь впливу залишкових напружень на довговічність зварних конструкцій.

Ключові слова: залишкови, розвиток втомих тріщин, зварні з'єднання.

O.M. Serenko. Estimation of Effects of Residual Stresses on Kinetics of Fatigue Cracks Development in Welded Joints. Part I. Factors influencing the kinetics of fatigue cracks development in the base metal and welded joints are analysed in the first part of the article. The results of the variable bending tests allowed to establish a linear dependence, between a reverse value of crack growth and its relative length, which makes it possible to evaluate simply enough the degree of influence of residual stresses on service life of welded joints.

Keywords: residual stress, fatigue cracks development, welded joints.

Постановка проблемы. Анализ отказов в работе сварных конструкций показывает, что одной из причин этого является образование и развитие усталостных трещин.

Считается, что усталостные трещины зарождаются, главным образом, в местах расположения дефектов технологического и конструктивного характера. Влияние остаточных напряжений на кинетику роста трещин в сварных конструкциях до настоящего времени изучено недостаточно.

Анализ последних исследований и публикаций. В ряде работ установлено, что большая доля ресурса работы металлоконструкций приходится на стадию развития усталостных трещин. Для прогнозирования периода безотказной работы конструкции необходимо иметь четкое представление о поведении усталостных трещин в зависимости от того многообразия факторов, которое сопровождает процесс её изготовления и эксплуатации [1, 2, 5 и др.].

Решение этой проблемы может быть осуществлено на основе критериев линейной механики разрушения. Несмотря на широкие исследования по изучению сопротивляемости распространению усталостных трещин в сталях [3-5 и др.], позволяющие лучше понять процесс хрупкого разрушения, до сих пор еще не разработан надежный и простой метод расчета, гаранти-

* канд. техн. наук, профессор, ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет", г. Мариуполь

рующий безопасность работы конструкций, а хрупкое разрушение конструкций имеет место и в настоящее время. Это связано прежде всего с многообразием факторов, влияющих на процесс распространения трещин.

Цель статьи состоит в получении количественных характеристик роста трещин усталости в конструкциях с остаточными сварочными напряжениями.

Изложение основного материала. Принято считать, что основными факторами влияющими на зарождение и развитие усталостных трещин являются: условия нагружения, состояние металла, химический состав, температура эксплуатации и др.

Известно, что в сварных конструкциях в результате термического воздействия дуги при сварке возможно существенное изменение свойств основного металла. В настоящее время пока невозможно (без проведения специальных исследований) по статическим характеристикам определить сопротивляемость основного металла или зоны термического влияния распространению усталостных трещин.

Крайне недостаточно изучено влияние термообработки и остаточных напряжений на распространение усталостных трещин.

Таким образом существует реальная необходимость дальнейшего изучения сопротивляемости распространению усталостных трещин при циклическом нагружении.

Усталостные трещины в сварных конструкциях зарождаются, как правило, по линии сплавления шва, являющегося концентратором напряжений. В зависимости от расположения шва по отношению к нагрузке, а также соотношения сопротивляемости распространению трещины основного металла, металла шва и околошовной зоны трещина будет развиваться в той или иной зоне.

Данных по сопротивляемости распространению трещин в основном металле в литературе имеется немало. Такие данные для сварных соединений ограничены. Термодеформационный цикл сварки может существенно повлиять на механические свойства и структурное состояние металла, что в свою очередь повлияет на сопротивляемость усталостному разрушению.

Наиболее достоверные данные о сопротивляемости распространению усталостных трещин можно получить при испытании реальных конструкций [4] Однако такие испытания весьма трудоемки и дорогостоящие, поэтому исследования обычно осуществляются на образцах. При этом получают данные, используемые для рационального выбора марок сталей.

Для испытаний применяют различные образцы и схемы нагружения. Образцы бывают с центральной трещиной, с односторонним или двусторонним боковым надрезом, цилиндрические с кольцевым надрезом и др.

Схемы нагружения - осевое или внецентренное растяжение, трехточечный, четырехточечный изгиб, консольный изгиб и др. Большая часть приведенных в литературе исследований проводилась при постоянной нагрузке и асимметричных циклах, исходя из того, что многие детали металлоконструкций работают в таких условиях. Однако в практике нередко случаи работы деталей при постоянной деформации. Поэтому в данных исследованиях образцы подвергались чистому изгибу при постоянном прогибе (жесткое нагружение). Цикл нагружения - симметричный.

Исследования проводились на плоских образцах с центральной трещиной (рис.1). Материал образцов – горячекатаная сталь 09Г2С.

Статические и усталостные свойства испытываемой стали приведены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства стали 09Г2С

Толщина металла t , мм	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость, Дж/см ² при +20 °С	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
20	520	330	30	66	250	180

Испытаниям подвергались три серии образцов: I серия - основной металл (рис.1,а); II серия - стыковые соединения (рис.1,б), сваренные на погонной энергии $q = 24703$ Дж/см; III серия

- стыковые соединения, сваренные на погонной энергии $q = 12142$ Дж/см. Размеры образцов всех серий были одинаковыми ($\hat{A} = 80 \text{ и } \delta = 20 \text{ и } \text{и}$).

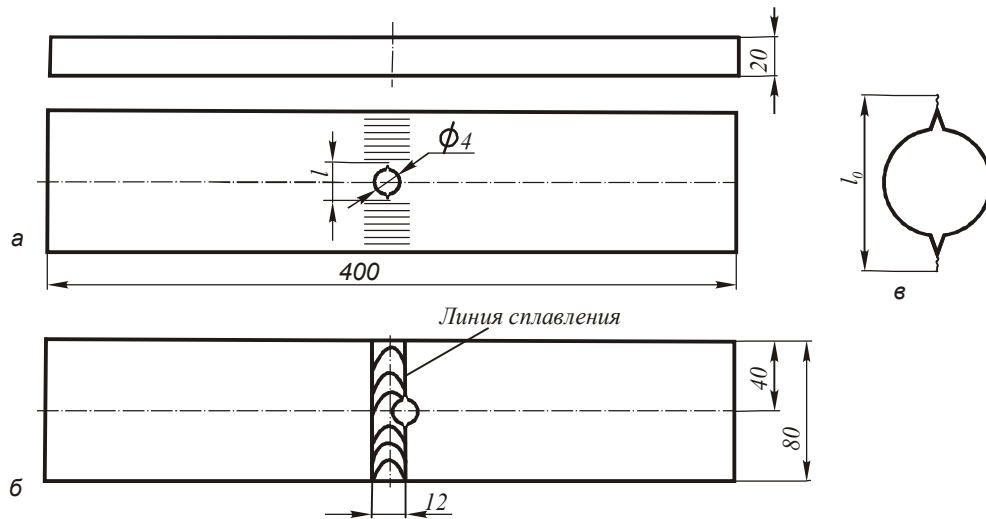


Рис. 1 - Общий вид испытываемых образцов

Подготовка образцов к испытаниям производилась следующим образом.

Перед изготовлением образцов пластины всех серий подвергались высокому отпуску при $T = 650^\circ\text{C}$ и выдержке 2 часа. Такой отпуск необходим для устранения возможного наклепа и остаточных напряжений на поверхности пластин, вызванных прокаткой, правкой листа и вырезкой образцов. На пластины второй и третьей серий наплавлялись швы на соответствующих режимах с двух сторон.

Швы выполнялись автоматической сваркой под слоем флюса. Флюс АН-348А, проволока Св08, диаметром 4 мм.

Режим сварки: II серия - $I_{\text{св}} = 750\text{А}$, $U_{\text{д}} = 36\text{В}$, $V_{\text{св}} = 30 \text{ м/ч}$; III серия - $I_{\text{св}} = 450\text{А}$, $U_{\text{д}} = 30\text{В}$, $V_{\text{св}} = 30 \text{ м/ч}$.

После сварки усиление швов сфрезеровывалось заподлицо.

Сверловка отверстия и надрез выполнялись таким образом, чтобы острие надреза располагалось на линии сплавления. Поверхность рабочей части образца шлифовалась шкуркой, а затем полировалась до зеркального блеска для последующего нанесения мерных рисок.

Испытания изгибом проводились в плоскости, перпендикулярной плоскости образца на установке с кривошипно-шатунным механизмом (рис. 2).

Исходная длина трещины (рис. 1,в) составляла 6 мм. Испытания образцов проводились на нескольких уровнях напряжений до полного разрушения. В соответствии с рекомендациями [3] для повышения точности измерений при толщине образцов более 10 мм контроль за ростом трещины проводился с обеих сторон, а за длину приращения принималось среднее арифметическое. Измерение приращения длины трещины осуществлялось визуально с помощью микроскопа. Точность измерения была не ниже $\pm 0,1 \text{ мм}$.

По результатам измерений строились кинетические зависимости приращения длины трещины от числа циклов нагружения при разных уровнях напряжений (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что большей сопротивляемостью распространению усталостных трещин обладает металл околошовной зоны. Так при напряжениях 180 МПа число циклов до полного разрушения сварных образцов в 2,4 раза больше, чем образцов из основного металла. Изме-

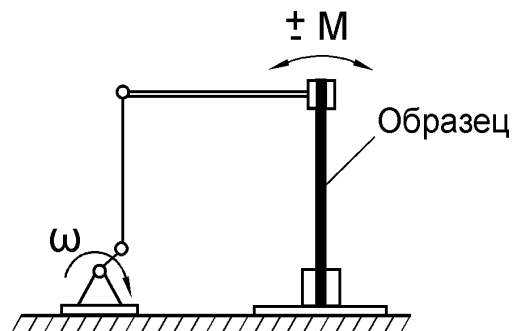


Рис. 2 - Схема машины для усталостных испытаний

ние погонной энергии сварки (в данном случае вдвое) не оказывает заметного изменения сопротивляемости ОШЗ распространению усталостных трещин.

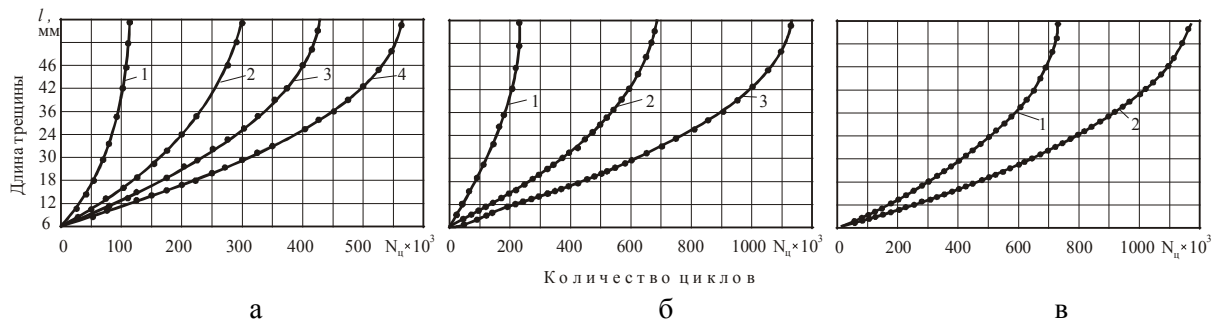


Рис. 3. Кинетические зависимости приращения длины трещины от числа циклов: а - основной металл (1 - $\sigma = 200$ МПа, 2 - $\sigma = 180$ МПа, 3 - $\sigma = 160$ МПа, 4 - $\sigma = 155$ МПа); б - околошовная зона при $q = 24703$ Дж/см (1 - $\sigma = 200$ МПа, 2 - $\sigma = 180$ МПа, 3 - $\sigma = 160$ МПа); в - околошовная зона при $q = 12142$ Дж/см (1 - $\sigma = 180$ МПа, 2 - $\sigma = 160$ МПа)

При построении графика зависимости скорости роста трещины от ее длины каждая зависимость $l = f(N)$ разбивалась на интервалы с длиной трещины l мм. Для каждого интервала изменения длины трещины определялась средняя скорость роста трещины. В результате анализа полученных данных $l = f(N)$ была установлена линейная зависимость обратной величины скорости распространения усталостной трещины ($1/V = \Delta N / \Delta l$) от относительной длины трещины l/B (B - ширина образца), рис. 4.

Такое представление результатов испытаний значительно упрощает определение скорости развития трещины в зависимости от длины трещины.

Из рисунка 4 видно, что зависимости $1/V = f(l/B)$ для всех уровней напряжений носят линейный характер в пределах $0,15 \leq \frac{l}{B} \leq 0,65$.

Испытания образцов на разных уровнях напряжений показали, что трещины развивались с различными скоростями, т.е. угол наклона линейной зависимости $1/V = f(l/B)$ определяется величиной напряжения. Как видно из графиков с увеличением длины трещины значения скоростей развития трещины сближались. А при значении $l/B = 0,75$ наступала стадия лавинного разрушения.

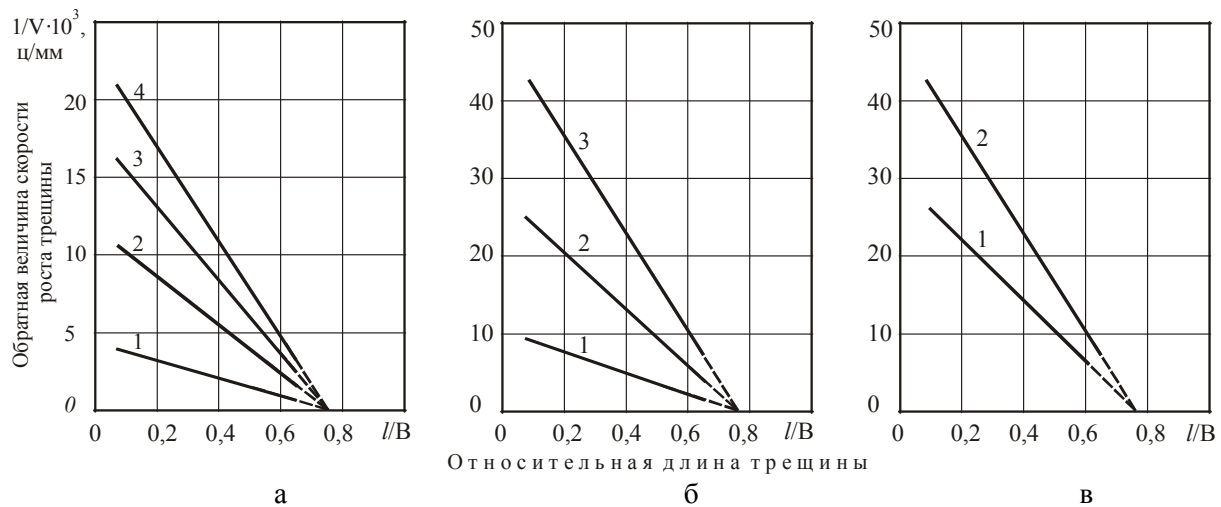


Рис. 4. Зависимость обратной величины скорости роста трещины от относительной длины трещины: а - основной металл (1 - $\sigma = 200$ МПа, 2 - $\sigma = 180$ МПа, 3 -

$\sigma = 160$ МПа, 4 - $\sigma = 155$ МПа); б - околшовная зона при $q = 24703$ Дж/см (1 - $\sigma = 200$ МПа, 2 - $\sigma = 180$ МПа, 3 - $\sigma = 160$ МПа); в - околшовная зона при $q = 12142$ Дж/см (1 - $\sigma = 180$ МПа, 2 - $\sigma = 160$ МПа)

Становится очевидным, что тангенс угла наклона зависимости $1/V = f(l/B)$ представляет собой обратную величину ускорения роста трещины, а линейный характер зависимости указывает на то, что трещины развиваются в указанном интервале с постоянным ускорением. Следует отметить и тот факт, что при испытании постоянным прогибом образца с увеличением уровня заданных напряжений ускорение роста трещины снижается. Это связано с тем, что при постоянном прогибе темп снижения напряжений в образце с ростом трещины выше при больших напряжениях.

Результаты исследований показали, что скорость распространения усталостных трещин в околшовной зоне сварных соединений значительно ниже, чем в основном металле. Двухкратное изменение погонной энергии сварки не привело к заметному изменению скорости развития трещины.

Зависимость обратной величины ускорения развития усталостной трещины от уровня задаваемых напряжений, представленная на рис. 5, также носит линейный характер. Как видно из рис. 5, точки хорошо укладываются на прямую, как для основного металла, так и для ОШЗ.

Таким образом, на основании зависимости $tg\alpha = f(\sigma)$ можно построить зависимости $1/V = f(l/B)$ и $l = f(N)$ для любого уровня напряжений.

Точка пересечения зависимости $tg\alpha = f(\sigma)$ с осью напряжений ($\sigma = 210$ МПа) характеризует напряжения, при которых характер разрушения образцов существенно отличается от такового при меньших напряжениях. Из квазихрупкого разрушение переходит в вязкое. Уже при напряжениях $\sigma = 200$ МПа наблюдалось раздвоение первоначальной трещины, а в

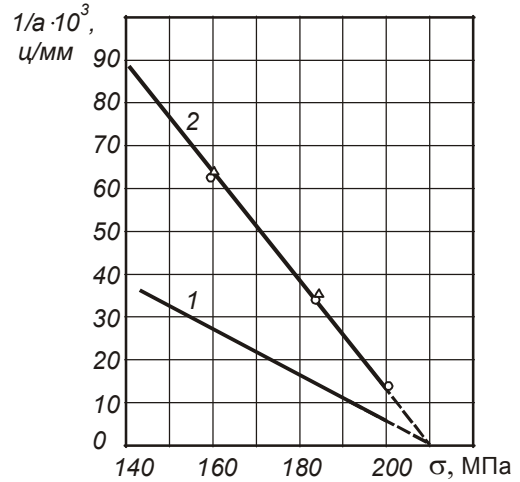


Рис. 5. Зависимость обратной величины ускорения роста трещины от уровня номинальных напряжений: 1 - основной металл; 2 - ОШЗ; o - $q = 24703$ Дж/см; Δ - $q = 12142$ Дж/см

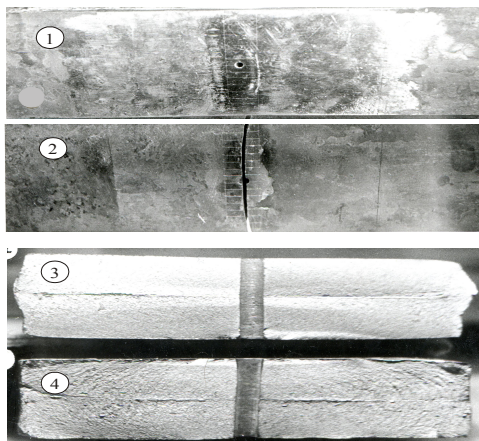


Рис. 6. Вид образцов и их изломов: 1, 2 - образец до и после испытания; 3, 4 - поверхности изломов при $\sigma = 160$ и 200 МПа соответственно

сварных соединениях развивались и встречные трещины от края пластин. Поверхность излома образца, испытанного при высоких напряжениях характеризуется большей шероховатостью, что свидетельствует о значительных пластических деформациях (рис. 6).

На основе приведенных зависимостей можно получить аналитическое выражение для расчета скорости роста трещины от относительной длины трещины:

$$V = \frac{1}{[(l/B)_{\text{ед}} - l/B](\sigma_{\text{ед}} - \sigma)tg\alpha}, \quad (1)$$

где $(l/B)_{\text{ед}}$ - критическое значение относительной длины трещины. Для прямоугольного сечения образцов оно равно 0,75;

l/B - текущее значение относительной длины трещины.

Таким образом, полученная зависимость (1.1) позволяет определить скорость развития усталостной трещины при различных уровнях заданных напряжений и различной длине трещины в условиях нагружения образца плоским изги-

бом.

Выводы

1. Сопrotивляемость распространению усталостных трещин металла околошовной зоны сварного соединения значительно выше, чем основного металла.
2. Изменение погонной энергии при сварке стали 09Г2С не привело к заметному изменению сопротивляемости распространению усталостных трещин в околошовной зоне.
3. При испытании образцов знакопеременным плоским изгибом установлена линейная зависимость между обратной величиной скорости роста трещины и относительной длиной трещины. В линейной зависимости находится и обратная величина ускорения развития трещины от уровня номинальных напряжений.

Список использованных источников:

1. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618 с.
2. Панасюк В.В. Застосування методів механіки руйнування матеріалів для оцінювання міцності зварних з'єднань / В.В. Панасюк // Автоматическая сварка. – 2008. – №11. С. 151-156.
3. PW Guidance on Assessment of the Fitness for Purpose of Welded Structures // PW/IIIS-SST-1157-90. – 322 p.
4. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть материалов / Л.М.Школьник. – М.: Металлургия, 1973. – 435 с.
5. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие; 4 т. / Под общей редакцией Панасюка В.В. – Киев: Наукова думка, 1988-1990.
- Т. 4. : Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романов О.Н., Ярема С.Я., Никифоров Г.Н. и др. – 1990. – 680 с.

Рецензент: А.Д. Размышляев,
д-р техн. наук., проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 26.04.2011

УДК 330.15.332

Чигарев В.В.¹, Коваленко И.В.²

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В статье приведены исследования влияния остаточных напряжений в околошовной зоне плакирующего слоя двухслойной стали ВСтЗсп5+10Х13 на эксплуатационные характеристики конструкции. Приведен анализ сравнительных характеристик эксплуатационных свойств различных биметаллических сварных соединений. Предложенные расчеты позволяют прогнозировать период работоспособности металлоконструкций до периода выхода из строя.

Ключевые слова: сварка биметаллов, остаточные напряжения, плакирующий слой.

Чигарев В.В., Коваленко И.В. Дослідження експлуатаційних властивостей біметалічних зварних з'єднань. У статті доведені дослідження впливу остатових напружень у околошовній зоні плакуючого шару, двошарового шару двошарової сталі ВСтЗсп5+10Х13 на експлуатаційні властивості контракції. Доведен аналіз зрівнювальних характеристик експлуатаційних властивостей різних біметалевих зварних з'єднань. Приведені розрахунки дозволять прогнозувати період працездатності металеві конструкції до періоду виходу з ладу.

Ключові слова: зварювання біметалів, остатовні напруження, плакуючий шар.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь
² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь