



УДК 621.721.052:539.4.014.001

РОЛЬ УМЕНЬШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОКОВКЕ В ПОВЫШЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

П. П. МИХЕЕВ, д-р техн. наук, О. В. ВОЙТЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Сопоставлены экспериментальные значения коэффициентов концентрации напряжений (ККН), определенные поляризационно-оптическим методом, с расчетными, полученные на основе замеров параметров угловых швов тавровых сварных соединений, в исходном состоянии и после высокочастотной проковки. Показана взаимосвязь между снижением ККН под воздействием высокочастотной проковки и повышением сопротивления усталости сварных соединений.

Ключевые слова: сварное соединение, угловой шов, геометрические параметры шва, коэффициент концентрации напряжений, расчетные методы, поляризационно-оптический метод, высокочастотная проковка, повышение сопротивления усталости

Среди известных способов повышения сопротивления усталости сварных соединений с помощью поверхностно-пластического деформирования металла околошовной зоны наиболее эффективным является способ высокочастотной проковки [1, 2]. Он разработан сотрудниками ГНПП «Квант» (г. Северодвинск, Россия) и ИЭС им. Е. О. Патона [3]. В случае сварных соединений с не снятой выпуклостью швов и узлов сложной формы для высокочастотной проковки используется компактный ручной ультразвуковой инструмент с многоэлементным рабочим органом [4]. В качестве источника питания инструмента с магнитоотрицательным преобразователем применяют ультразвуковое тиристорное генераторное устройство с выходной мощностью до 1,2 кВт [4].

Положительное воздействие высокочастотной проковки на сопротивление усталости сварных соединений достигается за счет уменьшения концентрации напряжений, наведения сжимающих остаточных напряжений в зоне концентратора и деформационного упрочнения металла околошовной зоны [5, 6].

Целью настоящей работы является исследование изменения концентрации напряжений в сварном соединении под воздействием высокочастотной проковки и оценка роли этого фактора в повышении сопротивления усталости соединения.

Геометрические параметры соединения (рис. 1), необходимые для определения коэффициентов концентрации напряжений (ККН), устанавливали расчетным методом. При этом использовали образцы с поперечными угловыми швами, изготовленные из высокопрочной стали для усталостных испытаний

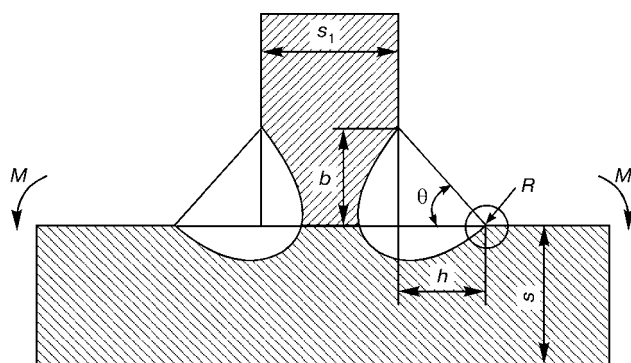


Рис. 1. Геометрические параметры углового шва сварного таврового соединения (M – момент приложенной нагрузки; s, s_1 – толщина соответственно свариваемой и привариваемой пластины; b, h – катеты углового шва)

(рис. 2). Высокочастотную проковку переходной зоны от шва к основному металлу выполняли по одному из технологических вариантов, обеспечивающему значительное повышение сопротивления усталости сварного соединения. При определении радиуса R перехода металла шва к основному металлу и угла θ использовали метод профилометрирования [7]. Для каждого образца строили по три профильные линии локальной геометрии углового шва.

Расчетное определение ККН в соединениях в исходном состоянии, прошедших высокочастотную проковку, проводили по соотношению (1) из [8]

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\left(-0,9\theta\sqrt{\frac{s}{2h} + 1}\right)}{1 - \exp\left(-0,45\pi\sqrt{\frac{s}{2h} + 1}\right)} \times \left[\frac{\left(\frac{2h}{s}\right)^{1/4}}{1 - \frac{R}{s}} \right] \left[\frac{0,13 + 0,65\left(1 - \frac{R}{s}\right)^4}{\left(\frac{R}{s}\right)^{1/3}} \right] \quad (1)$$

Это обеспечивает получение наиболее достоверных значений ККН с учетом установленных относительных радиусов сопряжения R/s , углов перехода θ и относительных катетов h/s углового шва (рис. 1).

С целью сопоставления ККН определяли также экспериментальным поляризационно-оптическим методом на моделях, которые воспроизводят форму сварного соединения. Модели сварного соединения изготавливали из эпоксидной смолы ЭД6-М. Идентичность моделей и исследованных сварных соединений проверяли сопоставлением их конфигураций при двадцатикратном увеличении с помощью спектрального проектора ПС-18. При моделировании сварных соединений выполнялись условия геометрического подобия и работы материала соеди-

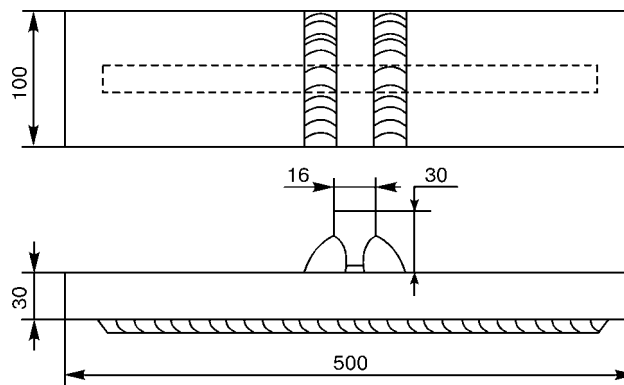


Рис. 2. Сварной образец из высокопрочной стали для усталостных испытаний

© П. П. Михеев, О. В. Войтенко, 2001

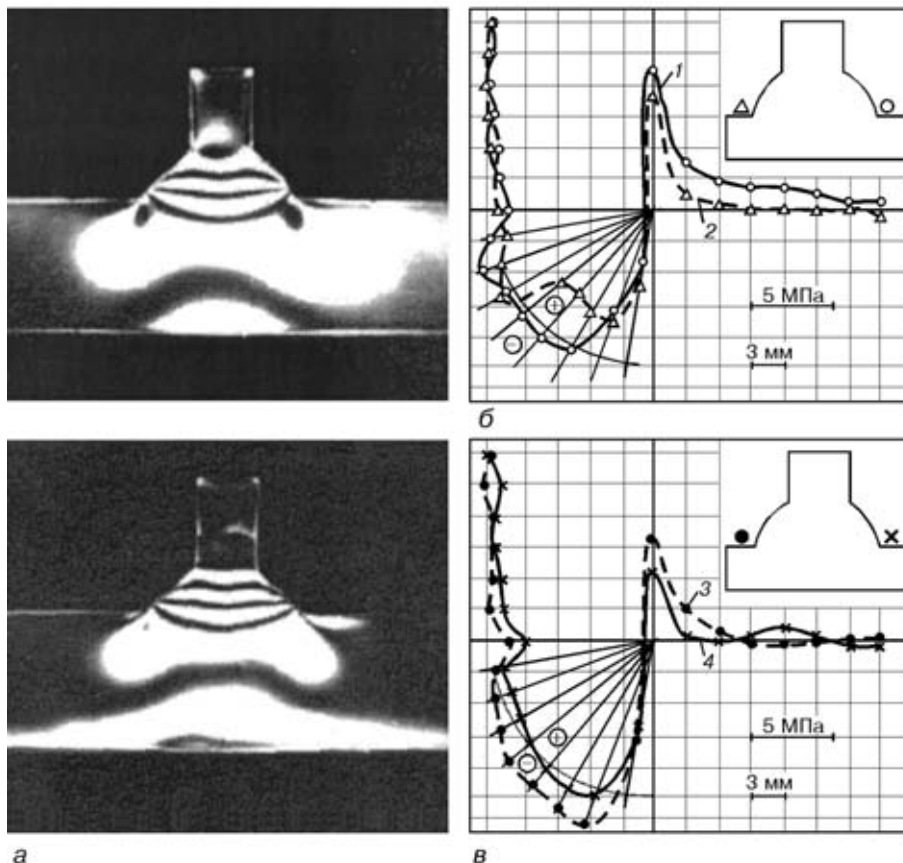


Рис. 3. Картины изохромных линий (а) и схемы распределения напряжений в околошовной зоне таврового соединения, полученных на моделях из оптически активного материала, в исходном состоянии (б) и после высокочастотной проковки (в): 1 — $K_t = 2,0$; 2, 3 — 1,8; 4 — 1,6

Состояние образца	Коэффициент концентрации напряжений	
	расчетный	экспериментальный*
Исходное	2,3	$\frac{2,0 \dots 1,8}{1,9}$
После высокочастотной проковки	1,8	$\frac{1,8 \dots 1,6}{1,7}$

* В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе — среднее значение.

нения под воздействием напряжений. Исследовали напряженное состояние моделей на поляризационных установках «Мерорта» и КСП-5. Коэффициенты концентрации напряжений определяли в местах перехода швов к основному металлу, измеряя с помощью координатно-синхронного поляриметра КСП-5 оптическую разницу хода лучей. Полученные картины изохромных линий и распределение напряжений в околошовной зоне сварного соединения моделей с угловыми швами показаны на рис. 3.

Усредненные значения ККН, определенные расчетным и экспериментальными методами для сварного соединения с поперечными угловыми швами, приведены в таблице.

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений ККН показало, что расхождение между ними незначительное. Под влиянием высокочастотной проковки ККН в сварном соединении с поперечными угловыми швами уменьшился от 2,3...1,9 до 1,8...1,7.

Результаты исследований [9] свидетельствуют, что такое снижение значений ККН приводит при прочих равных условиях к повышению предела выносливости соединений в случае симметричного цикла нагружения на 12...25%. В то же время установленное при испытании образцов повышение предела выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов испытаний под влиянием высокочастотной проковки достигает по данным [4] 200% (рис. 4).

Следовательно, снижение концентрации действующих напряжений при высокочастотной проковке, скорее всего, не является преобладающим фактором в повышении сопротивления

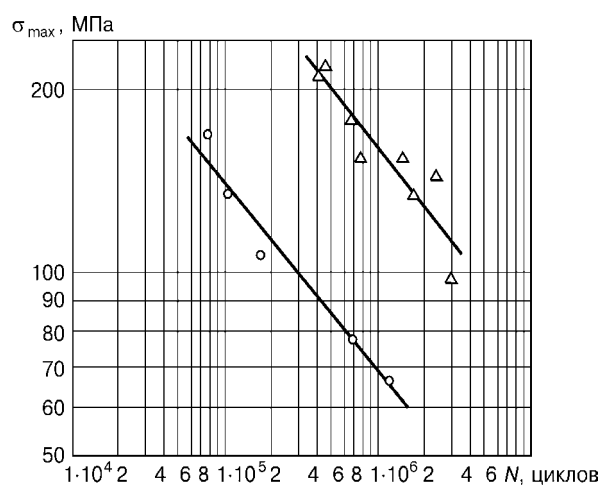


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний при трехточечном изгибе тавровых соединений высокопрочной стали (коэффициент асимметрии цикла нагружений $R_\sigma = -1$): O — в исходном состоянии; Δ — после высокочастотной проковки

усталости соединений. Установленное повышение предела выносливости сварных соединений вследствие высокочастотной проковки, по всей вероятности, объясняется снижением растягивающих и созданием в поверхностном слое металла околошовной зоны благоприятных остаточных напряжений сжатия, а также наличием эффекта наклепа (деформационного упрочнения).

1. Труфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
2. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods / E. S. Statnikov, V. O. Mukteparel, V. I. Trufyakov et al. — S. l., [2000]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1817-00).



3. *Эффективность* применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений // П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 4–8.
4. *Specification for weld toe improvement by ultrasonic impact treatment* / E. S. Statnikov, V. I. Trufiyakov, P. P. Mikheev, Yu. F. Kudryavtsev. — S. l., [1996]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1617–96).
5. *Михеев П. П.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Пробл. сварки и спец. электрометаллург.: Сб. науч. тр. / Под. ред. В. К. Лебедева. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
6. *Trufiyakov V. I., Mikheev P. P., Kudryavtsev Yu. F.* Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and strengthening treatments // Welding and Surf. Rev. — 1995. — Vol. 3, part 2. — P. 100.
7. *Астис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1985. — 256 с.
8. *Махиенко В. И., Мосенкис Р. Ю.* Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–18.
9. *Прочность* сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 255 с.

Compared are the experimental values of stress concentration factors (SCF) determined by the polarization-optical method with the calculated ones obtained by measuring parameters of fillet welds of T-joints in the as-welded state and after high-frequency peening. Shown is the relationship between a decrease in SCF under the effect of high-frequency peening and increase in fatigue resistance of welded joints.

Поступила в редакцию 17.05.2001,
в окончательном варианте 21.06.2001

УДК 621.791.753

РОБАСТНЫЙ ЦИФРОВОЙ СЕНСОР ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена модификация цифрового дугового сенсора, предназначенного для текущей оценки отклонения электрода от осевой линии свариваемого соединения. За счет введения дополнительного цифрового блока существенно снижается чувствительность сенсора к некоторым параметрическим возмущениям сварочного процесса.

Ключевые слова: дуговая сварка, боковое отклонение горелки, цифровой дуговой сенсор, параметрическая неопределенность, работоспособность

При оценке бокового отклонения электрода от осевой линии свариваемого соединения на основе измерения сварочного тока, используя так называемый дуговой сенсор (Arc Sensor) [1], обычно предполагается, что параметры сварочного процесса известны с достаточной точностью и практически не изменяются в течение дуговой сварки. На самом же деле, некоторые параметры известны не точно и, кроме того, значения их в процессе сварки изменяются непредсказуемо. Поэтому оценка бокового отклонения, полученная в условиях параметрической неопределенности, не гарантирует необходимую точность, что существенно затрудняет решение последующей задачи — коррекции движения сварочной горелки на основе данной оценки.

В работе [2] предложен эффективный способ оценки бокового отклонения электрода, обладающий низкой чувствительностью к изменениям неконтролируемых параметров. В частности, предлагается оценку бокового отклонения ϵ_n , получаемую по результатам измерения отклонений δ_R и δ_L сварочного тока от его номинального значения соответственно в правой и левой крайних точках колебаний сварочной горелки, находить не по известной формуле [3]

$$\hat{\epsilon}_n = (\delta_R - \delta_L) \frac{M}{4av_n}, \quad (1)$$

а используя соотношение

$$\hat{\epsilon}_n = \frac{\delta_R - \delta_L}{\delta_R + \delta_L} (A - v_n T_c). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) v_n — скорость поперечного движения горелки; M — крутизна характеристики плавления электрода; A — амплитуда поперечных колебаний горелки; T_c — постоянная времени, определяемая по формуле $T_c = R/EM$,

© Г. А. Цыбулькин, 2001

где E — напряженность электрического поля в столбе дуги; R — общее активное сопротивление сварочного контура; a — параметр, определяющий форму кривой $F(n) = a(n - p)^2 + q$ ($q > 0$), с помощью которой обычно аппроксимируют линию, образовавшуюся при пересечении свободной поверхности сварочной ванны с плоскостью, проходящей через продольную ось электрода и перпендикулярной осевой линии свариваемого углового соединения (рис. 1). Параметр p , определяющий форму и положение кривой $F(n)$, и величина ϵ_n связаны соотношением $p = A - \epsilon_n$.

Рассматривая выражения (1) и (2), нетрудно заметить, что оценка (2) в отличие от (1) совершенно не зависит от параметра a , который вследствие нестационарного движения свободной поверхности жидкой ванны в процессе сварки подвержен неконтролируемым изменениям и практически не под-

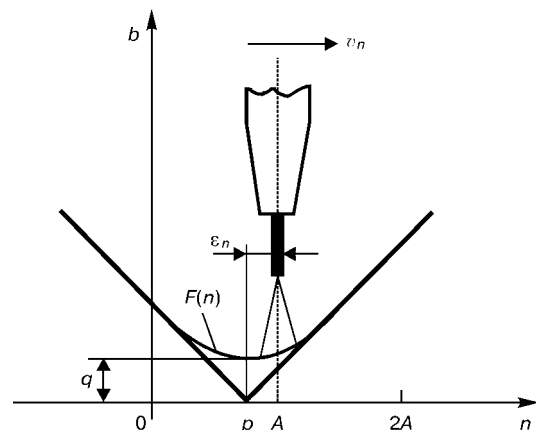


Рис. 1. Схема движения горелки поперек линии свариваемого соединения