

Метод оценки предела выносливости сварных соединений разной толщины после высокочастотной механической проковки

В. А. Дегтярев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Предложен метод определения предела выносливости стыковых сварных соединений малоуглеродистой стали разной толщины, базирующийся на экспериментальных данных измерения глубины пластически деформированного слоя или канавки, образуемых после высокочастотной механической проковки, с учетом влияния неоднородного напряженного состояния.

Ключевые слова: высокочастотная механическая проковка, предел выносливости, глубина канавки, градиент напряжений, сварное соединение, пластически деформированный слой.

Введение. В связи с возрастающим интересом к новым технологическим методам повышения сопротивления усталости металлоконструкций появилось много работ, посвященных высокочастотной механической проковке (ВМП), обладающей высокой эффективностью упрочнения разных типов сварных соединений при малой трудоемкости [1, 2 и др]. Несмотря на установленные преимущества ВМП по сравнению с известными способами, предпринимаются попытки поиска критерия ее эффективности. Вместо скорости перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва [3] предлагается использовать метод повышения пределов выносливости сварных соединений и их долговечности по геометрическим параметрам упрочненной зоны, оцениваемой как глубиной канавки [4], образующейся после проковки линии сплавления шва с основным металлом, так и глубиной пластически деформированного слоя [5]. Учитывая, что исследования [4, 5] проводились на образцах одной толщины, остается неясным, какой должна быть глубина канавки или пластически деформированного слоя в сварных соединениях разного поперечного сечения при одинаковом повышении пределов выносливости. Кроме того, решение поставленной задачи осложняется наличием градиента напряжений, так как в [6–8 и др.] показано, что сопротивление усталости материалов и сплавов при изгибе может на 35...50% превышать таковое при осевом растяжении. Поскольку существующие теории, объясняющие причины такого различия [9–11], предполагают сложный учет параметров и продолжительные экспериментальные исследования, будем использовать эмпирический метод аналитического описания зависимостей между пределом выносливости и изменением неоднородного напряженного состояния.

Цель настоящей работы заключается в разработке метода определения предела выносливости стыковых сварных соединений малоуглеродистой стали разной толщины по глубине пластически деформированного слоя или канавки, возникших вследствие ВМП, с учетом влияния неоднородного напряженного состояния.

Объект исследований и используемое оборудование. В качестве объекта исследований служило стыковое сварное соединение из листовой малоуглеродистой стали Ст. 3сп толщиной 14 мм, выполненное полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Предварительно сваренная встык пластина разрезалась на образцы размером 40×400×14 мм с поперечным швом, что позволяет существенно снизить возникающие после сварки остаточные напряжения растяжения. Затем образцы подвергались ВМП вдоль линии сплавления шва с основным металлом посредством ультразвукового инструмента USP-300 [12] с частотой колебаний 22 кГц. В результате

образуется канавка шириной 3–3,5 мм и глубиной h , зависящей от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль шва V .

Рассматривались эффекты градиента напряжений и деформационного упрочнения поверхностного слоя металла с учетом экспериментальных данных измерений его микротвердости. Доля влияния коэффициента концентрации напряжений, обусловленная геометрическими параметрами канавки, в общей совокупности всех факторов, повышающих сопротивление усталости, составляет около 14% [13]. Влиянию технологических остаточных напряжений, возникших при ВМП, будут посвящены последующие исследования.

Испытания образцов на усталость проводились при отнулевом цикле гармонического нагружения в условиях плоского изгиба [14] с частотой нагружения 20 Гц. За критерий разрушения образцов принималось образование предельной длины трещины на поверхности размером 10 мм, что соответствует ее докритической глубине 2,5 мм [15].

Результаты исследований и их анализ. Ранее [5] проведенные исследования позволили установить зависимость повышения предела выносливости сварных соединений от глубины пластически деформированного (упрочненного) слоя материала l_y и h (табл. 1). В [15] также рассматривалось влияние каждого параметра обработки в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента a . Следует отметить, что указанные закономерности были получены при испытаниях образцов толщиной $s = 14$ мм. В [16] показано, что при одинаковой глубине l_y эффект упрочнения, выражающийся в повышении предела выносливости, с увеличением сечения детали уменьшается. Для образцов разной толщины он оказывается одинаковым, если относительная глубина упрочненного слоя также одинакова [17]. В этом случае уравнение для расчетного определения l_{yi} в образце толщиной s_i будет иметь вид

$$l_{yi} = \frac{l_{y1}s_i}{s_1}. \quad (1)$$

При более тщательном анализе можно убедиться, что выражение (1) будет иметь несколько иной вид. Рассматривая подобие двух пар треугольников BKC и OAC , а также FND и AO_1F (рис. 1), можно записать:

$$\frac{\Delta\sigma_{Rsl}}{\sigma_{Rsl} + \Delta\sigma_{Rsl}} = \frac{l_{y1}}{s_1/2}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\sigma_{Rsi}}{\sigma_{Rsi} + \Delta\sigma_{Rsi}} = \frac{l_{yi}}{s_i/2}, \quad (3)$$

где σ_{Rsl} , σ_{Rsi} , $\Delta\sigma_{Rsl}$, $\Delta\sigma_{Rsi}$ – пределы выносливости в исходном состоянии и их повышение после упрочнения при толщине образцов s_1 и s_i соответственно.

При условии, что $NF = BC$, т.е. $\Delta\sigma_{Rsl} = \Delta\sigma_{Rsi}$, а также записав, что $\xi = \sigma_{Rsl}/\sigma_{Rsi}$, выражение (3) можно представить в виде

$$\frac{\Delta\sigma_{Rsl}}{\sigma_{Rsl}/\xi + \Delta\sigma_{Rsl}} = \frac{2l_{yi}}{s_i}. \quad (4)$$

Решив (2) относительно $\Delta\sigma_{Rsl}$ и подставив результат в (4), получим выражение для определения глубины упрочненного слоя в образце другой толщины при условии

Т а б л и ц а 1

Зависимость предела выносливости стыковых соединений от глубины упрочненного слоя и канавки, полученных при разных комбинациях скорости ВМП и амплитуды колебаний рабочего инструмента

V , м/мин, при a , мкм		h , мм	l_y , мм	σ_0 , МПа
19	26			
0,400	0,400	0,041	0,39	251
0,110	0,240	0,062	0,58	278
0,075	0,125	0,100	0,95	325
0,060	0,090	0,143	1,35	379

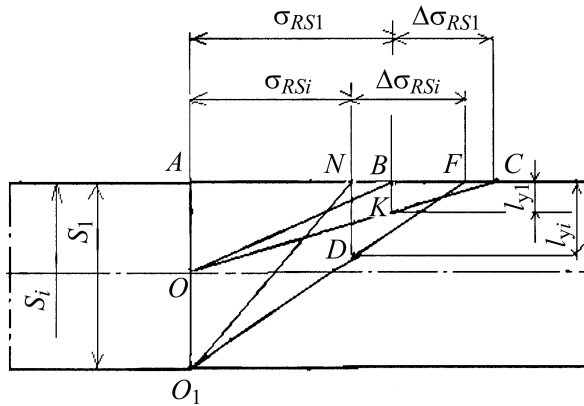


Рис. 1. Схема влияния глубины пластически деформированного слоя на предел выносливости сварного соединения.

одинакового эффекта упрочнения, которое после некоторых преобразований имеет вид

$$l_{yi} = \frac{\xi l_{y1} s_i}{s_1 - 2l_{y1}(1 - \xi)}, \tag{5}$$

где неизвестной величиной является коэффициент ξ , который нетрудно определить на примере испытаний стыковых сварных соединений из стали Ст. 3сп толщиной 14 мм.

Следует отметить, что анализируемые зависимости справедливы для обоснования повышения предела выносливости не выше коэффициента асимметрии цикла напряжений $R = 0$. Тем самым удалось избежать неупругих деформаций на уровне предела выносливости и позволило рассчитывать напряжения по формулам теории упругости [18, 19]. Экспериментально установленное значение предела выносливости ($\sigma_0 = 200$ МПа) образцов в исходном состоянии [4] на базе $N = 2 \cdot 10^6$ цикл нагружений дает возможность определить максимальный градиент напряжений 28,6 МПа/мм на поверхности образца:

$$\eta = \frac{\sigma_0}{s/2}. \tag{6}$$

Поскольку в [15] было показано, что для подобного типа сварных соединений малоуглеродистой стали такой же толщины и асимметрии нагружения пределы вы-

носливости, определенные на базе $2 \cdot 10^6$ цикл в условиях однородного и неоднородного напряженного состояния, различаются на 37%, получена возможность без дополнительных экспериментальных исследований определить предел выносливости при растяжении, $\sigma_{0p} = 200/1,37 = 146$ МПа. Анализ литературных данных [15, 20] свидетельствует о линейном повышении пределов выносливости стыковых сварных соединений с увеличением градиента напряжений. Это позволяет установить зависимость предела выносливости от градиента напряжений в виде

$$\sigma_{0i} = \sigma_{0p} + b\eta_i, \quad (7)$$

где b – коэффициент, после расчетов $b = 1,89$ мм.

С помощью представленной зависимости можно достаточно просто определять пределы выносливости сварного соединения, зная текущее значение градиента напряжений. Подставив (7) в (6), определим толщину образца:

$$s_i = 2b + 2\sigma_{0p}/\eta_i. \quad (8)$$

Решив (8) относительно σ_{0p} и подставив результат в (7), после некоторых преобразований получим выражение для определения ξ :

$$\xi = \frac{s_1\eta_1}{s_i\eta_i}. \quad (9)$$

При известных σ_{0s_1} и η_1 , например, для образцов толщиной 14 мм выражение для определения предела выносливости образцов другой толщины будет иметь вид

$$\sigma_{0s_i} = \frac{\sigma_{0s_1}s_i\eta_i}{s_1\eta_1}. \quad (10)$$

Расчетные значения толщины образцов и соответствующие им пределы выносливости в исходном состоянии, полученные при разных градиентах напряжений, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Толщина образцов s и предел выносливости σ_0 при разных η

η , МПа/мм	s , мм	σ_0 , МПа
10,0	33,0	165
15,0	23,0	174
20,0	18,5	184
28,6	14,0	200

Пользуясь данными экспериментальных исследований о линейном повышении предела выносливости стыковых сварных соединений из стали Ст. 3сп толщиной 14 мм в зависимости от глубины упрочненного слоя [5], в табл. 3 представлены расчетные значения l_y для образцов разной толщины при условии одинакового эффекта упрочнения, а на рис. 2 – зависимости повышения предела выносливости от глубины упрочненного слоя при разной толщине сварных соединений.

**Глубина упрочненного слоя и канавки в стыковых сварных соединениях
разной толщины при одинаковом повышении предела выносливости**

Повышение предела выносливости $\Delta\sigma_0$, МПа	$s_1 = 14$ мм при		$s_2 = 18,5$ мм при		$s_3 = 23$ мм при		$s_4 = 33$ мм при	
	l_{y1} , мм	h_1 , мм	l_{y2} , мм	h_2 , мм	l_{y3} , мм	h_3 , мм	l_{y4} , мм	h_4 , мм
50	0,39	0,041	0,55	0,058	0,74	0,078	1,106	0,111
80	0,58	0,062	0,82	0,088	1,09	0,117	1,623	0,173
125	0,95	0,100	1,34	0,141	1,77	0,186	2,630	0,277
180	1,32	0,143	1,86	0,202	2,45	0,264	3,615	0,392

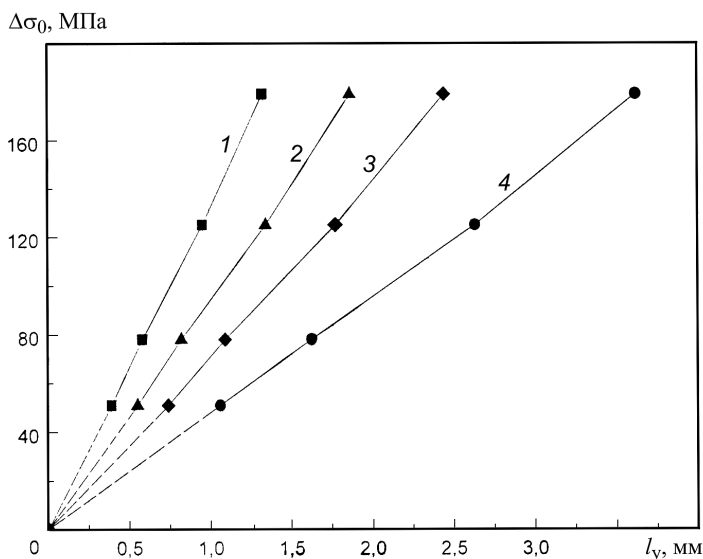


Рис. 2. Зависимость повышения предела выносливости стыковых сварных соединений разной толщины от глубины пластически деформированного слоя: 1 – $s = 14$ мм; 2 – $s = 18,5$ мм; 3 – $s = 23$ мм; 4 – $s = 33$ мм.

Видно, что при одинаковом повышении предела выносливости с увеличением толщины образцов глубина упрочненного слоя должна возрастать: чем больше предел выносливости, тем больше разница в глубине упрочненного слоя. Например, при увеличении толщины образцов до 33 мм глубина упрочненного слоя при условии повышения предела выносливости на 50 и 180 МПа возрастает на 0,72 и 2,3 мм соответственно.

Учитывая, что прямые 1–4 на рис. 2 выходят из начала координат, так как при $l_y = 0$ упрочнение отсутствует, уравнение для каждой из них в общем виде можно записать как

$$\Delta\sigma_{0s_i} = \beta_i l_{yi}, \quad (11)$$

где β_i – коэффициент пропорциональности, имеющий свое значение для каждой кривой.

Установив зависимость исходных значений предела выносливости σ_0 сварных соединений от их толщины s (на рис. 3 кривая 1), с использованием данных табл. 2

можно определить пределы выносливости упрочненных образцов при текущей глубине упрочненного слоя l_{yi} :

$$\sigma_0^y = \sigma_0 + \beta_i l_{yi}, \quad (12)$$

где β_i изменяется от $1,26 \cdot 10^2$ до $0,49 \cdot 10^2$ МПа/мм при толщине образцов от 14 до 33 мм соответственно (кривая 2).

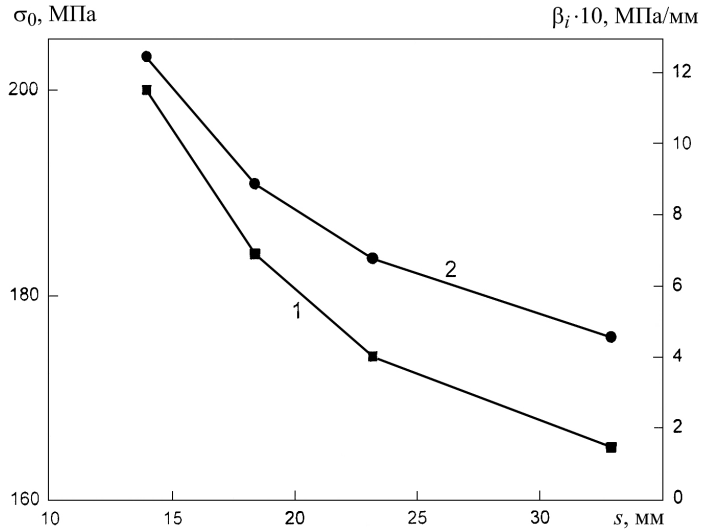


Рис. 3. Зависимость исходного значения предела выносливости (1) и коэффициента пропорциональности (2) от толщины стыковых сварных соединений.

Поскольку измерение величины l_y связано с трудностями и наличием соответствующего оборудования, повышение пределов выносливости для разных толщин образцов можно определить по глубине канавки, как более легко измеряемому параметру. С этой целью после разных скоростей ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 мкм определялись глубина упрочненного слоя и глубина канавки [5] (рис. 4).

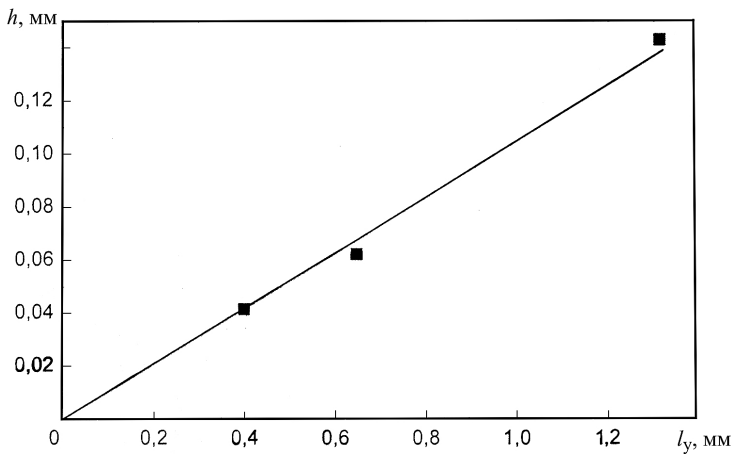


Рис. 4. Зависимость глубины канавки h от глубины упрочненного слоя l_y (точки — экспериментальные данные).

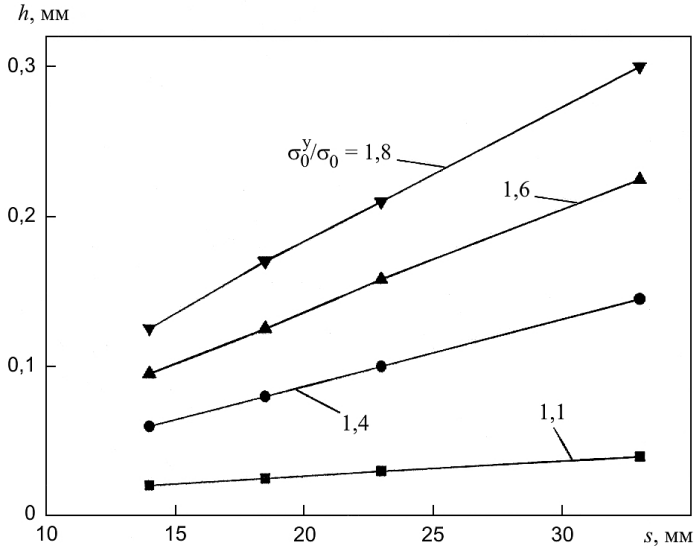


Рис. 5. Зависимость глубины канавки от толщины стыковых сварных соединений при заданном относительном повышении предела выносливости.

Установлено, что зависимость между h и l_y имеет линейный характер с коэффициентом пропорциональности $k = h/l_y = 0,106$. В этом случае выражение (11) будет иметь вид

$$\Delta\sigma_{0s_i} = \beta_i \frac{h_i}{k}. \quad (13)$$

Исходя из условия одинакового повышения пределов выносливости сварных соединений разной толщины можно записать

$$\beta_1 \frac{h_1}{k} = \beta_i \frac{h_i}{k}. \quad (14)$$

В этом случае глубина канавки в образцах другой толщины определяется как

$$h_i = \frac{\beta_1}{\beta_i} h_1, \quad (15)$$

или

$$h_i = \frac{l_{yi}}{l_{y1}} h_1, \quad (16)$$

а с учетом (5) –

$$h_i = \frac{\xi s_i}{s_1 - 2l_{y1}(1 - \xi)} h_1. \quad (17)$$

На рис. 5 представлена зависимость глубины канавки от толщины стыковых сварных соединений при заданной величине относительного повышения предела выносливости. Чтобы добиться одинакового повышения пределов выносливости сварных соединений с большей толщиной, глубину канавки в них следует увели-

чивать. Кроме того, чем больше повышение предела выносливости, тем больше степень увеличения глубины канавки. В этом случае пределы выносливости упрочненных образцов при текущей глубине канавки h_i можно определить как

$$\sigma_0^y = \sigma_0 + \beta_i \frac{h_i}{k}. \quad (18)$$

Полученные результаты позволяют более обоснованно подходить к выбору оптимальной глубины канавки в образцах разной толщины без проведения трудоемких и продолжительных во времени испытаний. Их также можно рассматривать в качестве экспресс-метода расчета сопротивления усталости упрочненных сварных соединений разной толщины по глубине пластически деформированного слоя или канавки при отсутствии возможности проведения прямых экспериментальных исследований.

Выводы

1. Предложен метод расчета предела выносливости стыковых сварных соединений разной толщины по глубине пластически деформированного слоя или канавки, образуемых после ВМП, с учетом влияния неоднородного напряженного состояния.

2. Путем расчета установлена глубина пластически деформированного слоя или канавки в стыковых сварных соединениях разной толщины при условии одинакового повышения их предела выносливости.

Резюме

Запропоновано метод визначення границі витривалості стикових зварних з'єднань маловуглецевої сталі різної товщини, який базується на експериментальних даних вимірювань глибини пластично деформованого шару чи канавки, що утворюються після високочастотної механічної проковки, з урахуванням впливу неоднорідного напруженого стану.

1. Zhao X., Wang D., and Huo L. Analysis of the $S-N$ curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment // Mater. Design. – 2011. – **32**. – P. 88–96.
2. Abdulah A., Malaki M., and Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening // Ibid. – 2012. – **38**. – P. 7–18.
3. Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Кныш В. В. и др. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
4. Дегтярев В. А. Оценка влияния режимов высокочастотной механической проковки сварных соединений на их сопротивление усталости // Пробл. прочности. – 2011. – № 2. – С. 61–70.
5. Дегтярев В. А., Гонкало Е. Е. Влияния режимов высокочастотной механической проковки на повышение сопротивления усталости стыковых сварных соединений // Там же. – 2014. – № 6. – С. 71–80.
6. Серенсен С. В. Усталость материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 2. – 256 с.
7. Форрест П. Усталость металлов / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.

8. Троценко В. Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщ. 1. Методы оценки напряженного состояния и результаты исследования // Пробл. прочности. – 2010. – № 2. – С. 5–24.
9. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
10. Хэйвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
11. Weibull W. The phenomenon of rupture in solid // Proc. Roy. Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – No. 153. – P. 1–55.
12. Пат. 47536 Україна. Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, О. В. Козлов, Ю. Ф. Кудрявцев та ін. – Чинний з 15.07.2002.
13. Кирьян В. И., Кныш В. В. Высокочастотная механическая проковка сварных соединений металлоконструкций // Автомат. сварка. – 2008. – № 11. – С. 36–41.
14. Дегтярев В. А. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности. – 1982. – № 10. – С. 110–113.
15. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 213 с.
16. Кудрявцев И. В., Саверин М. М., Рябченков А. В. Методы поверхностного упрочнения деталей машин. – М.: Машгиз, 1949. – 222 с.
17. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
18. Троценко В. Т., Хамаза Л. А. Исследование влияния циклических неупругих деформаций на предел выносливости металлов при изгибе // Пробл. прочности. – 1976. – № 4. – С. 3–9.
19. Manson S. S. and Muralidharan U. Fatigue life prediction in bending from axial fatigue information // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1987. – 9, No. 5. – P. 357–372.
20. Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е. Усталость сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

Поступила 11. 03. 2015