

# МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКИ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.  
E-mail: degtyarev@ipp.kiev.ua

Исследовано влияние режимов высокочастотной механической проковки на повышение сопротивления усталости стыковых сварных соединений стали СтЗсп. Различная технология подготовки образцов для исследований позволила установить, что количественный вклад в повышение предела выносливости сварных соединений остаточных напряжений сжатия, деформационного упрочнения поверхностного слоя канавки, образующейся после проковки узкой зоны сплавления шва с основным металлом, и изменения концентрации напряжений после высокочастотной механической проковки составляет 57, 37 и 6 %, соответственно. Показано, что между глубиной канавки и глубиной пластически деформированного слоя материала имеется корреляция. Предложена методика определения пределов выносливости стыковых сварных соединений после разных режимов проковки по глубине канавки и пластически деформированного слоя материала, используя экспериментальные данные измерения микротвердости, а также в исследованном диапазоне изменения амплитуды колебаний рабочего инструмента. Установлена глубина канавки в зависимости от скорости высокочастотной механической проковки и амплитуды колебаний рабочего инструмента, а также изменение предела выносливости образцов после разной технологии их изготовления. Показано, что при увеличении скорости проковки независимо от амплитуды колебаний рабочего инструмента эффективность повышения сопротивления усталости сварных соединений уменьшается, а при скорости 0,4 м/мин предел выносливости от деформационного упрочнения и совокупного влияния всех факторов, свойственных высокочастотной механической проковке, повышается на 11 и 26 %, соответственно. Библиогр. 14, табл. 3, рис. 7.

*Ключевые слова:* сварное соединение, предел выносливости, глубина канавки, скорость высокочастотной механической проковки, пластически деформированный слой, микротвердость

При интенсивном развитии технологических методов повышения сопротивления усталости сварных металлоконструкций и продления срока их службы большое внимание уделяется высокочастотной механической проковке (ВМП) [1–3]. Это связано с тем, что она способна обеспечить значительное повышение сопротивления усталости элементов металлоконструкций и их ресурс [4, 5] как при изготовлении, так и при проведении ремонтно-восстановительных работ. В качестве критерия контроля эффективности ВМП вместо скорости перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва [6, 7] предложено использовать глубину канавки [8], образующуюся после проковки узкой зоны сплавления сварного шва с основным металлом. Установлено значение оптимальной ее глубины, равное 0,14 мм, и предложены параметры скорости ВМП в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Однако до настоящего времени остается неисследованным влияние разных режимов проковки на сопротивление усталости сварных соединений. Поскольку проведение комплекса полномасштабных экспериментальных исследований достаточно дорогая про-

цедура, так как занимает продолжительное время и связана с большим расходом материала, то расчетная оценка сопротивления усталости стыковых сварных соединений при сопоставлении с отдельными экспериментальными данными представляется наиболее целесообразным решением задачи.

В связи с этим цель настоящей работы состоит в расчетной оценке влияния режимов ВМП на повышение предела выносливости стыковых сварных соединений по результатам измерения глубины канавки или глубины пластически деформированного слоя материала под дном канавки, используя экспериментальные данные измерения микротвердости.

**Оборудование, материалы и методика испытаний.** В качестве материала для исследований использовалось стыковое сварное соединение из листовой стали СтЗсп, выполненное полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Чтобы оценить влияние режимов ВМП сварных соединений и количественный вклад в повышение их сопротивления усталости деформационного упрочнения поверхностного слоя канавки, а также остаточных напряжений (ОН) использовал-

ся различным порядком подготовки образцов для исследований.

В первом случае отдельные участки сварной пластины размерами 1000×400 мм со стыковым швом подвергались ВМП вдоль линии сплавления шва с основным металлом посредством ультразвукового инструмента USP-300 [9] с частотой колебаний 22 кГц, деформирующий механизм которого представлял четырехбойковую головку со встроенными в нее стержнями диаметром 3 мм. Проковка осуществлялась при амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a$ , равной 19 мкм, и разной приведенной скоростью его перемещения  $V$  (скорость проковки), равной 0,232; 0,116 и 0,06 м/мин, соответственно, которую определяли как отношение длины обрабатываемого шва ко времени обработки. После ВМП образовывалась канавка, зависящая от скорости обработки, шириной 2,8...3,5 мм и глубиной  $h$ , равной 0,041; 0,062 и 0,143 мм, соответственно. Затем пластина разрезалась на образцы (серия 1) размером 40×400×14 мм с поперечным швом, длинная сторона которых совпадала с направлением прокатки. Это позволило существенным образом снизить имеющиеся после сварки и последующей ВМП пластины ОН.

Во втором случае пластина вначале разрезалась на образцы с теми же размерами (серия 2), а затем каждый образец индивидуально подвергался проковке со скоростью и амплитудой колебаний рабочего инструмента, аналогичными обработке образцов первой серии. После ВМП образовывалась канавка тех же размеров. В результате удалось создать и сохранить ОН сжатия. Таким образом, в образцах первой серии повышение предела выносливости сварных соединений обусловлено наличием упрочненного слоя и уменьшением коэффициента концентрации напряжений, а второй — дополнительным влиянием ОН сжатия.

Следует отметить, что комбинацией таких параметров, как временем обработки, позволяющего определить скорость при заданной ширине образца и амплитудой колебаний инструмента можно добиться одинаковой глубины канавки. В статье не исследовалась взаимосвязь глубины упрочненного слоя и параметров обработки при одинаковой глубине канавки, считая, что глубину пластически деформированного слоя отражают, в основном, микротвердость и глубина канавки, что подтверждают методические исследования оптимизации процесса упрочнения, проведенные в ИЭС [10].

Затем из каждой серии образцов, обработанных при разной скорости ВМП, вырезали по одному темплету размером 40×40×14 мм (рис. 1, а) для металлографических исследований.

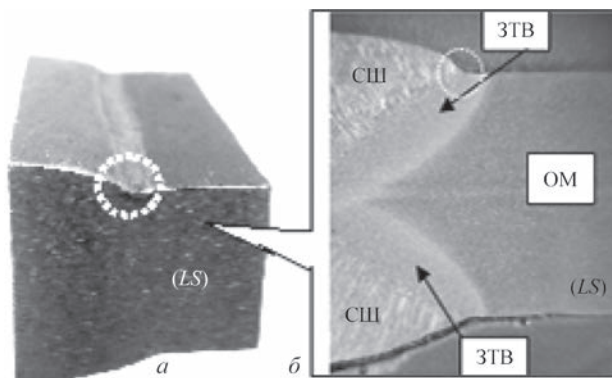


Рис. 1. Внешний вид темплета (а), поверхность шлифа после травления в плоскости  $LS$  поперечного сечения (б):  $L$  — направление проката;  $S$  — направление, перпендикулярное к плоскости проката; контуром выделен профиль канавки; СШ — сварной шов; ЗТВ — зона термического влияния; ОМ — основной металл

Металлографические исследования образцов выполняли на оптическом инвертированном микроскопе «AXIOVERT 40 MAT». Шлифы готовили на установке «BUENLER» в плоскости поперечного сечения ( $S-L$ ) сварного соединения перпендикулярно плоскости прокатки листа. Поверхность шлифа после травления в 4 %-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте показана на рис. 1, б. Измерение микротвердости выполняли на микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 [11] при нагрузке 1 Н.

**Анализ полученных результатов.** Известно, что в результате ВМП происходит деформационное упрочнение материала на некоторую глубину от поверхности канавки. Очевидно, разным режимам обработки будет соответствовать не только разная глубина канавки, но и разная глубина пластически деформированного слоя  $l_y$  (глубина упрочненного слоя), которую, с достаточной степенью точности, можно установить по изменению микротвердости  $H_{\mu}$ .

Измерение микротвердости проводили в поперечном сечении сварного соединения перпендикулярно направлению проковки параллельными рядами от поверхности дна канавки вглубь материала через равные интервалы как между рядами, так и вдоль каждого ряда по глубине до достижения стабильных значений микротвердости, что соответствует глубине упрочненного слоя материала  $l_y$ . Схема измерения микротвердости под канавкой показана на рис. 2, а. Микроструктура зоны термического влияния в области индентирования соответствует участку нормализации (ЗТВ-2) с однородной мелкозернистой ферритно-перлитной структурой (рис. 2, б). Кроме этого было установлено, что разным скоростям обработки соответствовала разная максимальная глубина упрочненного слоя. Следует также отметить, что в образцах первой и второй серий независимо от технологии их изготовления глубина канавки и упрочненно-

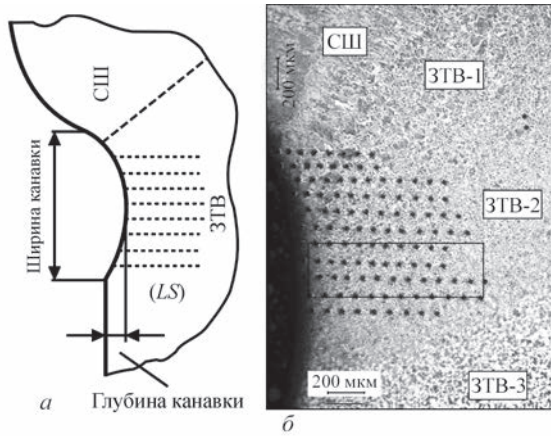


Таблица 1. Значения максимальной глубины упрочненного слоя и канавки в образцах первой и второй серий, полученные после разной скорости ВМП

Скорость ВМП, м/мин	Глубина упрочненного слоя $l_y$ , мм	Глубина канавки $h$ , мм		Погрешность, %
		эксперимент	расчет	
0,232	0,4	0,041	0,043	4,8
0,116	0,65	0,062	0,069	10,1
0,06	1,32	0,143	0,14	2,1

грешностью глубину канавки, задаваясь любыми произвольными значениями глубины упрочненного слоя (см. табл. 1).

Анализ влияния глубины упрочненного слоя на эффект упрочнения, выражающийся в повышении предела выносливости сварного соединения, выполнен на основании рис. 3, на котором отмечены экспериментально определенные пределы выносливости сварных стыковых соединений, в исходном состоянии ( $\sigma_R^u = 200$  МПа) [8] и при скорости ВМП, равной 0,06 м/мин в образцах первой ( $\sigma_R = 275$  МПа) и второй ( $\sigma_R = 375$  МПа) серий при амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a = 19$  мкм, а также соответствующие им значения глубины упрочненного слоя. Расчетная зависимость предела выносливости сварных соединений от текущей глубины упрочненного слоя  $l_i$  в этом случае имеет вид:

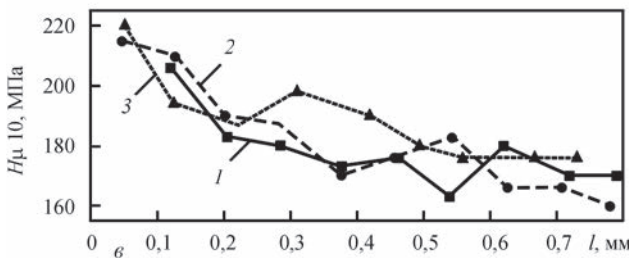


Рис. 2. Зона сварного соединения с упрочненным слоем в плоскости шлифа (LS) после воздействия ВМП со скоростью 0,116 м/мин: а, б — схема измерения микротвердости под канавкой и микроструктура с отпечатками, соответственно; в — изменение микротвердости  $H_{\mu}$  в зависимости от глубины  $l$  материала (ЗТВ-1, ЗТВ-2, ЗТВ-3 — участки крупного зерна, нормализации, неполной рекристаллизации, соответственно)

го слоя при сравнимых скоростях проковки практически одинаковы. Одинаковые значения упрочненного слоя можно объяснить еще и тем, что измерения проводились на боковой поверхности образца, где влияние ОН практически отсутствует. В качестве примера на рис. 2, в приведены результаты изменения микротвердости по глубине материала  $l$  после ВМП образца со скоростью 0,116 м/мин. Анализ зависимости ( $H_{\mu} - l$ ) показал, что в каждом из выбранных направлений наблюдается снижение микротвердости по мере удаления от поверхности вглубь материала. Как и следовало ожидать, максимальная глубина упрочненного слоя достигается по линии, совпадающей с максимальной глубиной канавки (кривая 1) с постепенным уменьшением по мере удаления от ее центра. Впоследствии при расчетах будет использоваться максимальное значение  $l_y$ . Следует также отметить, что значения микротвердости несколько снижаются с увеличением скорости ВМП. Результаты измерений  $h$  и  $l_y$  в образцах обеих серий, полученные после разных скоростей ВМП, приведены в табл. 1.

Установлено, что с уменьшением скорости проковки глубина упрочненного слоя и канавки увеличиваются с коэффициентом пропорциональности после обработки результатов методом наименьших квадратов, равным  $K = h/l_y = 0,106$ . Это дает возможность рассчитать с небольшой по-

$$\sigma_R^i = \sigma_R^u + Cl_i = \sigma_R^u + \frac{\sigma_R - \sigma_R^u}{l_y} l_i, \quad (1)$$

где  $C = \frac{\sigma_R - \sigma_R^u}{l_y}$  — коэффициент пропорциональности, имеющий свое значение для каждой серии образцов.

По известным значениям пределов выносливости сварных соединений и экспериментально установленной  $l_y = 1,32$  мм (см. табл.1) нашли, что для образцов первой серии  $C = 56,82$  МПа/мм, а вто-

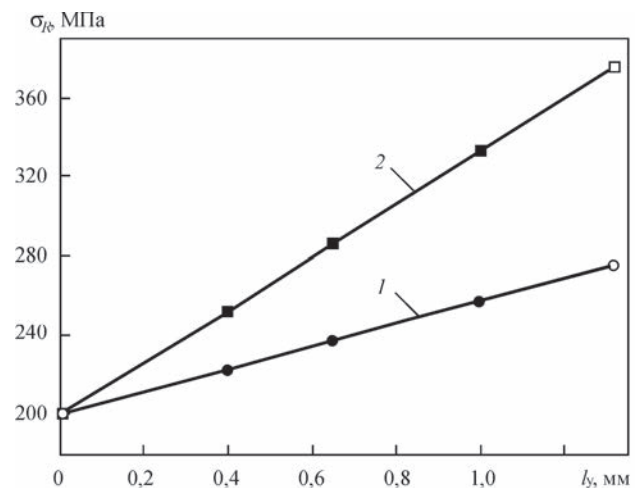


Рис. 3. Расчетная (темные точки) и экспериментальная (светлые точки) зависимость пределов выносливости упрочненных стыковых сварных соединений первой (1) и второй (2) серий от глубины пластически деформированного слоя

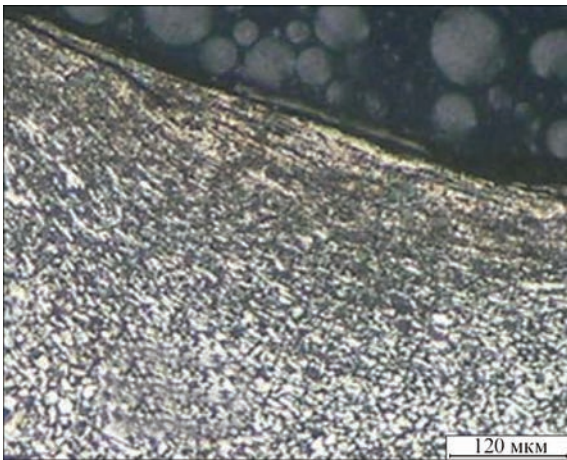


Рис. 4. Микроструктура упрочненного слоя под дном канавки в зоне сплавления сварного шва с основным металлом

рой — 132,6 МПа/мм. Предположение о пропорциональном повышении предела выносливости сварного соединения с увеличением глубины упрочненного слоя подтверждается имеющимися литературными данными [12]. Следует отметить, что полученная в работе максимальная глубина упрочненного слоя для образцов второй серии рассматривается в качестве предельной, так как дальнейшее ее увеличение, во-первых, может не сопровождаться упрочнением и увеличивается вероятность подслоного разрушения [12], а во-вторых, при больших напряжениях не удастся избежать накопления значительных циклических неупругих деформаций на уровне предела выносливости, что исключает применение формул теории упругости [13]. В данном случае предел выносливости, определенный при отнудевом цикле гармонического нагружения, рассматривается в качестве предельного напряжения.

Таким образом, предложенное выражение позволяет расчетным способом оценить предел выносливости стыкового сварного соединения (затемненные точки) как от деформационного упрочнения и изменения концентрации напряжений (прямая 1), так и от дополнительного влияния остаточных напряжений сжатия (прямая 2) при любой глубине упрочненного слоя, не проводя трудоемких и продолжительных во времени испытаний. Кроме этого, анализ полученных результатов свидетельствует о том, что повышение предела выносливости сварных образцов первой серии составило 38 % (прямая 1), а максимальное повышение предела выносливости образцов второй серии — 87 % (прямая 2). Нетрудно определить, что доля влияния ОН сжатия в повышении предела выносливости при скорости ВМП, равной 0,06 м/мин, составила 57 %, а при установленном в работе [14] снижении коэффициента концентрации напряжений после ВМП на 14 %, повышение предела выносливости за счет деформационного

упрочнения поверхностного слоя материала составило 37 %, уменьшения концентрации напряжений — 6 %. Однако доленое участие каждого фактора требует дополнительного экспериментального подтверждения. Следует отметить, что при деформационном упрочнении поверхностного слоя канавки происходит не только повышение физико-механических свойств материала, но, как показали проведенные металлографические исследования, формоизменение зерен в упрочненном слое под ее дном (рис. 4), глубина которого зависит от скорости проковки и визуально колеблется в пределах 200...250 мкм. Этот фактор также может оказать влияние на сопротивление усталости исследуемого материала. Однако чтобы выделить долю влияния в повышении сопротивления усталости образовавшейся после ВМП «волоконистой» структуры упрочненного слоя необходима постановка специального эксперимента. Таким образом, в абсолютном значении повышение предела выносливости стыковых сварных образцов за счет ОН сжатия, деформационного упрочнения и изменения концентрации напряжений составило 100, 65 и 10 МПа, соответственно. Учитывая небольшой вклад концентрации напряжений, можно отметить, что после ВМП повышение сопротивления усталости сварных соединений происходит в результате влияния ОН сжатия и деформационного упрочнения поверхностного слоя материала канавки.

Поскольку измерение  $l_y$  связано с определенными техническими сложностями, в том числе наличием необходимого оборудования, и учитывая имеющуюся линейную зависимость между  $h$  и  $l_y$ , повышение предела выносливости после разной скорости ВМП нетрудно рассчитать по глубине канавки как более легко контролируемому параметру. В этом случае коэффициент пропорциональности, с учетом ранее установленной зависимости ( $K = h/l_y$ ), определяется как  $K_1 = (\sigma_R - \sigma_R^u)K/h$ . Выражение для расчетного определения предела выносливости сварных соединений будет иметь вид:

$$\sigma_R^i = \sigma_R^u + \frac{(\sigma_R - \sigma_R^u)K}{h} \frac{h_i}{K} = \sigma_R^u + \frac{(\sigma_R - \sigma_R^u)}{h} h_i, \quad (2)$$

где  $h_i$  — текущее значение глубины канавки, полученной после разной скорости ВМП.

Расчетные значения  $\sigma_R^i$  для каждой серии образцов приведены в табл. 2. Нельзя не отметить хорошее совпадение с экспериментально полученными пределами выносливости. Следует отметить, что глубина канавки ( $h = 0,14$  мм), является для данной толщины проката оптимальной [8] и дальнейшее ее увеличение может не сопровождаться упрочнением.

Известно, что глубина канавки в значительной степени зависит от амплитуды ( $a$ ) колебаний рабо-

Таблица 2. Зависимость пределов выносливости стыковых соединений от глубины канавки и соответствующая им скорость ВМП при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента

Глубина упрочненного слоя $l_p$ , мм	Глубина канавки $h_p$ , мм	Предел выносливости, МПа		Скорость ВМП, м/мин	
		расчет	эксперимент	$a = 19$ мкм	$a = 26$ мкм
0,39	0,041	220*/250	-	0,4	0,4
0,58	0,062	233*/278	-	0,112	0,24
0,94	0,1	254*/325	-	0,075	0,125
1,35	0,143	27*/378	25*/375	0,06	0,09

\* — данные касаются образцов первой серии.

чего инструмента. Как показала практика, наиболее часто сварные элементы металлоконструкций обрабатываются при  $a$ , изменяющейся в пределах 19...26 мкм. В связи с этим, используя ранее полученные зависимости глубины канавки от скорости ВМП при амплитудах 19 и 26 мкм [8], на рис. 5 представлены графики, которые позволяют установить взаимосвязь между глубиной канавки и скоростью проковки при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента с одной стороны (рис. 5, а), а также пределами выносливости сварных соединений обеих серий (см. табл. 2) с другой (рис. 5, б), соответственно. Анализ представленных в таком виде результатов позволя-

ет сделать несколько выводов. Представляется возможность определять при заданной скорости проковки не только изменение глубины канавки в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента (рис. 5, а), но и изменение предела выносливости сварных соединений первой и второй серий (рис. 5, б). Из графиков (рис. 5, а) следует, что по мере увеличения скорости обработки не только уменьшается глубина канавки, но и влияние амплитуды колебаний рабочего инструмента на ее изменение становится менее заметным, так как кривые 1 и 2 сходятся. Это приводит к тому, что с одной стороны уменьшается сопротивление усталости образцов первой (кривая 1) и второй (кривая 2) серий (рис. 5, б), с другой, становится менее эффективным влияние амплитуды колебаний рабочего инструмента на его изменение. При  $V = 0,4$  м/мин  $h$  уже практически не зависит от  $a$ , что определяет в свою очередь одинаковые значения пределов выносливости сварных образцов, которые для образцов первой и второй серий равны 220 и 250 МПа, соответственно. Анализ результатов также показал, что с увеличением  $h$  прямые 1 и 2 (рис. 5, б) расходятся. Это свидетельствует о том, что место и порядок использования технологии упрочнения в технологическом цикле изготовления изделия имеет существенное значение.

Иногда при ремонтно-восстановительных работах в труднодоступных местах элементов конструкций не всегда возможно надежно определить глубину канавки, а легче фиксировать скорость проковки. В связи с этим на рис. 6 приведены зависимости пределов выносливости сварных соединений обеих серий от скорости проковки, определенные при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 и 26 мкм, соответственно. Из анализа полученных результатов видно, что для каждой серии с увеличением  $V$  происходит не только снижение пределов выносливости, но и уменьшение разницы между ними. Как следует из рисунка, при  $V = 0,4$  м/мин эффективность повышения сопротивления усталости сварного соединения только от деформационного упрочнения (прямые 1, 2) или от совместного действия перечисленных факторов (прямые 3, 4) практически не зависит от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Пределы выносливости имеют одинаковые

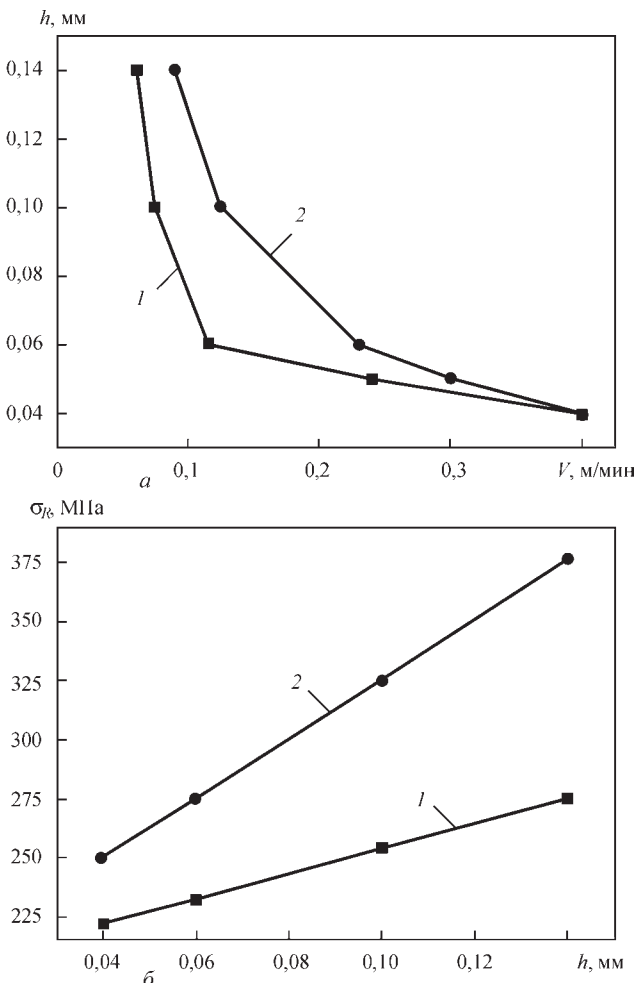


Рис. 5. Зависимость между глубиной канавки и скоростью ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 (1) и 26 мкм (2) — а, а также пределами выносливости упрочненных сварных соединений первой (1) и второй (2) серий — б

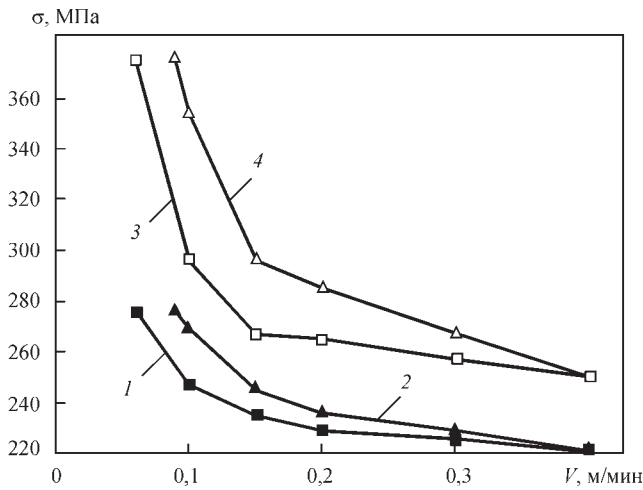


Рис. 6. Зависимость пределов выносливости стыковых сварных соединений первой (1, 2) и второй (3, 4) серий от скорости ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 (1, 3) и 26 мкм (2, 4)

значения, которые на 11 % для первой серии образцов и на 26 % для второй превышают предел выносливости сварного соединения в исходном состоянии. Кроме этого видно, что независимо от *a* с увеличением скорости проковки происходит незначительное снижение разности пределов выносливости между обеими сериями.

Относительное повышение пределов выносливости обеих серий сварных соединений, определенных после разной скорости ВМП в диапазоне изменения амплитуды колебаний рабочего инструмента от 19 до 26 мкм, исходя из предположения о пропорциональном повышении предела выносливости, хорошо иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 7. Их расчетные значения при текущей амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a_i$  можно определить по уравнению в виде:

$$\frac{\sigma_R^i}{\sigma_R^u} = \frac{\sigma_{R1}}{\sigma_R^u} + \frac{\sigma_{R2} - \sigma_{R1}}{\sigma_R^u (a_2 - a_1)} (a_i - a_1), \quad (3)$$

где  $\sigma_{R1}$  и  $\sigma_{R2}$  — пределы выносливости каждой серии сварных соединений, определенные после разной скорости ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента  $a_1 = 19$  и  $a_2 = 26$  мкм, соответственно (табл. 3);  $\beta = \frac{\sigma_{R2} - \sigma_{R1}}{\sigma_R^u (a_2 - a_1)}$  — коэффициент, имеющий свое значение для каждой скорости проковки;  $\sigma_R^u = 200$  МПа — предел выносливости сварного соединения в исходном состоянии.

Из анализа рисунка следует, что при увеличении скорости проковки независимо от амплитуды колебаний рабочего инструмента эффективность повышения сопротивления усталости сварного соединения только от деформационного упрочнения (прямые 5–8) или совокупности всех факторов (прямые 1–4) уменьшается. Следует отметить, что более чувствительными к изменению *V* являются ОН

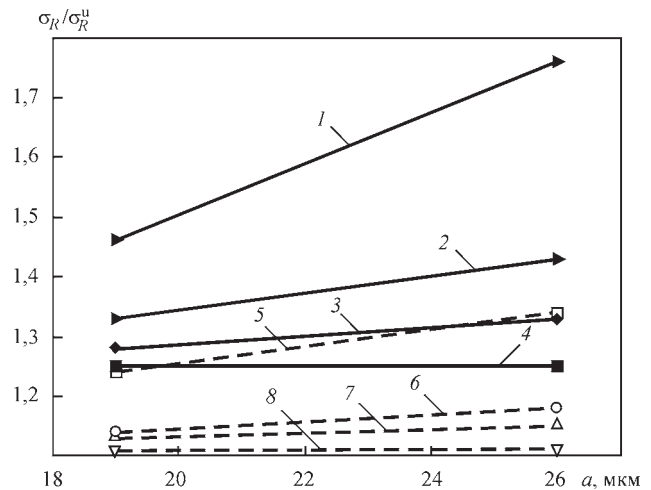


Рис. 7. Относительное повышение пределов выносливости стыковых сварных соединений первой (5–8) и второй (1–4) серий, определенных после разной скорости ВМП в диапазоне изменения амплитуды колебаний рабочего инструмента 19...26 мкм: 1 —  $V = 0,1$ ; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,1; 6 — 0,2; 7 — 0,3; 8 — 0,4

сжатия, так как разница между прямыми 1–4 более существенна при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента. Однако при  $V = 0,4$  м/мин разница между пределами выносливости образцов первой и второй серий независимо от *a* становится одинаковой, что свидетельствует о том, что вклад в повышение сопротивления усталости сварных соединений ОН сжатия независимо от амплитуды колебаний инструмента практически одинаков.

Видно, что при такой скорости обработки влияние только деформационного упрочнения независимо от *a* также одинаково. Поскольку при уменьшении скорости проковки и увеличении амплитуды колебаний рабочего инструмента более интенсивное повышение пределов выносливости происходит в образцах второй серии, представляется возможным сделать вывод о том, что наиболее эффективного повышения сопротивления усталости можно добиться, используя технологию ВМП, выбрав соответствующие режимы упрочнения, на последнем этапе изготовления сварных элементов металлоконструкций.

Таким образом, представленные данные дали возможность, во-первых, определить пределы вы-

Таблица 3. Расчетные значения пределов выносливости стыковых сварных соединений, определенные при разных скоростях ВМП и амплитудах колебаний рабочего инструмента

<i>V</i> , м/мин	Предел выносливости $\sigma_R$ , МПа		$\beta \cdot 10^{-2}$ , мкм <sup>-1</sup>
	$a_1 = 19$ мкм	$a_2 = 26$ мкм	
0,1	247*/295	269*/355	1,43*/4,29
0,2	229*/268	235*/290	0,57*/1,79
0,3	225*/255	230*/265	0,286*/0,714
0,4	222*/250	222*/250	0

\* — данные относятся к образцам первой серии.

носливости стыковых сварных соединений после разных режимов ВМП по глубине канавки или пластически деформированного слоя материала, а во-вторых, более осознанно подойти к выбору оптимальных режимов ВМП при различной комбинации ее скорости и амплитуды колебаний рабочего инструмента с учетом технологии изготовления элементов металлоконструкций.

### Выводы

1. Предложена методика определения пределов выносливости стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали по глубине канавки и по глубине пластически деформированного слоя материала под ее дном в зоне сплавления сварного шва с основным металлом.

2. Показано, что для стыковых сварных соединений между глубиной канавки и глубиной пластически деформированного слоя, полученных после разных режимов высокочастотной механической проковки, существует удовлетворительная корреляционная зависимость.

3. Установлена эффективность повышения предела выносливости сварных соединений после разной технологии их изготовления в зависимости от скорости высокочастотной механической проковки и амплитуды колебаний рабочего инструмента.

### Список литературы

- Roy S., Fisher J. W., Yen B.T. (2003) Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT). *International Journal of Fatigue*, **25**, 1239–1247.
- Wang T., Wang D., Huo L., Zang Y. (2008) Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). *Ibid.*, **4**, 1–7.
- Zhao X., Wang D., Huo L. (2011) Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials and Design*, **32**, 1, 88–96.
- Marguis G. (2010) Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds. *Engineering Fracture Mechanics*, **77**, 2051–2062.
- Trufiakov V. I., Statnikov E. Sh., Mikheev P. P., Kuzmenko A. Z. (1998) The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints. *Intern. Inst. of Welding. Doc. XIII-1745-98*, 12.
- Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Кныш В. В., Прокопенко Г. И. (2006) Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор). *Автоматическая сварка*, **9**, 3–11.
- Михеев П. П., Недосека А. Я., Пархоменко И. В. (1984) Эффективность применения ультразвуковой ударной обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений. *Там же*, **3**, 4–7.
- Дегтярев В. А. (2011) Оценка влияния режимов высокочастотной механической проковки сварных соединений на их сопротивление усталости. *Проблемы прочности*, **2**, 61–70.

- Прокопенко Г. И., Клейман Я. И., Козлов О. В., Кудрявцев Ю. Ф., Книш В. В., Михеев П. П. (2002) *Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів*, Україна, Пат. 47536.
- Кныш В. В., Соловей С. А., Богайчук И. Л. (2011) Оптимизация процесса упрочнения сварных соединений стали 09Г2С высокочастотной механической проковкой. *Автоматическая сварка*, **5**, 26–31.
- ГОСТ 9450-76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Введ. 01.01.1977.
- Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. (1975) *Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность*. Москва, Машиностроение.
- Manson S. S., Muralidharam U. (1987) Fatigue life prediction in bending from axial fatigue information. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **9**, 5, 357–372.
- Кирьян В. И., Кныш В. В. (2008) Высокочастотная механическая проковка сварных соединений металлоконструкций. *Сварочное производство*, **11**, 36–41.

### References

- Roy, S., Fisher, J.W., Yen, B.T. (2003) Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT). *Int. J. Fatigue*, **25**, 1239-1247.
- Wang, T., Wang, D., Huo, L., Zang, Y. (2008) Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). *Ibid.*, **4**, 1-7.
- Zhao, X., Wang, D., Huo, L. (2011) Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials and Design*, **32**(1), 88-96.
- Marguis, G. (2010) Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds. *Engineering Fracture Mechanics*, **77**, 2051-2062.
- Trufiakov, V.I., Statnikov, E.Sh., Mikheev, P.P., Kuzmenko, A.Z. (1998) The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints. *Intern. Inst. of Welding. IIV Doc. XIII-1745-98*, 12.
- Lobanov, L.M., Kirian, V.I., Knysh, V.V., Prokopenko, G.I. (2006) Improvement of fatigue resistance of welded joints in metal structures by high-frequency mechanical peening (Review). *The Paton Welding J.*, **9**, 2-8.
- Mikheev, P.P., Nedoseka, A.Ya., Parkhomenko, I.V. (1984) Efficiency of application of ultrasonic impact treatment for improvement of fatigue resistance of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **3**, 4-7 [in Russian].
- Degtyarev, V.A. (2011) Evaluation of effect of high-frequency mechanical peening modes of welded joints on their fatigue resistance. *Problemy Prochnosti*, **2**, 61-70 [in Russian].
- Prokopenko, G.I., Kleiman, Ya.I., Kozlov, O.V. et al. (2002) *Device for ultrasonic peening treatment of metals*. Pat. 47536, Ukraine [in Ukrainian].
- Knysh, V.V., Solovej, S.A., Bogajchuk, I.L. (2011) Optimisation of the process of strengthening of welded joints of 09G2S steel by high-frequency mechanical peening. *The Paton Welding J.*, **5**, 20-24.
- ГОСТ 9450-76: *Measurement of microhardness by indentation of diamond point*. Introd. 01.01.1977 [in Russian].
- Serensen, S.V., Kogaev, V.P., Shnejderovich, R.M. (1975) *Load-carrying capacity and strength design of machine parts*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Manson, S.S., Muralidharam, U. (1987) Fatigue life prediction in bending from axial fatigue information. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **9**(5), 357-372.
- Kirian, V.I., Knysh, V.V. (2008) High-frequency mechanical peening of welded joints of metal structures. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 36-41 [in Russian].

# МЕТОДИ ОЦІНКИ ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ВТОМІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПРОКОВКИ

**В. О. ДЕГТЯРЕВ**

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2.  
E-mail: degtyarev@ipp.kiev.ua

Досліджено вплив режимів високочастотної механічної проковки на підвищення опору втомі стикових зварних з'єднань сталі Ст3сп. Різна технологія підготовки зразків для досліджень дозволила встановити, що кількісний вклад в підвищення границі витривалості зварних з'єднань залишкових напружень стиску, деформаційного зміцнення поверхневого шару канавки, яка утворюється після проковки вузької зони сплавлення шва з основним металом, та зміни концентрації напружень після високочастотної механічної проковки складає 57, 37, 6 %, відповідно. Показано, що між глибиною канавки та глибиною пластично деформованого шару матеріалу існує кореляція. Запропоновано методіку визначення границі витривалості стикових зварних з'єднань після різних режимів проковки по глибині канавки та пластично деформованого шару матеріалу, використовуючи експериментальні дані вимірювання мікротвердості, а також в дослідженому діапазоні зміни амплітуди коливань робочого інструмента. Встановлена глибина канавки в залежності від швидкості високочастотної механічної проковки та амплітуди коливань робочого інструмента, а також зміна границі витривалості зразків після різної технології їх виготовлення. Показано, що при збільшенні швидкості проковки незалежно від амплітуди коливань робочого інструмента ефективність підвищення опору втомі зварних з'єднань зменшується, а при швидкості 0,4 м/хв границя витривалості від деформаційного зміцнення та сукупного впливу усіх факторів, які властиві високочастотній механічній проковці, підвищується на 11 та 26 %, відповідно. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 7.

*Ключові слова:* зварне з'єднання, границя витривалості, глибина канавки, швидкість високочастотної механічної проковки, глибина пластично деформованого шару, мікротвердість

## METHODS OF EVALUATION OF INCREASE OF FATIGUE RESISTANCE IN BUTT WELDED JOINTS OF LOW-CARBON STEELS AFTER HIGH-FREQUENCY MECHANICAL PEENING

**V. A. DEGTYAREV**

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevskaya Str., 01014, Kyiv, Ukraine  
E-mail: degtyarev@ipp.kiev.ua

There was investigated an effect of modes of high-frequency mechanical peening on increase of fatigue resistance of butt welded joints of steel ST3sp (killed). Different technology of sample preparation for investigation allowed determining that quantitative contribution in rise of fatigue limit of welded joints, residual compression stresses, deformation hardening of surface layer of a groove formed after peening of narrow zone of weld fusion with base metal, and change of stress concentration after mechanical peening makes 57, 37 and 6 %, respectively. It is shown that there is a correlation between the groove depth and depth of plastically deformed layer of material. The procedure was proposed for determination of the fatigue limits of butt welded joints after different modes of peening on groove depth and plastically deformed layer of material, using the experimental data of microhardness measurement as well as the change of amplitude of oscillation of working tool in the investigated range. A depth of groove was determined depending on speed of high-frequency mechanical peening and amplitude of working tool oscillation as well as change of sample fatigue limit due to different technology of their manufacture. It is shown that increase of peening speed independent on working tool oscillation amplitude promotes decrease of efficiency of improvement of welded joint fatigue resistance and at 0.4 m/min speed the fatigue limit from deformation hardening and total effect of all factors typical for high-frequency mechanical peening rises by 11 and 26 %, respectively. 14 Ref., 3 Tabl., 7 Fig.

*Keywords:* welded joint, fatigue limit, groove depth, speed of high-frequency mechanical peening, plastically deformed layer, microhardness

Поступила в редакцію 24.10.2018

### Новая книга

**Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений / Под ред. проф. В. А. Троицкого. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2018. – 196 с.**

Сборник содержит 11 ранее опубликованных статей сотрудников отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е. О. Патона, а также рекламные материалы различных методов неразрушающего контроля.

