

Влияние режимов высокочастотной механической проковки на повышение сопротивления усталости стыковых сварных соединений

В. А. Дегтярев, Е. Е. Гопкало

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

Предложена методика определения предела выносливости стыковых сварных соединений низкоуглеродистых сталей после разных режимов высокочастотной механической проковки по максимальному значению глубины пластически деформированного слоя по экспериментальным измерениям микротвердости.

Ключевые слова: предел выносливости, глубина канавки, скорость высокочастотной механической проковки, глубина пластически деформированного слоя, сварное соединение, микротвердость.

Введение. На современном этапе развития технологических методов повышения сопротивления усталости сварных металлоконструкций и продления срока их службы большое внимание уделяется высокочастотной механической проковке (ВМП) [1]. Это обусловлено тем, что такая проковка способна обеспечить наибольшие показатели повышения сопротивления усталости изделий и их ресурс [2, 3], в том числе в условиях низких климатических температур. Однако широкое внедрение ВМП ограничивалось отсутствием надежного критерия контроля ее эффективности, так как используемый в настоящее время критерий, основанный на скорости перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва, равной 0,5 м/мин [2], не обеспечивал необходимого повышения сопротивления усталости и контроля эффективности обработки как при изготовлении сварных металлоконструкций, так и при проведении ремонтно-восстановительных работ.

В [4] было предложено в качестве критерия эффективности ВМП использовать глубину канавки, образующуюся после проковки зоны сплавления сварного шва с основным металлом. Установлено оптимальное значение глубины 0,14 мм и предложены параметры скорости ВМП в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Однако до настоящего времени остается не исследованным влияние разных режимов обработки на сопротивление усталости сварных соединений. Поскольку проведение комплекса полномасштабных экспериментальных исследований достаточно дорогая и длительная процедура, связанная с большим расходом материала, расчетная оценка сопротивления усталости стыковых сварных соединений в сравнении с отдельными экспериментальными данными представляется наиболее целесообразным решением задачи.

Цель настоящей работы состоит в расчетной оценке влияния режимов ВМП на повышение предела выносливости стыковых сварных соединений по результатам измерения микротвердости на разной глубине пластически деформированного слоя.

Оборудование, материалы и методика испытаний. Объектом для исследований служило стыковое сварное соединение из листовой стали Ст. 3сп, выполненное полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Подготовка образцов для исследований проходила в несколько этапов.

На первом этапе предварительно сваренная встык пластина (рис. 1,а) разрезалась на образцы размером 40×400×14 мм с поперечным швом. Это позволило существенно снизить имеющиеся после сварки пластины остаточные напряжения.

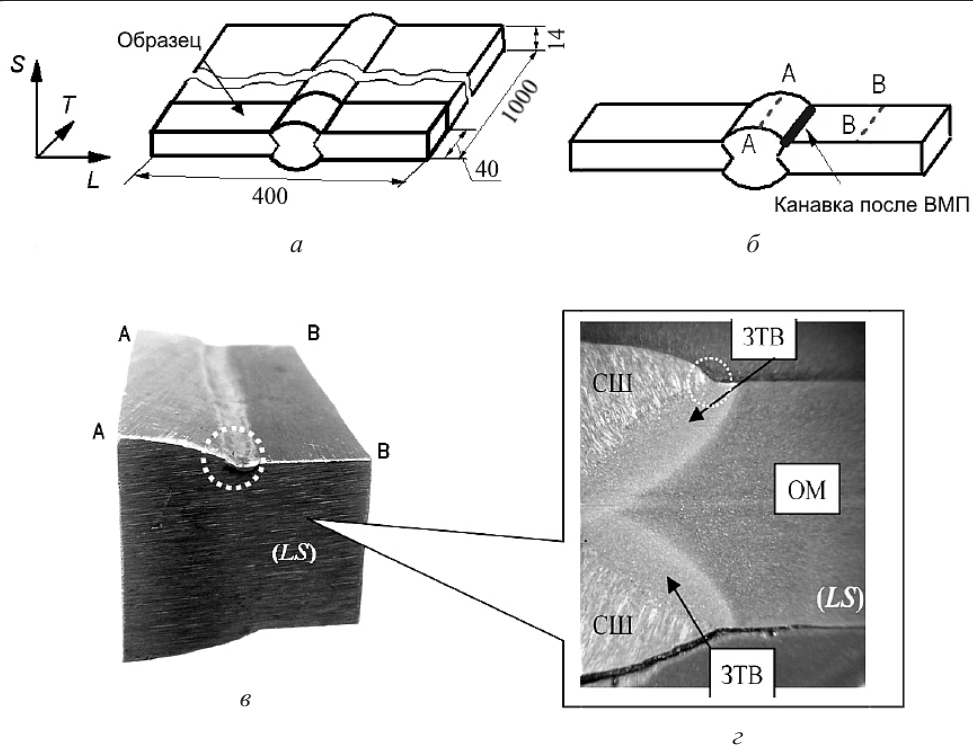


Рис. 1. Схема подготовки образцов для исследования: *а* – карта раскроя образцов для ВМП и усталостных испытаний; *б* – схема вырезки темплетов для металлографических исследований (*A-A* и *B-B* следы реза); *в* – внешний вид темплета; *г* – поверхность макрошлифа после травления в плоскости *LS* поперечного сечения: *L* – направление прокатки, *T* – направление проковки, *S* – направление, перпендикулярное к плоскости прокатки; контуром окружности выделен профиль канавки в плоскости шлифа; СШ – сварной шов; ЗТВ – зона термического влияния; ОМ – основной металл.

На втором этапе образцы по описанной в [5] методике подвергались ВМП вдоль линии сплавления шва с основным металлом (рис. 1, *б*) посредством ультразвукового инструмента USP-300 [6] с частотой колебаний 22 кГц, деформирующий механизм которого представлял четырехбойковую головку со встроенными в нее стержнями диаметром 3 мм. Образцы обрабатывались вдоль линии сплавления при амплитуде колебаний рабочего инструмента $a = 19$ мкм и приведенной скорости его перемещения V , равной 0,232; 0,116 и 0,06 м/мин, которую определяли как отношение длины обрабатываемого шва ко времени обработки. После ВМП образовывалась зависящая от скорости обработки канавка шириной 2,6–3,2 мм и глубиной h , равной 0,041; 0,062 и 0,143 мм соответственно (рис. 1, *б-г*, 2, *а, б*). Следует отметить, что комбинацией таких параметров, как время обработки, позволяющее определить скорость при заданной ширине образца, и амплитуда колебаний инструмента, можно добиться одинаковой глубины канавки. В работе не исследовалась взаимосвязь между глубиной упрочненного слоя и параметрами обработки при одинаковой глубине канавки, полагая, что глубину пластически деформированного слоя отражают микротвердость и глубина канавки. Это подтверждают методические исследования оптимизации процесса упрочнения [7].

С целью определения оптимального режима обработки по критерию циклической долговечности три серии упрочненных образцов подвергались усталостным испытаниям на установке ДСО-2 [8, 9] при отнулевом цикле гармонического нагру-

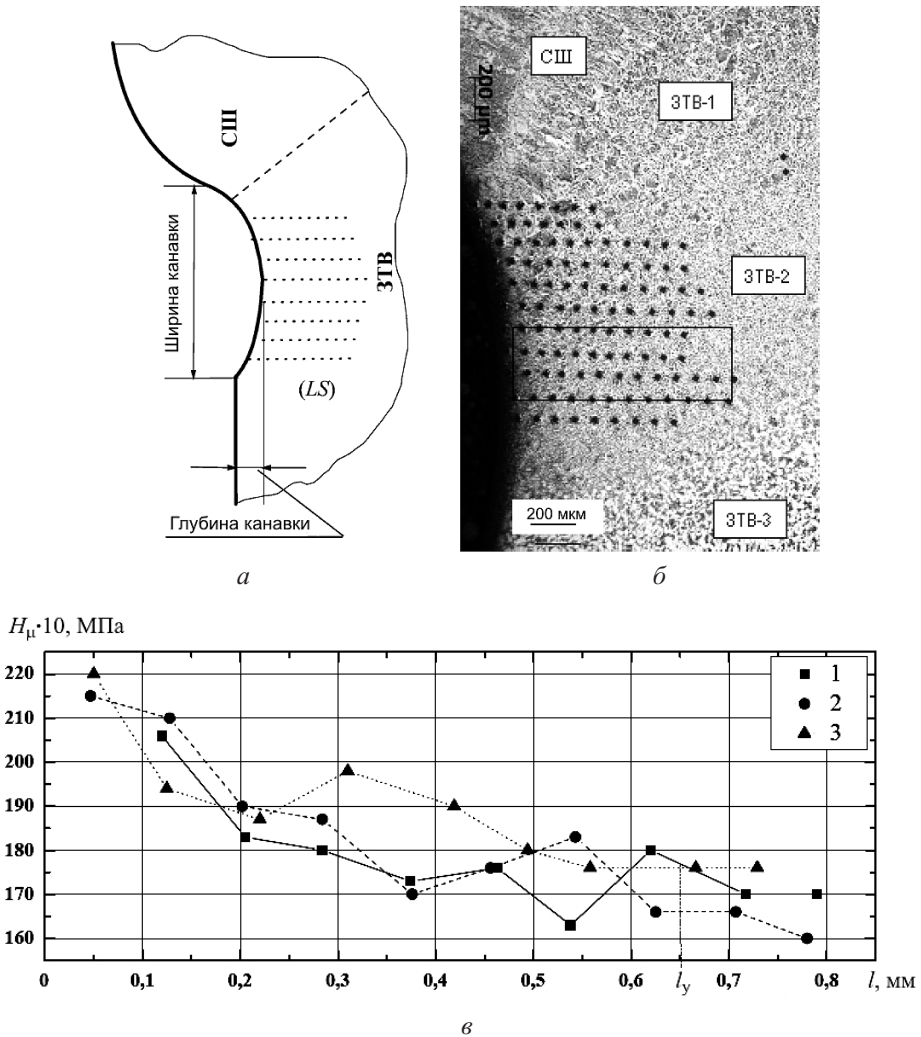


Рис. 2. Фрагмент сварного соединения с упрочненным слоем в плоскости микрошлифа (LS) после воздействия ВМП со скоростью 0,116 м/мин: $a, б$ – соответственно схема измерения микротвердости под канавкой и микроструктура с отпечатками; $в$ – изменение микротвердости H_{μ} в зависимости от глубины l материала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

жения в условиях плоского изгиба. Затем из каждой серии образцов, обработанных при разной скорости ВМП, вырезали по одному темплету размером $40 \times 40 \times 14$ мм (рис. 1,б,в) для металлографических исследований.

Металлографические исследования образцов выполняли на оптическом инвертированном микроскопе AXIOVERT 40 MAT. Микрошлифы готовили на установке BUENLER в плоскости поперечного сечения LS сварного соединения перпендикулярно плоскости прокатки листа LT . Травление микрошлифов осуществляли в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ [10] при нагрузке 1 Н.

Результаты испытаний и их обсуждение. Известно, что в результате ВМП происходит деформационное упрочнение материала на некоторую глубину от поверхности канавки. Очевидно, различным режимам обработки будет соответствовать не

только разная глубина канавки, но и глубина пластически деформированного слоя l_y (глубина упрочненного слоя), которую с достаточной степенью точности можно установить по изменению микротвердости H_μ .

Микротвердость измеряли в поперечном сечении сварного соединения перпендикулярно направлению проковки (на рис. 2,а плоскость LS) параллельными рядами от поверхности канавки в глубь 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 (ЗТВ) в области индентирования соответствует участку нормализации (ЗТВ-2) с однородной мелкозернистой ферритно-перлитной структурой (рис. 2,б). 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 $H_\mu - l$ показывает, что в каждом из выбранных направлений наблюдается снижение микротвердости по мере удаления от поверхности в глубь материала. Как и следовало ожидать, максимальная глубина упрочненного слоя достигается по линии, совпадающей с максимальной глубиной канавки (на рис. 2 кривая 1), с постепенным уменьшением по мере удаления от ее центра (кривые 2, 3). В дальнейшем при расчетах будет использоваться максимальное значение l_y . Также было установлено, что разным скоростям обработки соответствует разная максимальная глубина упрочненного слоя. Результаты измерений h и l_y после разной скорости ВМП приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Т а б л и ц а 1

Значения максимальной глубины упрочненного слоя и глубины канавки после ВМП с разной скоростью

V , м/мин	l_y , мм	h , мм		Погрешность, %
		Эксперимент	Расчет	
0,232	0,40	0,041	0,042	2,4
0,116	0,65	0,062	0,069	11,0
0,060	1,32	0,143	0,140	2,1

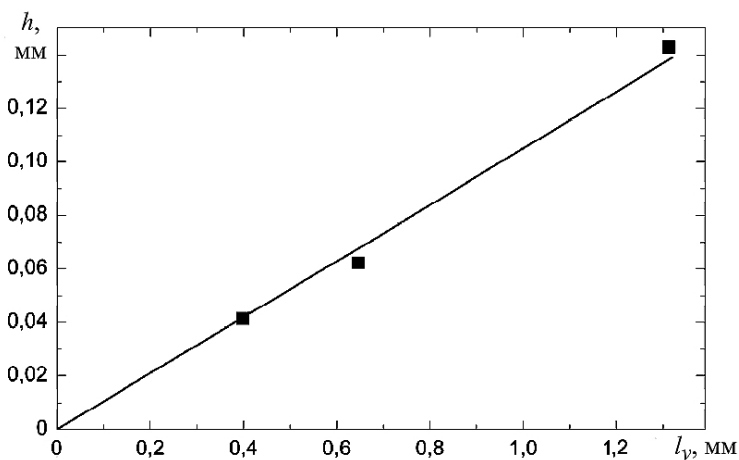


Рис. 3. Изменение глубины канавки h и глубины упрочненного слоя l_y в зависимости от скорости ВМП (точки – экспериментальные данные).

Установлено, что с уменьшением скорости проковки глубина упрочненного слоя и канавки увеличиваются линейно с коэффициентом пропорциональности после обработки результатов методом наименьших квадратов, равным $K = h/l_y = 0,106$. Это дает возможность рассчитать с небольшой погрешностью глубину канавки, задаваясь любыми произвольными значениями глубины упрочненного слоя (табл. 1), и наоборот.

Влияние глубины упрочненного слоя на эффект упрочнения, выражающийся в повышении предела выносливости сварного соединения, исследовали с использованием данных, приведенных на рис. 4. Там же представлены экспериментально определенные пределы выносливости сварных стыковых соединений в исходном состоянии ($\sigma_R^H = 200$ МПа) и при скорости ВМП, равной 0,06 м/мин ($\sigma_R = 375$ МПа), при амплитуде колебаний рабочего инструмента $a = 19$ мкм [4], а также соответствующие им значения глубины упрочненного слоя. В этом случае расчетная зависимость предела выносливости сварных соединений от текущей глубины упрочненного слоя l_i имеет вид

$$\sigma_R^i = \sigma_R^H + K_1 l_i = \sigma_R^H + \frac{\sigma_R - \sigma_R^H}{l_y} l_i, \quad (1)$$

где $K_1 = (\sigma_R - \sigma_R^H)/l_y$ – коэффициент пропорциональности.

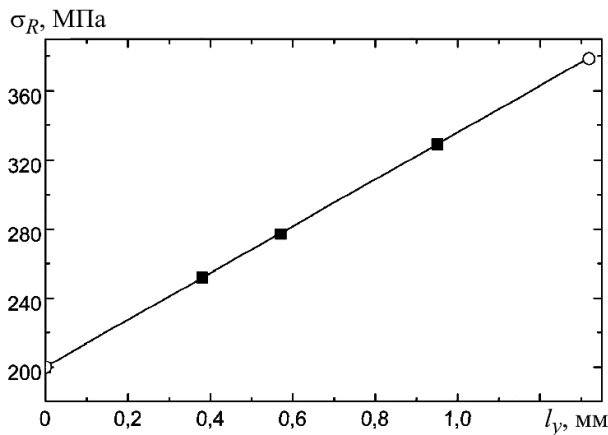


Рис. 4. Расчетная (темные точки) и экспериментальная (светлые точки) зависимость предела выносливости упрочненных стыковых сварных соединений от глубины пластически деформированного слоя.

По определенным значениям пределов выносливости сварных соединений и экспериментально полученной $l_y = 1,32$ мм (табл. 1) установлено, что $K_1 = 132,6$ МПа/мм. Предположение о пропорциональном повышении предела выносливости упрочненного сварного соединения с увеличением глубины упрочненного слоя подтверждается известными данными [11]. Следует отметить, что полученная в настоящей работе максимальная глубина упрочненного слоя рассматривается как предельная, так как дальнейшее ее увеличение, во-первых, может не сопровождаться упрочнением, при этом растет вероятность подслоного разрушения, во-вторых, при больших напряжениях не удастся избежать накопления значительных циклических неупругих деформаций на уровне предела выносливости, что исключает применение формул теории упругости [12]. В данном случае предел выносливости, определенный при отнулевом цикле гармонического нагружения, рассматривается в качестве предельного напряжения.

Таким образом, предложенное выражение позволяет путем расчета оценить предел выносливости сварного соединения при любой глубине упрочненного слоя без проведения трудоемких и продолжительных во времени испытаний (на рис. 4 темные точки).

Что касается остальных факторов, влияющих на сопротивление усталости упрочненных после ВМП сварных соединений, то, как показано в [13], доля влияния коэффициента концентрации напряжений составляет всего 14%. Относительно влияния остаточных напряжений можно отметить, что условия ранее [4] проведенных усталостных испытаний сварных образцов свидетельствуют о практически полной их релаксации в течение первых нескольких тысяч циклов нагружений.

Поскольку измерение l_y связано с определенными техническими трудностями, в том числе с наличием необходимого оборудования, а также 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 выше установленной зависимости ($K = h/l_y$) определяется как $K_1 = (\sigma_R - \sigma_R^H)K/h$. Выражение для расчетного определения предела выносливости сварных соединений будет иметь вид

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

где h_i – текущее значение глубины канавки, полученное после разной скорости ВМП.

Расчетные и экспериментальные значения предела выносливости приведены в табл. 2. Следует отметить их хорошее совпадение.

Т а б л и ц а 2

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

l_y , мм	h_i , мм	σ_R , МПа		V , м/мин, при a , мкм	
		Расчет	Эксперимент	19	26
0,39	0,041	251	–	0,400	0,400
0,58	0,062	278	–	0,110	0,240
0,95	0,100	325	–	0,075	0,125
1,35	0,143	379	375	0,060	0,090

Известно, что глубина канавки зависит от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Как показывает практика, наиболее часто сварные элементы металлоконструкций обрабатываются при величине a , изменяющейся в пределах 19...26 мкм. С использованием ранее [4] полученных зависимостей глубины канавки от скорости ВМП при $a = 19$ и 26 мкм на рис. 5 приведены зависимости между глубиной канавки и пределом выносливости сварных соединений (табл. 2), а также глубиной канавки и скоростью проковки при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента. Анализ представленных в таком виде результатов позволяет определить не только изменение глубины канавки при заданной скорости проковки в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента, но и предел выносливости сварного соединения. Из рис. 5 видно, что по мере увеличения скорости обработки глубина канавки умень-

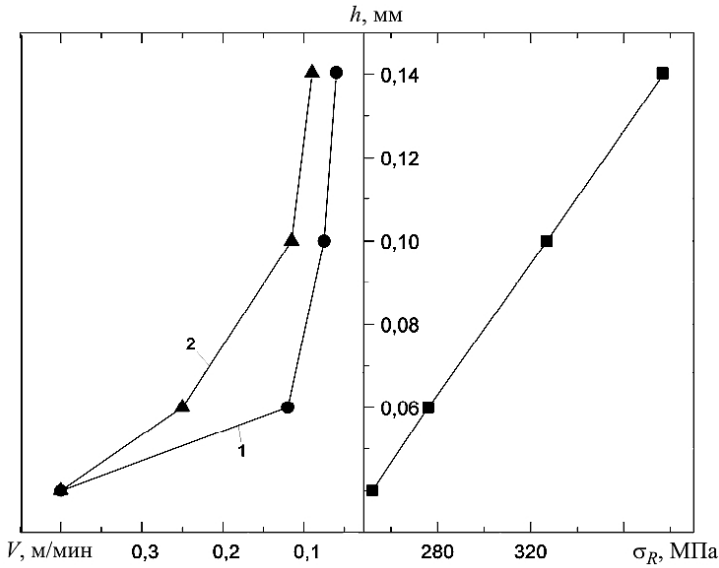


Рис. 5. Зависимость между глубиной канавки и пределом выносливости упрочненных сварных соединений, а также скоростью ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 (1) и 26 мкм (2).

шается, а влияние амплитуды колебаний рабочего инструмента на прочностные характеристики становится менее эффективным, так как кривые 1 и 2 сходятся. При $V = 0,4$ м/мин h уже не зависит от a , что определяет, в свою очередь, одинаковые значения пределов выносливости сварных образцов. Полученный эффект может иметь практическое значение при использовании данной технологии упрочнения.

Зачастую при ремонтно-восстановительных работах в труднодоступных местах элементов конструкций не всегда можно с достаточной точностью определить глубину канавки, легче фиксировать скорость проковки. На рис. 6 приведены зависимости пределов выносливости стыковых сварных соединений от скорости проковки, определенные при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 и 26 мкм. Видно, что с увеличением V значения σ_R уменьшаются, при этом уменьшается и разница между ними. Кроме того, при $V = 0,4$ м/мин независимо от a значения σ_R одинаковые, тем не менее они на 25% превышают предел выносливости сварного соединения в исходном состоянии.

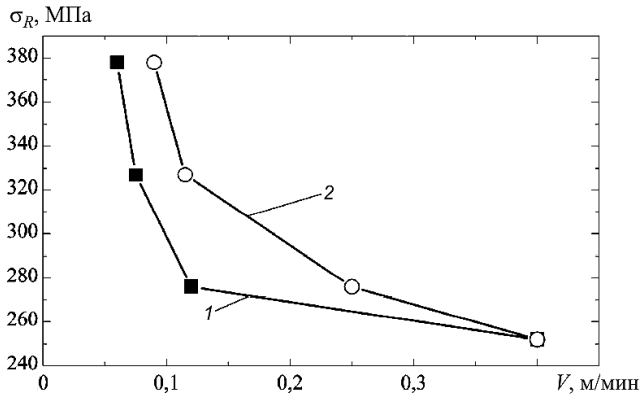


Рис. 6. Зависимость пределов выносливости стыковых сварных соединений от скорости ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 (1) и 26 мкм (2).

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

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

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

Т а б л и ц а 3

Расчетные значения пределов выносливости стыковых сварных соединений, определенных при разных скоростях ВМП и амплитудах колебаний рабочего инструмента

V, м/мин	σ_R , МПа, при		$\beta \cdot 10^{-2}$, мкм ⁻¹
	$a_1 = 19$ мкм	$a_2 = 26$ мкм	
0,1	290	350	4,290
0,2	269	290	1,790
0,3	255	265	0,714
0,4	250	250	0

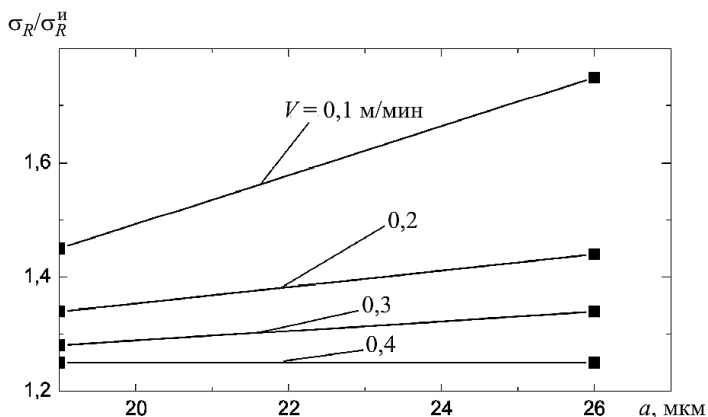


Рис. 7. Относительное повышение пределов выносливости стыковых сварных соединений, определенных после разной скорости ВМП в диапазоне изменения амплитуды колебаний рабочего инструмента 19...26 мкм.

Из анализа рис. 7 видно, что с уменьшением скорости проковки наблюдается более интенсивное повышение пределов выносливости. Это позволяет осознанно подходить к выбору оптимальных режимов ВМП при различной комбинации ее

скорости и амплитуды колебаний рабочего инструмента. Кроме того, отметим, что максимально эффективного повышения сопротивления усталости сварных элементов металлоконструкций можно достичь при скорости ВМП не более 0,1 м/мин и амплитуде колебаний рабочего инструмента 26 мкм.

Выводы

1. Показано, что для стыковых сварных соединений низкоуглеродистых сталей между глубиной канавки зоны сплавления сварного шва с основным металлом, полученной после разных режимов ВМП, и глубиной пластически деформированного слоя существует линейная зависимость.

2. Предложена методика определения пределов выносливости стыковых сварных соединений по глубине пластически деформированного слоя или по глубине канавки.

3. Установлена эффективность повышения предела выносливости сварного соединения в зависимости от скорости высокочастотной механической проковки и амплитуды колебаний рабочего инструмента.

Резюме

Запропоновано методику визначення границі витривалості стикових зварних з'єднань низьковуглецевих сталей після різних режимів високочастотної механічної проковки за максимальним значенням глибини пластично деформованого шару по експериментальних вимірюваннях мікротвердості.

1. *Trufiakov V. I., Statnikov E. S., Mikheev P. P., and Kuzmenko A. Z.* The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints // IIW Doc. XIII-1745-98. – 1998. – 12 p.
2. *Мухеев П. П., Недосека А. Я., Пархоменко И. В. и др.* Эффективность применения ультразвуковой ударной обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений // Автомат. сварка. – 1984. – № 3. – С. 4 – 7.
3. *Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С.* Оценка эффективности методов повышения сопротивления усталости сварных соединений при ударном нагружении в условиях низкой температуры // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 115 – 123.
4. *Дегтярев В. А.* Оценка влияния режимов высокочастотной механической проковки сварных соединений на их сопротивление усталости // Там же. – 2011. – № 2. – С. 61 – 70.
5. *Лобанов Л. М., Кур'ян В. І., Книш В. В.* Підвищення ресурсу зварних металлоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 1. – С. 56 – 61.
6. *Пат. 47536 Україна.* Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, Я. І. Клейман, О. В. Козлов та ін. – Чинний з 15.07.2002.
7. *Книш В. В., Соловей С. А., Богайчук И. Л.* Оптимизация процесса упрочнения сварных соединений стали 09Г2С высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. – 2011. – № 5. – С. 26 – 31.
8. *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.
9. *Дегтярев В. А.* Влияние видов упрочняющей обработки сварных соединений на повышение их сопротивления усталости // Там же. – 2013. – № 5. – С. 85 – 103.

10. *ГОСТ 9450-76*. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Введ. 01.01.77.
11. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
12. *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.
13. *Кирьян В. И., Кныш В. В.* Высокочастотная механическая проковка сварных соединений металлоконструкций // *Автомат. сварка*. – 2008. – № 11. – С. 36 – 41.

Поступила 11. 04. 2014