

Влияние высокочастотной механической проковки на остаточную долговечность стыковых сварных соединений

В. А. Дегтярев

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

Показана эффективность упрочнения стыковых сварных соединений стали СтЗсп путем высокочастотной механической проковки. Изучены закономерности изменения их остаточной долговечности и скорости роста трещины усталости при изменении режимов высокочастотной механической проковки образцов, упрочненных как в исходном состоянии, так и после предварительно накопленных усталостных повреждений.

Ключевые слова: сварное соединение, высокочастотная механическая проковка, трещина усталости, глубина канавки, остаточная долговечность, скорость роста трещины усталости.

Введение. В сварных металлоконструкциях разного назначения в условиях переменного нагружения влияние высоких уровней концентрации напряжений, остаточных напряжений (ОН) растяжения и ряда других факторов может приводить к преждевременному образованию усталостных трещин. Среди многочисленных технологических методов повышения сопротивления усталости и ресурса сварных соединений [1, 2] особое внимание уделяется высокочастотной механической проковке (ВМП) [3], а комбинация ее с другими методами упрочнения [4] позволяет обеспечить наивысшие показатели указанных характеристик. Известные из литературных источников данные свидетельствуют не только о значительном повышении циклической долговечности сварных соединений, но и о высокой эффективности применения технологии ВМП для торможения уже накопленных усталостных повреждений [5]. Наряду с установленными преимуществами ВМП по сравнению с другими известными способами сделан ощутимый прогресс в поиске критерия, оценивающего ее эффективность. Вместо использования скорости перемещения рабочего инструмента вдоль сварного шва, характеризующего скорость ВМП, предложен метод повышения пределов выносливости и долговечности сварных соединений по геометрическим параметрам упрочненной зоны, оцениваемой как глубиной канавки h , образующейся после проковки линии сплавления шва с основным металлом, так и глубиной пластически деформированного слоя [6]. Установлена оптимальная глубина канавки 0,14 мм и предложены параметры скорости ВМП в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента. Следует отметить, что данный способ обработки хорошо изучен при экспериментальном исследовании закономерностей повышения циклической долговечности и пределов выносливости разных типов сварных соединений. Однако до настоящего времени влияние различных режимов обработки на их остаточную долговечность и циклическую трещиностойкость не исследовано. Кроме того, необходимо учитывать, что сварные металлоконструкции зачастую эксплуатируются со значительным уровнем накопленных усталостных повреждений. Что касается эффективности использования разной скорости ВМП для упрочнения металлоконструкций, в том числе и тех, которые эксплуатируются с имеющимися дефектами, таких данных в литературных источниках не найдено.

Учитывая немногочисленные сведения о влиянии режимов ВМП на циклическую долговечность сварных элементов металлоконструкций, цель работы заключается в оценке эффективности влияния режимов ВМП на остаточную долговечность

сварных соединений и скорость роста трещин усталости, в том числе и тех, которые эксплуатируются со значительным уровнем накопленных усталостных повреждений в зонах концентраторов напряжений.

Оборудование, материал, объект и методики исследований. В качестве материала для исследований использовалось стыковое сварное соединение из листовой стали СтЗсп, выполненное полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Подготовка образцов проходила в два этапа.

На первом этапе предварительно сваренная встык пластина разрезалась на образцы размером $40 \times 400 \times 14$ мм с поперечным швом, где длинная сторона образца совпадала с направлением проката. Это позволило существенно снизить возникшие после сварки ОН.

На втором этапе предварительно подготовленные сварные соединения разделялись на две партии. Сварные соединения, которые входили в первую партию, состоящую из нескольких серий (по три образца в каждой), упрочнялись высокочастотной механической проковкой вдоль линии сплавления шва с основным металлом посредством ультразвукового инструмента USP-300 [7] с частотой колебаний 22 кГц. Деформирующий механизм последнего представлял собой четырехголовую головку со встроенными в нее стержнями диаметром 3 мм. Образцы обрабатывались по ранее [6] предложенной методике при амплитуде колебаний рабочего инструмента $a = 26$ мкм и разной приведенной скорости его перемещения $V = 0,232; 0,116$ и $0,06$ м/мин, определяемой как отношение длины обрабатываемого шва ко времени обработки. После ВМП образовывалась канавка шириной 2,6–3,4 мм и глубиной 0,06, 0,105 и 0,18 мм, зависящими от скорости обработки. Ранее [6] для стыкового соединения низкоуглеродистой стали СтЗсп были определены зависимости глубины канавки зоны наклепа от скорости ВМП и экспериментально установлены значения оптимальной ее глубины. 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 настоящей работе не исследовалось влияние отдельно каждого параметра обработки, полагая, что эффективность упрочнения зависит от глубины канавки.

Вторую партию составляли сварные соединения, в которых предварительно выращивались исходные усталостные трещины в условиях отнулевого цикла гармонического нагружения при максимальном напряжении, не превышающем 0,57 значения напряжения при проведении основного эксперимента (385 МПа). Такой выбор напряжения позволяет исключить влияние перегрузки на скорость роста трещины усталости (РТУ). По результатам экспериментальных исследований устанавливалось число циклов нагружения, соответствующее исходной длине трещины 3 мм. Затем сварные соединения разбивались также на несколько серий, каждая из которых упрочнялась с приведенной скоростью 0,232, 0,116 и 0,06 м/мин при амплитуде колебаний рабочего инструмента 26 мкм.

Таким образом, различие в предлагаемых методиках заключается в технологии подготовки сварных соединений к проведению исследований. В первом случае ВМП подвергались образцы в исходном состоянии, во втором – после накопленного усталостного повреждения.

Предварительные исследования показывают, что трещины усталости в основном возникают вне концентратора, поэтому от создания дополнительного концентратора напряжений путем сверления отверстия диаметром 0,5 мм посередине образца в зоне наклепа для гарантии появления трещин во всех образцах в установленном месте, что облегчило бы условия проведения испытаний, пришлось отказаться.

Испытания сварных соединений на усталость проводились при изгибе на установке ДСО-2 [8] с коэффициентом асимметрии цикла напряжений $R = 0$ и частотой нагружения 20 Гц. Образцы из каждой серии, упрочненные с разной скоростью,

подвергались усталостным испытаниям при постоянном максимальном напряжении цикла $\sigma_{\max} = 385$ МПа.

В основу методики исследований влияния режимов ВМП сварных соединений на их остаточную долговечность (эксплуатационная живучесть) и скорость роста трещины усталости положены кинетические диаграммы зависимости роста трещины усталости $l_{\text{тр}}$ от числа циклов нагружения N , необходимого для приращения трещины определенной длины. С помощью микроскопа МБС-2 и керосиновой пробы следили за зарождением и развитием поверхностной полуэллиптической трещины. Учитывая, что сварные образцы имели поверхность после проката, надежная фиксация начальной магистральной макротрещины происходила при длине 1 мм. Испытания останавливались по достижении трещиной длины 16 мм, так как в этом случае циклическая нагрузка уменьшалась на 3%. При обработке результатов использовались показания полной длины трещины усталости. Чтобы корректно сравнивать данные испытаний первой партии сварных соединений со второй, за нулевую точку при определении приращения длины трещины принималась начальная длина 3 мм. По результатам экспериментальных исследований образцов после ВМП с разной приведенной скоростью устанавливалось число циклов нагружения N_0 , соответствующее начальной длине трещины l_0 , и N_k после ее приращения до предельной длины l_k . Остаточная долговечность сварных соединений определялась как $N_j = N_k - N_0$, а скорость роста в них трещины усталости – как $dl/dN = (l_k - l_0)/(N_k - N_0) = \Delta l/N_j$.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам экспериментальных исследований сварных соединений после ВМП с разной приведенной скоростью были определены осредненные для каждой серии образцов кинетические диаграммы РТУ (рис. 1). Для сравнения на рис. 1 представлены данные роста трещин в образцах, не подвергавшихся упрочнению. Видно, во-первых, что технология проковки значительно увеличивает число циклов до разрушения образцов, во-вторых, чем меньше скорость обработки, тем больше число циклов нагружения не только до момента возникновения трещины (на рис. 1 не показано), но и до достижения трещиной заданных размеров. Сравнение результатов исследований, полученных в условиях одинаковой скорости ВМП, показывает, что остаточная долговечность образцов из первой партии больше таковой образцов из второй. По-видимому, расхождение в результатах согласно представляемым методикам обусловлено тем, на каком этапе исследований возникают остаточные напряжения сжатия вследствие упрочнения образцов. В первой партии образцов они возникают перед началом испытаний, во второй – после выращивания исходной трещины усталости, что приводит к разному характеру их перераспределения в процессе усталостных испытаний. Кроме того, известно, что ОН сжатия, ограничивая зону пластичности, препятствуют развитию пластической деформации перед вершиной трещины [9, 10]. Можно предположить, что последовательность упрочнения может приводить к разному размеру зоны пластичности и различным по величине силам, приложенным к берегам трещины протяженностью, равной размеру этой зоны. Поэтому, несмотря на то что до начала испытаний действующие перед вершиной трещины ОН сжатия в обоих случаях могут быть одинаковыми, но при этом эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений будет разным, что и обуславливает различное число циклов нагружения в образцах первой и второй партий, необходимое при подрастании трещины. Однако высказанные гипотезы требуют дальнейшего научного обоснования.

Зависимости остаточной долговечности сварных соединений от скорости ВМП при предельной длине трещины 2, 5 и 10 мм приведены на рис. 2. Следует отметить, что представление результатов при разной предельной длине трещины выбрано с целью выяснения, как будут соотноситься между собой исследуемые в каждой партии образцов характеристики с изменением ее длины в условиях различной скорости

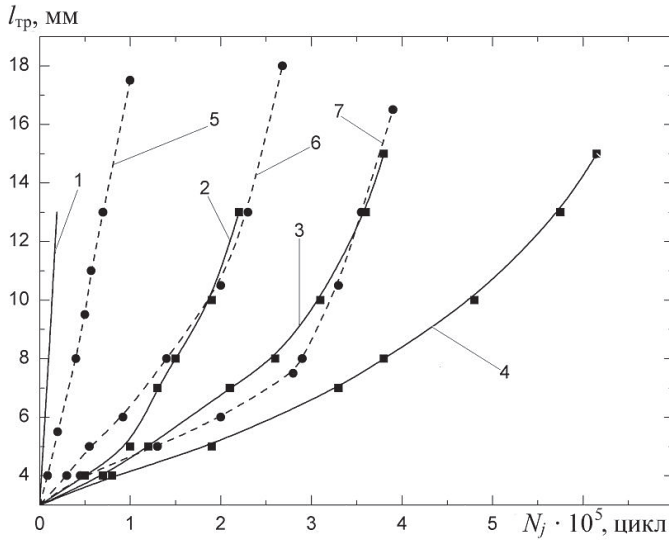


Рис. 1. Зависимость длины трещины усталости от числа циклов нагружения, необходимого для ее приращения в сварных соединениях, упрочненных ВМП со скоростью 0,06 (4, 7), 0,116 (3, 6) и 0,232 м/мин (2, 5): 1 – исходное состояние; 2–4 – первая партия; 5–7 – вторая партия.

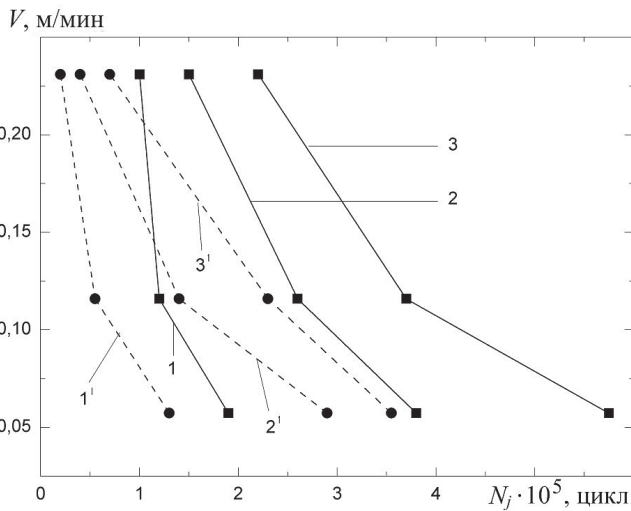


Рис. 2. Зависимость остаточной долговечности сварных соединений первой (1–3) и второй (1'–3') партий от скорости ВМП при разной длине трещины усталости: 1, 1' – $l_k = 2$ мм; 2, 2' – $l_k = 5$ мм; 3, 3' – $l_k = 10$ мм.

ВМП. Видно, что по мере уменьшения скорости проковки остаточная долговечность увеличивается, и для упрочненных образцов в исходном состоянии она больше. Заметим, что живучесть образцов как первой, так и второй партий заметно возрастает при снижении скорости ВМП, начиная с 0,11 м/мин. Причем разница между остаточной долговечностью образцов первой партии при изменении длины трещины от 2 до 10 мм, независимо от скорости ВМП, больше, чем второй. Однако при снижении скорости ВМП с 0,232 до 0,06 м/мин, если сравнивать результаты при одинаковой длине трещины, разница между остаточной долговечностью образцов первой и второй партий незначительная.

Полученные данные позволяют установить влияние скорости проковки сварных соединений на коэффициент упрочнения при разной текущей длине трещины усталости (рис. 3), который можно определить как

$$K_y = \frac{N_j^y}{N_j^н}, \quad (1)$$

где N_j^y и $N_j^н$ – остаточная долговечность сварного соединения в упрочненном и исходном состоянии соответственно.

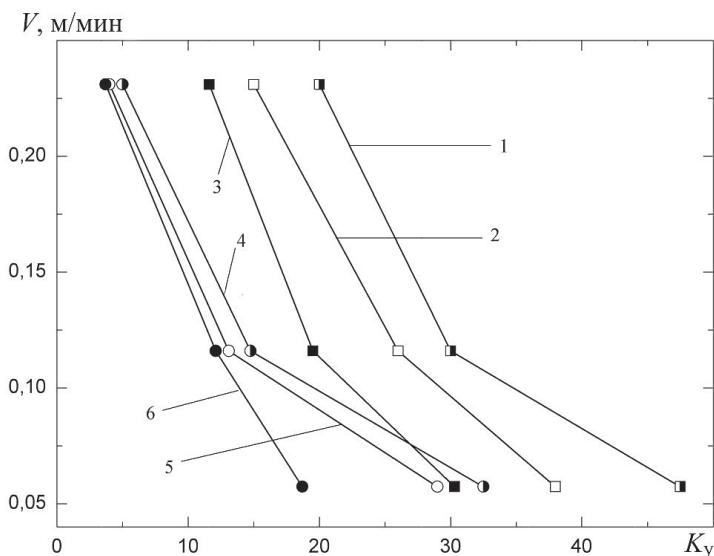


Рис. 3. Зависимость коэффициента упрочнения от скорости ВМП сварных образцов первой (1–3) и второй (4–6) партий до достижения трещиной усталости длины 2 (1, 4), 5 (2, 5) и 10 мм (3, 6).

Анализ представленных на рис. 3 результатов показывает, что с уменьшением скорости ВМП коэффициент упрочнения образцов как первой, так и второй партий увеличивается, оставаясь в первом случае всегда большим. Его снижение с ростом длины трещины, независимо от скорости ВМП, во-первых, по-видимому, связано с более интенсивной релаксацией остаточных напряжений сжатия, и, во-вторых, чем больше глубина трещины по сравнению с глубиной пластически деформированной зоны, которая зависит от скорости ВМП [6], тем в меньшей степени увеличивается K_y . Высказанное предположение также подтверждает тот факт, что коэффициент упрочнения заметно увеличивается при снижении скорости ВМП, начиная с 0,11 м/мин. При изменении длины трещины от 2 до 10 мм разница между коэффициентом K_y образцов, упрочненных в исходном состоянии, независимо от скорости ВМП, всегда больше, чем образцов с предварительно накопленными усталостными повреждениями. Кроме того, со снижением скорости ВМП с 0,232 до 0,06 м/мин соотношение коэффициентов упрочнения двух партий образцов, которые зависят от длины трещины усталости, также уменьшается. Например, при $l_{тр} = 2$ мм оно уменьшается от 4 до 1,45 раза, при 10 мм – от 3,1 до 1,6 раза. Это говорит о том, что при малых скоростях ВМП, но большой длине трещины усталости разница в эффективности упрочнения является незначительной.

Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует не только об эффективности применения ВМП с разной скоростью в целях продления ресурса сварных металлоконструкций с усталостными повреждениями, но и об упрочнении, предпочтительном на стадии изготовления изделия, чем в процессе ремонтно-восстановительных работ, или в крайнем случае при небольшой длине трещины усталости независимо от скорости ВМП.

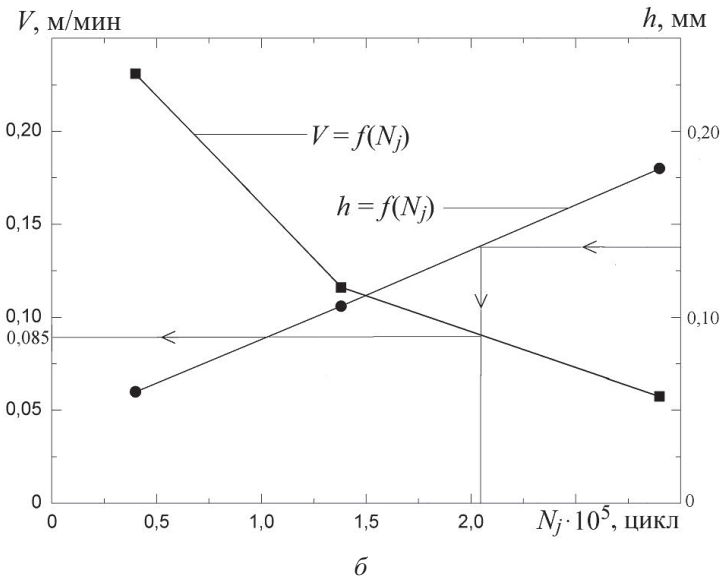
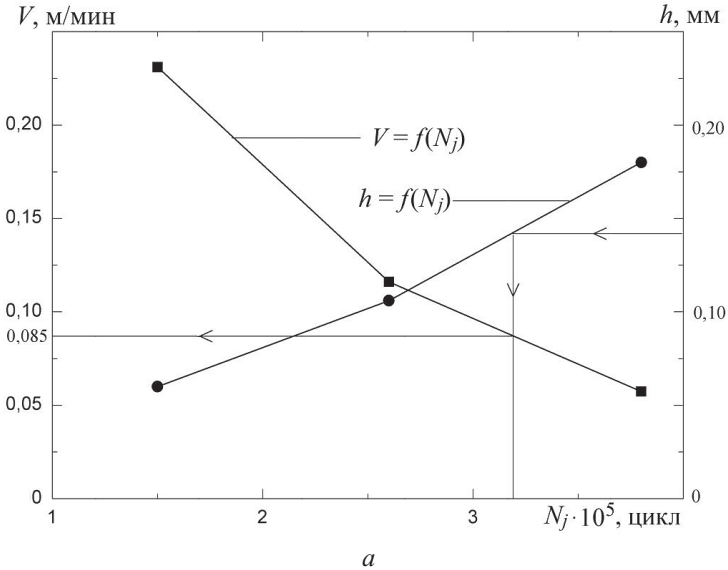
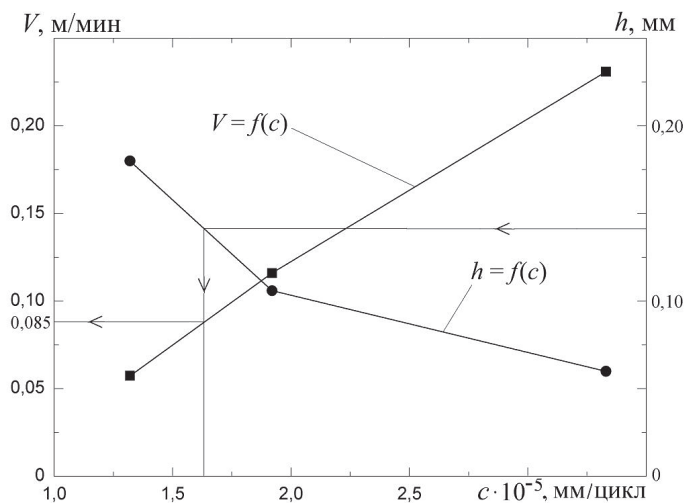
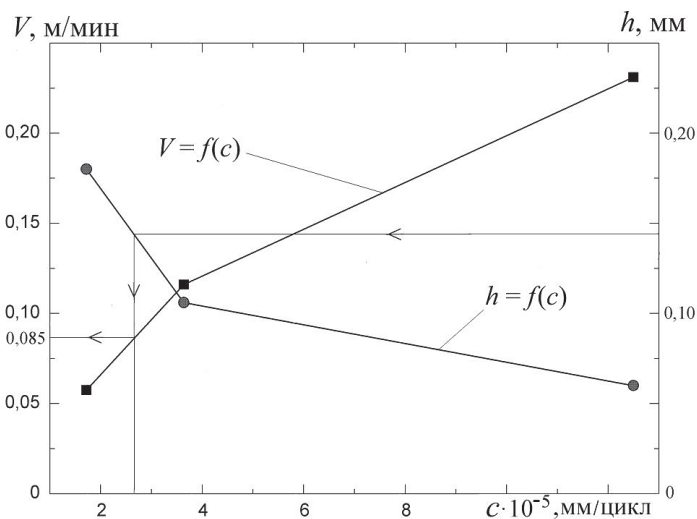


Рис. 4. Взаимосвязь между скоростью ВМП, глубиной канавки и остаточной долговечностью сварных соединений первой (а) и второй (б) партий при длине трещины усталости 5 мм.

Обобщенные зависимости между скоростью ВМП, глубиной канавки и остаточной долговечностью сварных соединений (рис. 4), а также средней скоростью роста в них трещины усталости (рис. 5) для первой и второй партий по достижении трещиной длины 5 мм, считающейся опасной с точки зрения хрупкого разрушения



а



б

Рис. 5. Взаимосвязь между скоростью ВМП, глубиной канавки и средней скоростью роста трещины усталости в сварных соединениях первой (а) и второй (б) партий при длине трещины усталости 5 мм.

высоконагруженных элементов металлоконструкций, особенно при их эксплуатации в условиях низких климатических температур, свидетельствуют, что с повышением скорости проковки остаточная долговечность сварных соединений уменьшается, а средняя скорость РТУ увеличивается. Подобная тенденция наблюдается с уменьшением глубины канавки. Представленные на рис. 4, 5 данные экспериментальных исследований позволяют установить не только закономерности изменения остаточной долговечности сварных соединений и скорости роста в них трещины усталости в широком диапазоне изменения скорости ВМП, но и показать при этом зависимость исследуемых характеристик от глубины канавки. Кроме того, зная остаточную долговечность или скорость РТУ, можно установить взаимосвязь между скоростью ВМП и глубиной канавки при любой предельной длине трещины.

Т а б л и ц а 1

Влияние скорости ВМП и глубины канавки на остаточную долговечность сварных соединений первой и второй партий и среднюю скорость роста трещины усталости в зависимости от ее длины

| № партии | V , м/мин | h , мм | $l_{тр} = 2$ мм | | $l_{тр} = 10$ мм | |
|----------|-------------|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | | | $N_j \cdot 10^{-5}$, цикл | $c \cdot 10^{-5}$, мм/цикл | $N_j \cdot 10^{-5}$, цикл | $c \cdot 10^{-5}$, мм/цикл |
| Первая | 0,060 | 0,180 | 1,90 | 1,05 | 5,75 | 1,74 |
| | 0,116 | 0,105 | 1,20 | 1,67 | 3,70 | 2,78 |
| | 0,232 | 0,060 | 1,00 | 2,00 | 2,20 | 4,55 |
| Вторая | 0,060 | 0,180 | 1,30 | 1,54 | 3,55 | 2,82 |
| | 0,116 | 0,105 | 0,55 | 3,63 | 2,30 | 4,35 |
| | 0,232 | 0,060 | 0,20 | 10,00 | 0,70 | 14,30 |

Сравнение результатов испытаний сварных соединений первой партии с такими второй свидетельствует о том, что остаточная долговечность в первом случае всегда больше во всем диапазоне изменения скорости проковки (рис. 4). Однако разница между их остаточной долговечностью непостоянна, с уменьшением скорости ВМП, а следовательно с увеличением глубины канавки она незначительно уменьшается. Анализ представленных на рис. 5 данных показывает, что разница между скоростью РТУ в сварных соединениях первой и второй партий при уменьшении скорости ВМП будет существеннее. При этом наибольшее расхождение ($\Delta = 9,2 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл) наблюдается при скорости ВМП 0,232 м/мин. Анализ результатов исследований при предельной длине трещины 2 и 10 мм показывает, что полученные закономерности изменения исследуемых характеристик сохраняются и при другой длине трещины (табл. 1). Поскольку ранее [6] проведенные исследования позволили найти оптимальную глубину канавки ($h_{опт} = 0,14$ мм), обобщенные зависимости также можно использовать при определении оптимальной скорости высокочастотной механической проковки $V_{опт}$. Отложив это значение глубины канавки на графике и продолжив прямую до пересечения с зависимостью $V = f(N_j)$ – рис. 4 или $V = f(c)$ – рис. 5 и осью абсцисс, можно определить как остаточную долговечность образцов, или скорость роста в них трещины усталости при $h_{опт}$, так и $V_{опт}$, которая для образцов первой и второй партий составляет в среднем 0,085 м/мин. Полученные зависимости также могут использоваться при ориентировочной оценке влияния скорости ВМП или глубины канавки на срок службы сварной металлоконструкции либо на скорость роста трещины при отсутствии экспериментальных результатов. Анализ данных, приведенных на рис. 4, 5 и в табл. 1, также показывает, что хотя при различной предельной длине трещины остаточная долговечность сварных соединений и скорость РТУ различаются, однако $V_{опт}$ при этом не изменяется. Расчетное значение оптимальной скорости ВМП можно определить по результатам исследований сварных соединений (рис. 4, 5), описав кривые в виде

$$h = ae^{bx} + m, \quad (2)$$

$$V = ke^{dx} + f, \quad (3)$$

где x – текущее значение N_j или c ; m , b , a , k , d , f – экспериментально определяемые коэффициенты.

Из зависимости (2) после некоторых преобразований получим

$$x = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{h-m}{a} \right), \quad (4)$$

поскольку приняли $\ln e = 1$. Подставив в (4) значение оптимальной глубины канавки $h_{\text{опт}} = 0,14$ мм, можно определить расчетное значение остаточной долговечности N_j^p или средней скорости РТУ c^p . После определения приведенных в табл. 2 коэффициентов их расчетные значения при предельной длине трещины усталости 5 мм для сварных соединений двух партий представлены в табл. 3. Как видно, различие между экспериментальными и расчетными значениями является незначительным.

Т а б л и ц а 2

Расчетные значения коэффициентов (2) и (3) при длине трещины усталости 5 мм

| № партии | $a \cdot 10^{-3}$ | b | $m \cdot 10^{-3}$ | d | $k \cdot 10^{-3}$ | $f \cdot 10^{-3}$ |
|-----------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| Первая (рис. 4) | 55,2821 | $0,36 \cdot 10^{-5}$ | -35,3986 | $-6,619 \cdot 10^{-6}$ | 613,4930 | 5,9185 |
| Вторая (рис. 4) | 887,838 | $5,054 \cdot 10^{-7}$ | -845,9795 | $-8,905 \cdot 10^{-6}$ | 291,0965 | 31,1164 |
| Первая (рис. 5) | 835,677 | $-1,349 \cdot 10^5$ | 45,1268 | -17932,13 | -728,2446 | 632,0276 |
| Вторая (рис. 5) | 288,379 | -37686,71 | 40,4805 | -15863,16 | -294,3334 | 278,0644 |

Т а б л и ц а 3

Расчетные значения остаточной долговечности, средней скорости РТУ и оптимальной скорости ВМП для сварных соединений первой и второй партий при предельной длине трещины 5 мм

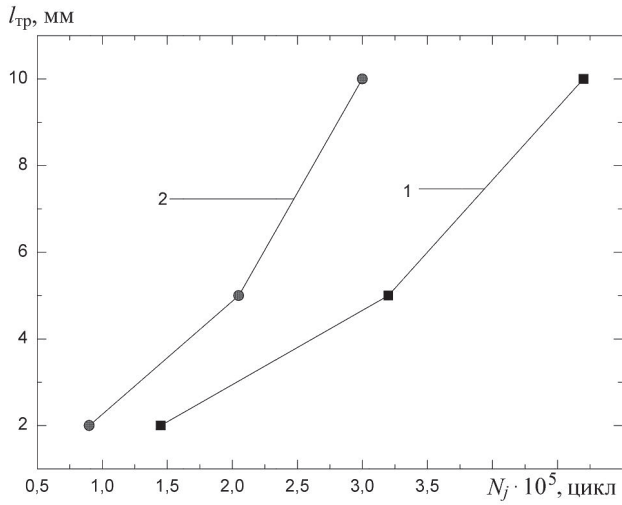
| № партии | $N_j^3 \cdot 10^5$, цикл | $N_j^p \cdot 10^5$, цикл | $V_{\text{опт}}^p$, м/мин | $c^3 \cdot 10^{-5}$, мм/цикл | $c^p \cdot 10^{-5}$, мм/цикл | $V_{\text{опт}}^p$, м/мин |
|----------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Первая | 3,20 | 3,21 | 0,080 | 1,6 | 1,61 | 0,087 |
| Вторая | 2,05 | 2,08 | 0,083 | 2,7 | 2,81 | 0,088 |

Подставив (4) в (3), можно записать

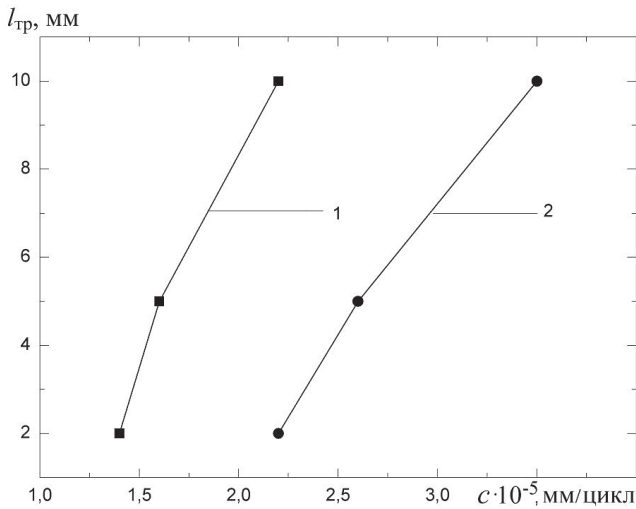
$$V = k \exp \left[\frac{d}{b} \ln \left(\frac{h-m}{a} \right) \right] + f. \quad (5)$$

Решив уравнение (5), получим, что $V_{\text{опт}}^p$ для сварных соединений двух партий изменяется в пределах 0,08...0,088 м/мин (табл. 3). Примерно в таких же пределах получены значения оптимальной скорости обработки при предельной длине трещины 2 и 10 мм. С учетом этого приняли $V_{\text{опт}} = 0,085$ м/мин. Следует отметить, что с помощью предложенных зависимостей можно определить скорость ВМП при любой глубине канавки.

Поскольку оптимальная скорость ВМП не изменяется, можно установить зависимости между предельной длиной трещины и остаточной долговечностью сварных соединений и средней скоростью РТУ при $V_{\text{опт}} = 0,085$ м/мин и $h_{\text{опт}} = 0,14$ мм (рис. 6). Видно, что во всем диапазоне изменения $l_{\text{тр}}$ остаточная долговечность сварных соединений первой партии больше, а скорость роста в них трещины усталости меньше. Причем с увеличением длины трещины расхождение между исследуемыми характеристиками несколько возрастает. Кроме того, при таких режимах ВМП упрочнение образцов в исходном состоянии является более эффективным. Представленные на рис. 6 данные также интересны с точки зрения практического приложения. Ограничиваясь разной предельной длиной трещины усталости при оптимальных режимах обработки, можно определить скорость РТУ или остаточную долговечность сварного соединения, а при известном периоде до зарождения трещины – нормативный срок эксплуатации сварных металлоконструкций.



а



б

Рис. 6. Зависимость между предельной длиной трещины усталости и остаточной долговечностью сварных образцов (а) и средней скоростью роста трещины усталости (б) при оптимальном режиме ВМП: 1 – первая партия; 2 – вторая партия.

Значения коэффициента упрочнения сварных соединений первой и второй партий, их остаточной долговечности и средней скорости РТУ для разной длины трещины в условиях оптимальной скорости упрочнения, а также их сравнительная оценка приведены в табл. 4. Видно, что с увеличением длины трещины с 2 до 10 мм коэффициент упрочнения сварных соединений первой партии уменьшается на 35%, а остаточная долговечность и скорость РТУ повышаются в 3,2 и 1,53 раза соответственно. В сварных соединениях второй партии K_y уменьшается на 22%, а N_j и c повышаются в 3,3 и 1,6 раза соответственно. Причем относительное значение K_y уменьшается на 17%, а снижение N_j и c составляют примерно 3%.

Т а б л и ц а 4

Значения коэффициента упрочнения сварных соединений первой и второй партий, их остаточной долговечности и средней скорости РТУ при $V_{\text{опт}} = 0,085$ м/мин и разной длине трещины усталости

| № партии | K_y | | | $N_j \cdot 10^5$, цикл | | | $c \cdot 10^{-5}$, мм/цикл | | |
|---------------|---------------------------------|------|------|-------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|
| | при длине трещины усталости, мм | | | | | | | | |
| | 2 | 5 | 10 | 2 | 5 | 10 | 2 | 5 | 10 |
| Первая | 37 | 31 | 24 | 1,45 | 3,20 | 4,7 | 1,43 | 1,60 | 2,2 |
| Вторая | 23 | 21 | 18 | 0,90 | 2,03 | 3,0 | 2,20 | 2,60 | 3,5 |
| Первая/вторая | 1,61 | 1,48 | 1,33 | 1,61 | 1,60 | 1,57 | 0,65 | 0,62 | 0,63 |

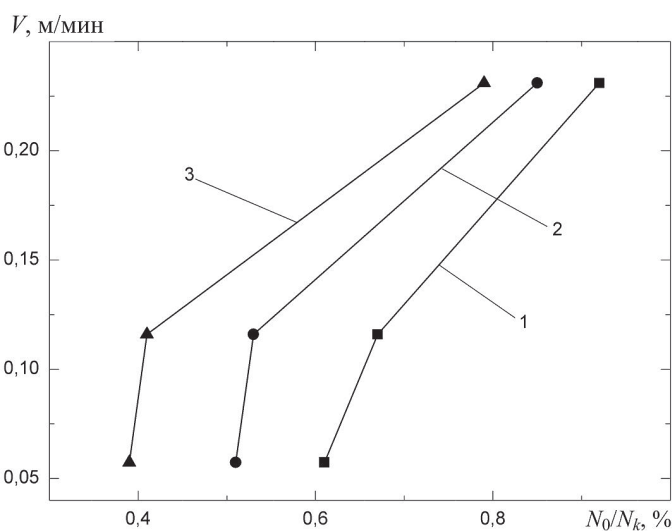


Рис. 7. Зависимость между скоростью ВМП и отношением числа циклов до зарождения макротрещины длиной 1 мм к числу циклов до достижения трещиной усталости длины 2 (1), 5 (2) и 10 мм (3).

На рис. 7 приведены зависимости между скоростью ВМП и отношением числа циклов до зарождения макротрещины длиной 1 мм к числу циклов до достижения трещиной разной длины. Видно, что при изменении скорости ВМП в пределах 0,232...0,06 м/мин стадия зарождения трещины при длине 2 мм уменьшается с 92 до 61% (на рис. 7 кривая 1). Однако с увеличением длины трещины до 10 мм она менее

продолжительна. При изменении скорости ВМП в таких же пределах стадия зарождения трещины уменьшается с 78 до 38% (на рис. 7 кривая 3).

Таким образом, исследования роста трещин усталости в стыковых сварных соединениях стали СтЗсп позволили установить эффективность упрочнения, а также закономерности изменения их остаточной долговечности и скорости роста трещин усталости не только при оптимальных режимах ВМП, но и в широком диапазоне изменения ее скорости после упрочнения образцов как в исходном состоянии, так и после предварительно накопленных усталостных повреждений.

Выводы

1. Установленные закономерности изменения остаточной долговечности стыковых сварных соединений стали СтЗсп с усталостными повреждениями и скорости роста трещин усталости как в широком диапазоне изменения скорости ВМП, так и при оптимальных ее режимах свидетельствуют о целесообразности упрочнения изделия на стадии его изготовления.

2. Показана эффективность упрочнения сварных соединений в исходном состоянии и после предварительно накопленных усталостных повреждений в зависимости от скорости ВМП при разной предельной длине трещины усталости. Экспериментально установлено, что начиная с длины трещины усталости 10 мм, независимо от скорости ВМП разница в эффективности упрочнения является незначительной.

3. Получена взаимосвязь между скоростью ВМП и глубиной канавки при известной остаточной долговечности сварных соединений или скорости роста в них трещины усталости при разной предельной ее длине. Показано, что оптимальная скорость ВМП не зависит от предельной длины трещины усталости.

Резюме

Показано ефективність зміцнення стикових зварних з'єднань сталі СтЗсп шляхом високочастотної механічної проковки. Вивчено закономірності зміни їх залишкової довговічності та швидкості росту тріщини втоми при зміні режимів високочастотної механічної проковки зразків, зміцнених як у початковому стані, так після попередньо накопичених утомних пошкоджень.

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. Abdullah A., Malaki M., and Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening // Ibid. – 2012. – 38. – P. 7–18.
3. Marquis G. Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds // Eng. Fract. Mech. – 2010. – 77. – P. 2051–2062.
4. Кир'ян В. И., Кн'иш В. В., Кузьменко А. З. Продление ресурса металлических пролетных строений железнодорожных мостов с усталостными повреждениями // Автомат. сварка. – 2007. – № 7. – С. 29–32.
5. Лобанов Л. М., Кир'ян В. И., Кн'иш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 1. – С. 56–61.
6. Дегтярев В. А., Гопкало Е. Е. Влияние режимов высокочастотной механической проковки на повышение сопротивления усталости стыковых сварных соединений // Пробл. прочности. – 2014. – № 6. – С. 71–80.
7. Пат. 47536 Україна. Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, Я. І. Клейман, О. В. Козлов та ін. – Чинний від 15.07.2002.

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. *Брок Д.* Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
10. *Lang M. and Marci G.* Influence of single and multiple overloads on fatigue crack propagation // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1999. – **22**. – P. 257–271.

Поступила 10. 05. 2016