

Оценка влияния режимов высокочастотной механической проковки сварных соединений на их сопротивление усталости

В. А. Дегтярев

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

Приведены результаты испытаний на усталость упрочненных сварных стыковых соединений стали Ст. 3сп после разных режимов высокочастотной механической проковки. Предложено глубину канавки зоны наклепа использовать в качестве критерия эффективности такой проковки. Установлены значения оптимальных глубины канавки для достижения максимальной долговечности соединения и скорости высокочастотной механической проковки при разной амплитуде колебаний рабочего инструмента. Показано влияние обработки на сопротивление усталости сварных соединений с учетом разной технологии их изготовления.

Ключевые слова: высокочастотная механическая проковка, сварное соединение, глубина канавки, прогиб образца, остаточные напряжения, кривая усталости, предел выносливости.

Введение. Долговечность металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях повторно-переменного нагружения, обусловлена, как правило, прочностью сварных соединений с пониженным по сравнению с основным металлом сопротивлением усталости. Снижение прочности сварного соединения связано с металлургическими дефектами, наличием концентраторов напряжений и остаточных напряжений растяжения. Поэтому требования по увеличению срока службы элементов конструкций в сочетании с уменьшением их материалоемкости обуславливают необходимость использования дополнительных методов упрочнения. Исследования прочности соединений [1], в том числе и в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины как в условиях гармонического, так и повторного ударного нагружения [2], показывают, что упрочнение способствует увеличению их сопротивления усталости.

В настоящее время применяются такие обработки сварных соединений, как термическая, механическая зачистка шва, аргонодуговая, обработка взрывом, виброобработка и др. [1, 3]. Действие одних обработок приводит к уменьшению концентрации напряжений в результате увеличения радиуса перехода шва на основной металл [4], других – к снижению остаточных напряжений растяжения [5]. Начиная с 90-х гг. большое распространение получила высокочастотная механическая проковка (ВМП) линии сплавления сварного шва с основным металлом [6], обладающая высокой эффективностью упрочнения разных типов сварных соединений при относительно малой ее трудоемкости. В этом случае повышение сопротивления усталости сварных соединений и их долговечности достигается за счет снижения концентрации напряжений (увеличения радиуса перехода шва на основной металл), деформационного упрочнения поверхностного слоя металла и создания остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора [6]. Недостатком ВМП является то, что она осуществляется вручную. Большую роль при этом играет

человеческий фактор, и некачественно выполненная обработка может не обеспечить ожидаемого эффекта. Все зависит от опыта работы с инструментом и умения выбрать скорость проковки, так как большая ее величина не дает требуемого качества обработки и ожидаемой эффективности, слишком малая – неоправдана с экономической точки зрения.

Одним из основных критериев оценки эффективности ВМП является скорость перемещения обрабатывающего инструмента вдоль шва, которая согласно разным данным изменяется в достаточно широких пределах. В работе [7] указывается, что оптимальная скорость, выраженная через образование в поверхностном слое изделия максимальных остаточных напряжений сжатия, составляет 0,3...0,5 м/мин. В исследованиях, проведенных в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, эффективность ВМП оценивали по измерению твердости дна прокованного слоя [8], которая достигает максимальной величины при скорости 0,5 м/мин и не менее четырех проходов инструмента. В работе [9] достаточная степень проковки, оцениваемая по геометрическим параметрам канавки, образовавшейся после обработки, обеспечивается при скорости 0,18...0,3 м/мин и шести–восми проходах инструмента. Обработка проводилась до получения равномерно выглаженной поверхности без отдельных лунок и отпечатков. В рекомендациях [10] предлагается оптимальная скорость обработки 0,3...0,5 м/мин с последующим визуальным контролем ее качества. В настоящее время получено много экспериментальных данных о сопротивлении усталости разных типов сварных соединений [11–13], подтвердивших эффективность ВМП с рекомендованной скоростью 0,5 м/мин. Однако отсутствие простого количественного критерия контроля эффективности ВМП ограничивает ее широкое внедрение.

Цель настоящего исследования состоит в оценке влияния режимов ВМП на сопротивление усталости сварных соединений и установлении простого и надежного критерия ее эффективности для использования в инженерной практике.

Испытательное оборудование и материалы. Оптимальные режимы ВМП выбирали по результатам испытаний на усталость при плоском изгибе образцов со стыковым швом из низкоуглеродистой стали Ст. 3сп на установке ДСО-2 [14]. Предварительно сваренную из листовой стали пластину размером 14 × 1000 × 400 мм разрезали на образцы с поперечным швом, имеющие в плане размеры 40 × 400 мм (стыковой шов выполнялся вдоль длинной стороны пластины). Высокочастотную механическую проковку зоны сплавления шва с основным металлом индивидуального образца осуществляли вручную в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины посредством ультразвукового пьезокерамического инструмента USP-300 [15] с частотой колебаний 22,0 кГц и потребляемой мощностью 0,3 кВт. Деформирующий механизм представляет собой специальную головку со встроенными в нее в ряд четырем стальными стержнями диаметром 3 мм. После ВМП образуется канавка шириной 3,0–3,5 мм и глубиной h , зависящей от скорости V перемещения рабочего инструмента вдоль шва, которую определяли как отношение длины обрабатываемого шва к времени обработки. Поэтому очевидно, что глубину можно использовать как критерий эффективности ВМП

сварных соединений металлоконструкций, в том числе при выполнении ремонтных работ в производственных условиях. Следует отметить, что в работе [8] приводятся сведения о глубине канавки после ВМП, равной 0,2–0,5 мм, однако они представлены в качестве справочных данных и незаложены в основу критерия оценки повышения прочности сварного соединения.

Для измерения глубины канавки сварного шва разработано лабораторное приспособление, состоящее из механизмов крепления прибора к образцу, индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм и измерения глубины канавки, которую определяли как разницу в показаниях индикатора, полученных на поверхности образца и в самой глубокой точке дна канавки. Для расчетов использовали среднее значение измерений, полученных в нескольких точках по длине канавки.

Эффективность ВМП сварного соединения также оценивали по остаточному прогибу образца f . В реальных конструкциях его измерить не представляется возможным, однако в лабораторных условиях можно использовать в качестве контрольного параметра. Для этой цели было изготовлено устройство, позволяющее определять стрелу прогиба образца индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм в исходном состоянии и после ВМП. В первом приближении полагали, что максимальная эффективность ВМП с точки зрения упрочнения сварного соединения обеспечивается по достижении наибольшей глубины канавки или прогиба образца при выбранном режиме обработки.

При каждой скорости проковки обработке подвергалось не менее двух образцов, а значения глубины канавки или прогиба образца определяли как среднее арифметическое.

Анализ результатов испытаний. Зависимости глубины канавки в сварном стыковом соединении от скорости ВМП при двух амплитудах колебаний рабочего инструмента приведены на рис. 1. Видно, что по мере повышения времени обработки (уменьшения ее скорости) и амплитуды колебаний торца рабочего инструмента глубина канавки увеличивается. Интересно отметить, что при амплитуде колебаний 19 мкм с уменьшением скорости проковки, начиная с 0,06 м/мин, глубина канавки увеличивается незначительно. Это свидетельствует о том, что проковка при такой амплитуде виброн нагружения не приводит к существенному деформационному упрочнению поверхности. При дальнейшем уменьшении скорости ее эффективность увеличивается незначительно. Анализ данных рис. 1 также показывает, что по мере повышения скорости V характер кривых затухающий, наблюдается тенденция к их сближению. Это свидетельствует о том, что при высоких скоростях проковки такая разница в амплитуде колебаний рабочего инструмента практически не влияет на глубину канавки.

Зависимости стрелы остаточного прогиба f сварного образца от скорости V ВМП, полученные при разных амплитудах колебаний рабочего инструмента (рис. 2), коррелируют с кривыми изменения глубины канавки (рис. 1). С повышением амплитуды колебаний рабочего инструмента при одинаковой скорости проковки прогиб образца также увеличивается.

С целью оценки влияния глубины канавки на долговечность испытывали образцы со стыковыми соединениями из стали Ст. 3сп при коэффициенте

асимметрии цикла $R=0$ в условиях плоского изгиба при максимальном напряжении цикла 375 МПа (рис. 3). Образец полагали разрушенным, если длина трещины усталости достигала 10 мм. Испытаниям подвергали образцы, обработанные при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 мкм. Влияние глубины канавки на долговечность представлено в виде зависимости между глубиной канавки h зоны сплавления шва с основным металлом после ВМП и числом циклов до разрушения N . Видно, что с увеличением глубины канавки, т.е. с уменьшением скорости проковки, долговечность повышается, и между глубиной канавки и долговечностью образцов существует удовлетворительная корреляция. Следует отметить, что при глубине канавки 0,14 мм и больше трещины усталости в сварных образцах на базе 10 млн. цикл не возникали.

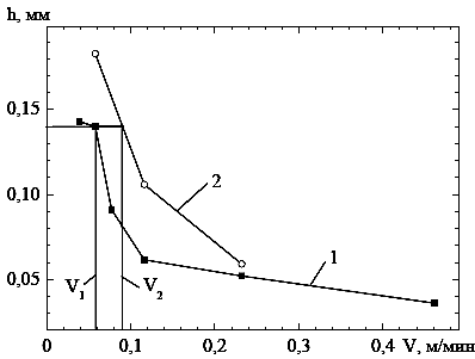


Рис. 1

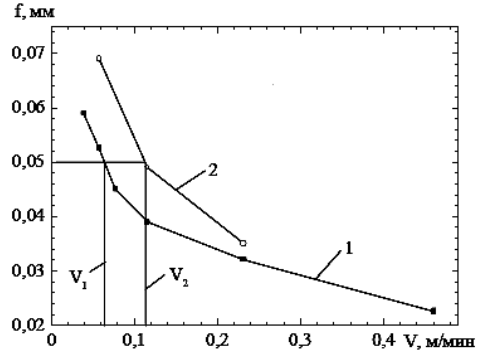


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость глубины канавки h в стыковом соединении стали Ст. 3сп от скорости ВМП при амплитуде колебаний торца рабочего инструмента 19 (1) и 26 мкм (2).

Рис. 2. Зависимость стрелы остаточного прогиба f сварного образца из стали Ст. 3сп от скорости ВМП при амплитуде колебаний торца рабочего инструмента 19 (1) и 26 мкм (2).

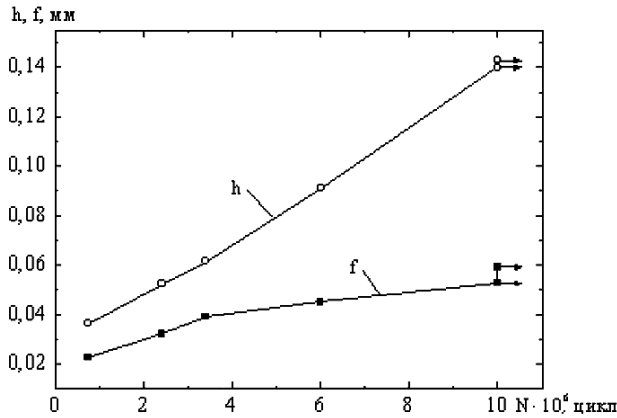


Рис. 3. Зависимость между глубиной канавки h и стрелой остаточного прогиба f сварного образца со стыковым швом из стали Ст. 3сп и циклической долговечностью.

Таким образом, можно заключить, что оптимальным режимом обработки сварных стыковых образцов из стали Ст. 3сп по критерию долговечности в условиях гармонического нагружения является такой, который обеспечивает

минимальную глубину канавки (не менее 0,14 мм). Из рис. 1 следует, что такой глубине соответствует скорость перемещения рабочего инструмента $V_1 = 0,06$ м/мин при амплитуде колебаний 19 мкм и $V_2 = 0,09$ м/мин при 26 мкм. Число проходов при обработке сварного соединения не определялось.

Результаты испытаний образцов на усталость, предварительно обработанных с разной скоростью ВМП при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 мкм, приведены на рис. 3 в виде зависимости между прогибом образца f после проковки и числом циклов до разрушения N . Видно, что с увеличением прогиба образца долговечность повышается. Начиная с прогиба 0,05 мм, сварные образцы, испытанные на базе 10 млн. цикл, не разрушились. Анализ полученных данных показывает, что оптимальным режимом обработки образцов по критерию долговечности в условиях гармонического нагружения является такой, который обеспечивает прогиб образца не менее 0,05 мм. Из рис. 2 видно, что такому прогибу образца соответствует скорость перемещения рабочего инструмента $V_1 = 0,065$ м/мин и $V_2 = 0,11$ м/мин при амплитуде колебаний 19 и 26 мкм соответственно. Следовательно, чем меньше амплитуда колебаний рабочего инструмента, тем меньшей должна быть скорость проковки.

Поскольку скорости ВМП сварного шва, определенные как по глубине канавки, так и по прогибу сварного соединения, близки между собой (рис. 1, 2), значения 0,06 и 0,1 м/мин при амплитуде колебаний рабочего инструмента 19 и 26 мкм соответственно можно принять в качестве оптимальных. Если сравнить рекомендуемую [8] эквивалентную скорость проковки 0,125 м/мин (обеспечивает такую же глубину канавки при условии одного прохода рабочего инструмента вдоль сварного шва за установленное время обработки) с полученной при амплитуде колебаний 26 мкм, то они близки между собой.

Представляет интерес анализ результатов испытаний, приведенных в виде зависимости между скоростью проковки, живучестью и долговечностью, определенных при условии достижения длины усталостной трещины 10 мм (рис. 4). Живучесть определяется как разница между числом циклов нагружений при разрушении образца и в момент возникновения в нем трещины усталости. Число циклов до возникновения трещины усталости определяется путем экстраполяции зависимости длина трещины усталости – число циклов нагружений на ось абсцисс. При уменьшении скорости проковки на 0,35 м/мин (с 0,461 до 0,111 м/мин) долговечность образцов увеличивается на $2,65 \cdot 10^6$ цикл (на рис. 4 кривая 2) при дальнейшем уменьшении скорости всего на 0,04 м/мин (с 0,111 до 0,071 м/мин) ее рост составил $2,59 \cdot 10^6$ цикл. При этом живучесть образцов при первом снижении скорости проковки увеличивается на $0,13 \cdot 10^6$ цикл (на рис. 4 кривая 1), при втором – на $0,5 \cdot 10^6$ цикл. Несмотря на то что снижение скорости проковки во втором случае было почти в десять раз меньше, чем в первом, тем не менее долговечность образцов увеличилась практически одинаково, а живучесть – в 3,8 раза. Следовательно, небольшое изменение скорости проковки существенно повышает эффективность ВМП сварного соединения.

Чтобы оценить эффективность ВМП с учетом разной технологии изготовления образцов и квалификации оператора при работе с инструментом,

были проведены сравнительные испытания на усталость стыковых соединений низкоуглеродистой стали Ст. 3сп в условиях изгиба при отнулевом цикле гармонического нагружения. Испытывали три серии образцов. Образцы первой серии находились в исходном после сварки состоянии и ВМП не подвергались. Образцы второй серии изготавливали из сварной пластины размером 1000×400 мм с предварительно прокованным продольным стыковым швом. Высокочастотную механическую проковку сварного шва осуществлял оператор без опыта работы с инструментом. Это проводилось с целью выяснения, как может повлиять некачественно выполненная обработка сварного шва на долговечность металлоконструкций при их циклическом нагружении. Затем пластину разрезали на образцы установленных размеров (40×400 мм).

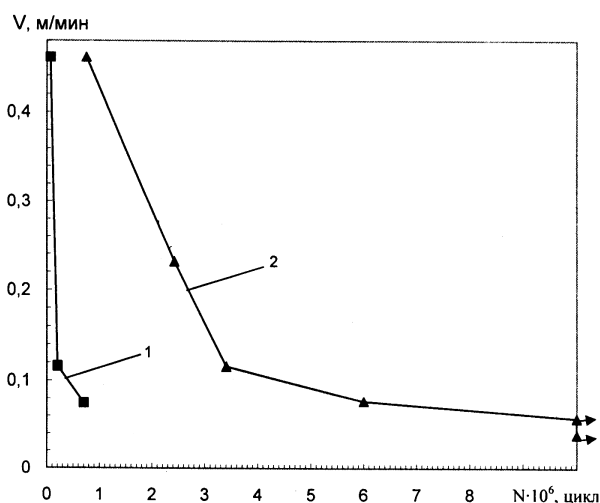


Рис. 4. Зависимость между скоростью ВМП, живучестью (1) и циклической долговечностью (2) образцов со стыковым соединением из стали Ст. 3сп.

Образцы третьей серии вырезали из сварной пластины. Затем каждый образец подвергали ВМП. При этом амплитуда колебаний рабочего инструмента составляет 19 мкм, скорость обработки согласно предложенным рекомендациям – 0,065 м/мин. Такой порядок подготовки образцов позволяет создать и сохранить остаточные напряжения сжатия. Измеренная глубина канавки сварного шва колеблется в пределах 0,14...0,16 мкм, прогиб образца изменяется от 0,05 до 0,06 мм. Значения глубины и прогиба соответствовали предложенным в настоящей работе рекомендациям. Ширина канавки составляет примерно 3,0...3,5 мм.

Данные испытаний образцов первой серии обрабатывали методом наименьших квадратов (на рис. 5 кривая 1). Образец полагали разрушенным, если длина трещины усталости достигала 10 мм. Предел выносливости составлял 200 МПа.

Анализ обработанных методом наименьших квадратов результатов испытаний образцов второй серии показывает, что благодаря ВМП сварного соединения предел выносливости, полученный на базе 10 млн. цикл, повысился на 36% (на рис. 5 кривая 3). Видно, что разброс результатов по долговечности (на рис. 5 светлые точки) значительно больше, чем в образцах первой серии.

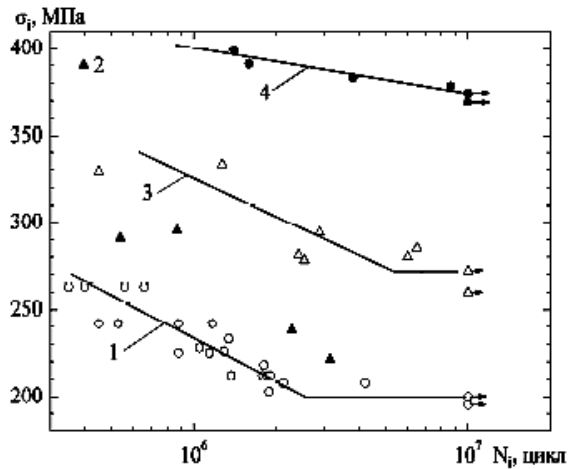


Рис. 5. Кривые усталости стыковых соединений стали Ст. 3сп в исходном состоянии (1), вырезанных из сварной пластины после ВМП (2, 3) и после ВМП индивидуального образца (4).

Трещины усталости зарождаются на расстоянии 5–7 мм от торца образца и распространяются к краю и центру образца. В образцах они развиваются, как правило, по дну прокованной зоны (рис. 6). По достижении трещиной края образца испытания останавливали. Однако в некоторых образцах при визуальном осмотре конфигурация канавки была не плавная, а имели место характерные наплывы металла на сварной шов (гребешки) – рис. 7, которые образовались в результате некачественной проковки линии сплавления шва с основным металлом. В этом случае трещина усталости развивается не по дну канавки, а из гребешков, которые являются источниками концентрации напряжений из-за выполненной неквалифицированным оператором ВМП сварного соединения. Из рис. 5 следует, что долговечность образцов с такими дефектами в три-четыре раза меньше (темные точки) долговечности образцов без подобных дефектов (светлые точки). Таким образом, в результате некачественно выполненной проковки повышение предела выносливости составляет всего 11%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что качество проковки имеет первостепенное значение, а в случае отступления от технологии ВМП сварного соединения происходит образование дополнительных концентраторов, и обработка малоэффективна.

Результаты испытаний образцов третьей серии (на рис. 5 кривая 4) показывают, что предел выносливости повысился на 87% по сравнению с пределом выносливости таких же образцов в исходном состоянии. Особенностью испытаний является то, что трещины усталости в образцах первой и второй серий зарождаются на расстоянии 5–7 мм от края (в образцах первой серии иногда в центре) и распространяются одновременно как к краю, так и центру. Трещины усталости в образцах третьей серии зарождаются на таком же расстоянии от края образца и распространяются всегда к его краю. Наблюдаемая закономерность распространения трещин усталости подтверждает полученные в [8] экспериментальные данные, где указывается, что остаточные напряжения сжатия в околошовной зоне соединения после ВМП увеличиваются ближе к центру образца и существенно уменьшаются к краю.

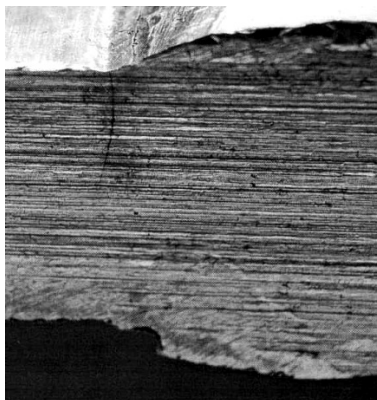


Рис. 6

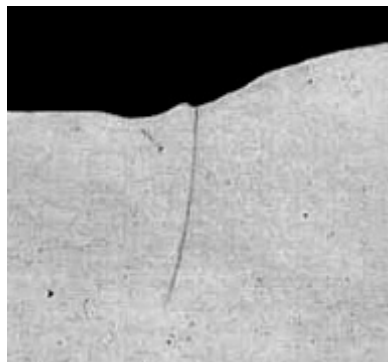


Рис. 7

Рис. 6. Общий вид рабочей части образца с трещиной усталости, развивающейся по дну канавки.

Рис. 7. Общий вид рабочей части образца с трещиной усталости, образовавшейся в зоне напłyва металла на сварной шов в результате некачественной проковки.

Разница между пределами выносливости образцов второй и третьей серий обусловлена качеством ВМП и технологией их изготовления, поскольку порезка пластины на образцы для второй серии осуществлялась после ВМП, в результате чего произошла релаксация остаточных напряжений сжатия.

Как показали результаты усталостных испытаний, контроль одной лишь скорости ВМП не может быть достаточным критерием эффективности обработки. Кроме того, проконтролировать ее в производственных условиях достаточно сложно. Поскольку после ВМП сварного соединения образуется канавка, зависящая от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль шва, использование значения ее глубины, как легко измеряемого и контролируемого параметра в качестве критерия эффективности ВМП сварных конструкций на стадии эксплуатации или изготовления, является более объективным, чем скорости. Для этого необходимо разработать соответствующее оборудование, способное обеспечить измерение глубины канавки в реальных конструкциях.

Выводы

1. Показано, что глубина канавки зоны сплавления сварного шва с основным металлом может служить критерием эффективности ВМП сварных конструкций. Для стыкового соединения низкоуглеродистой стали Ст. 3сп показаны зависимости глубины канавки от скорости ВМП. Экспериментально установлено значение оптимальной глубины канавки (0,14 мм) для достижения максимальной долговечности образцов.

2. Предложены оптимальные скорости ВМП сварного соединения для достижения требуемой глубины канавки в зависимости от амплитуды колебаний рабочего инструмента.

3. Установлено, что после образования канавки в зоне проковки глубиной 0,14–0,16 мм с рекомендованной скоростью ВМП 0,065 м/мин предел выносливости сварного стыкового соединения повышается на 87%. Нарушение техно-

логии ВМП может привести к созданию дополнительных источников концентрации напряжений, в результате чего его повышение составляет всего 11%.

Резюме

Наведено результати випробувань на втому зміцнених зварних стикових з'єднань сталі Ст. 3сп після різних режимів високочастотної механічної проковки. Запропоновано глибину канавки зони наклепу використовувати як критерій ефективності такої проковки. Установлено значення оптимальних глибини канавки для досягнення максимальної довговічності з'єднання і швидкості високочастотної механічної проковки за різної амплітуди коливань робочого інструмента. Показано вплив високочастотної механічної проковки на опір утомі зварних з'єднань з урахуванням різної технології їх виготовлення.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 213 с.
2. 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 – 122.
3. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. – Киев: Наук. думка, 1978. – 193 с.
4. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Книш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 1. – С. 56 – 61.
5. Полоцкий И. Г., Недосека А. Я., Прокопенко Г. И. и др. Снижение остаточных сварочных напряжений УЗ обработкой // Автомат. сварка. – 1974. – № 5. – С. 74 – 75.
6. Лобанов Л. М., Кирьян В. И., Книш В. В., Прокопенко Г. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (обзор) // Там же. – 2006. – № 9. – С. 3 – 11.
7. Степанов В. Г., Статников Е. Ш., Клестов М. И., Шевцов Е. М. Остаточные напряжения при упрочнении сварных соединений стали ЮЗ ультразвуковым инструментом ударного действия // Технология судостроения. – 1974. – № 7. – С. 32 – 34.
8. Книш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. – 2006. – № 1. – С. 43 – 47.
9. Кудрявцев Ю. Ф., Коршун В. Ф., Кузьменко А. З. Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Там же. – 1989. – № 7. – С. 24 – 28.
10. Рекомендації з огляду підвищення та збільшення експлуатаційного ресурсу суцільноступінчатих зварних прогонових будов: ЦП-0176. – Київ: Наш Друк, 2007. – 76 с.

11. *Михеев П. П., Гарф Э. Ф., Кузьменко А. З. и др.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Сб. тр. “Проблемы сварки и специальной электрометаллургии”. – Киев: Наук. думка, 1990. – С. 41 – 47.
12. *Михеев 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.
13. *Castellucci P., Trufiakov V. I., Mikheev P. P., et Statnikov E. Sh.* Le martelage par ultrasons des soudures en acier HLE // Soudage Techn. Connexes. – 1991. – **45**, No. 5/6. – P. 31 – 37.
14. *Дегтярев В. А.* Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности. – 1982. – № 10. – С. 110 – 113.
15. *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. Бюл. № 7.

Поступила 13. 01. 2010