



# ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 09Г2С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

**В. В. КНЫШ**, канд. физ.-мат. наук, **С. А. СОЛОВЕЙ**, канд. техн. наук, **И. Л. БОГАЙЧУК**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе исследования глубины пластически деформированного слоя металла после применения высокочастотной механической проковки установлены оптимальные параметры для упрочнения низколегированных сталей, позволяющие пластически деформировать металл на глубину до 1 мм.

*Ключевые слова:* упрочнение сварных соединений, высокочастотная механическая проковка, пластически деформированный слой металла, микротвердость, оптимизация

Высокочастотная механическая проковка (ВМП), или ультразвуковая ударная обработка благодаря своим преимуществам является передовым способом поверхностного пластического деформирования металла, находящим все более широкое применение для повышения сопротивления усталости сварных соединений [1–9]. Начиная с 1959 г., когда впервые была использована энергия ультразвуковых колебаний для перераспределения остаточных напряжений в сварных соединениях [10], упрочняющие обработки с использованием энергии ультразвука нашли успешное применение в повышении эксплуатационных свойств сварных соединений в различных металлоконструкциях. В значительной части опубликованных работ особое внимание уделялось вопросам эффективности применения технологии ВМП для повышения циклической долговечности сварных соединений, но, как правило, без рассмотрения вопросов установления оптимальных параметров упрочнения [11]. К основным регулируемым технологическим параметрам при упрочнении технологией ВМП относятся амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента, частота ультразвукового генератора, диаметр бойков сменных рабочих головок, линейная скорость выполнения ВМП и сила прижима ударного инструмента. Следует отметить, что оборудование для ВМП непрерывно совершенствовалось, превращаясь со стационарного с потребляемой мощностью 13 кВт в компактное и мобильное с потребляемой мощностью 300...500 Вт. В этой связи вопрос определения оптимальных параметров упрочнения должен решаться в зависимости от используемого оборудования, преследуемых целей и решаемых задач.

Для повышения сопротивления усталости сварных соединений технологией ВМП обрабатывается узкая зона перехода металла шва на основной металл, в результате образуется характерная канавка, под которой располагается наклепанный (пластически деформированный) слой металла. Достижение максимальной глубины пластически деформированного слоя металла под дном канавки в результате ВМП может служить основным критерием установления оптимальных параметров упрочнения.

Целью данной работы являлось установление оптимальных параметров упрочнения сварных соединений стали 09Г2С для повышения их сопротивления усталости. При этом использовали ультразвуковое оборудование с пьезоэлектрическим преобразователем USP-300 мощностью 300 Вт, серийно выпускаемое фирмой «Ультрамет» (Украина). Экспериментальные исследования глубины пластически деформированного слоя металла проводили на образцах из широко применяемой в сварных металлоконструкциях низколегированной стали 09Г2С.

Начиная с 1970-х годов практически все оборудование для ВМП (в том числе и USP) изготавливается с промежуточным ударным элементом, поэтому, как показано в работах [12, 13], при такой схеме реализации ВМП сила прижима ударного инструмента к обрабатываемой поверхности должна составлять около 50 Н. При этом изменение силы прижима от 30...80 Н не оказывает влияния на эффективность обработки, т. е. данный технологический параметр считаем установленным.

Амплитуда колебаний торца волновода ручного ударного инструмента и частота ультразвукового генератора в оборудовании USP-300 имеют постоянные значения и составляют соответственно 30 мкм и 22 кГц. Таким образом, основными технологическими параметрами, которыми можно варьировать в данном оборудовании, являются ди-

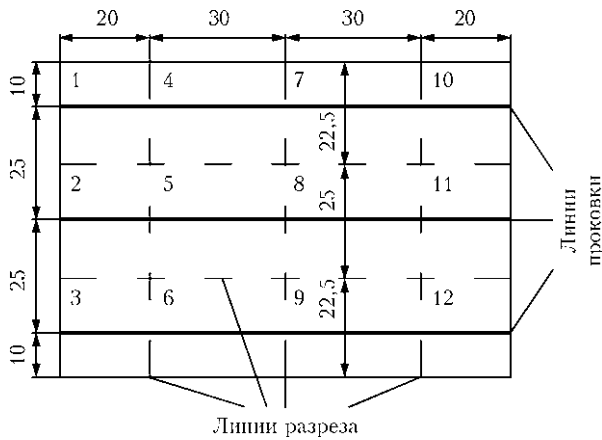


Рис. 1. Схема разрезки образца после ВМП

аметр бойков сменных рабочих головок и линейная скорость выполнения ВМП. Поэтому в работе исследовали влияние этих параметров на глубину пластически деформированного слоя металла под дном канавки, которую определяли измерениями микротвердости. Это наиболее простой и распространенный способ оценки глубины наклепанного слоя металла [13, 14].

Глубину пластически деформированного слоя металла и характерной канавки после ВМП определяли по следующей методике. Из прокатного листа толщиной 30 мм вырезали три заготовки размером 110×80 мм. Проводили чистовую обработку по контуру заготовок с последующим шлифованием рабочей поверхности заготовок с двух сторон и отжигом. ВМП рабочей поверхности полученных образцов размером 100×70 мм проводили по трем линиям, отстоящим друг от друга на расстоянии 25 мм (рис. 1). При упрочнении первого образца использовали сменную однорядную четырехбойковую головку с диаметром цилиндрических бойков 2 мм, при упрочнении второго образца — однорядную четырехбойковую головку с диаметром цилиндрических бойков 3 мм, а при упрочнении третьего образца — однорядную трехбойковую головку с диаметром цилиндрических бойков 4 мм. Обработку ВМП каждого образца проводили за четыре прохода возвратно-поступательными движениями ручного ударного инструмента, но при трех различных скоростях проковки (1, 5 и 10 мм/с). При определении скорости проковки время проковки принимали равным общему времени обработки поверхности образца по линии длиной 100 мм за четыре прохода рабочего инструмента соответственно 100, 20 и 10 с. В результате на поверхности образцов образовывались три канавки, отвечающие заданным постоянным скоростям перемещения инструмента. С помощью индикатора часового типа замеряли глубину канавок в зависимости от диаметра бойка и линейной скорости выполнения ВМП. Из табл. 1, где представлены

Таблица 1. Глубина канавки (мм) в зависимости от диаметра бойка и линейной скорости ВМП

Диаметр бойка, мм	Линейная скорость ВМП, мм/с		
	1	5	10
2	0,11	0,07	0,05
3	0,14	0,11	0,04
4	0,09	0,07	0,05

результаты измерений, видно, что глубина характерной канавки после проковки существенно зависит от скорости выполнения ВМП. Максимальная глубина канавки (0,14 мм) достигается при обработке поверхности однорядной четырехбойковой головкой с диаметром цилиндрических бойков 3 мм и скоростью выполнения ВМП 1 мм/с. В работе [15] указывается, что между глубиной канавки и долговечностью сварных соединений существует удовлетворительная корреляция, а обеспечение требуемой глубины канавки может служить критерием качественной обработки.

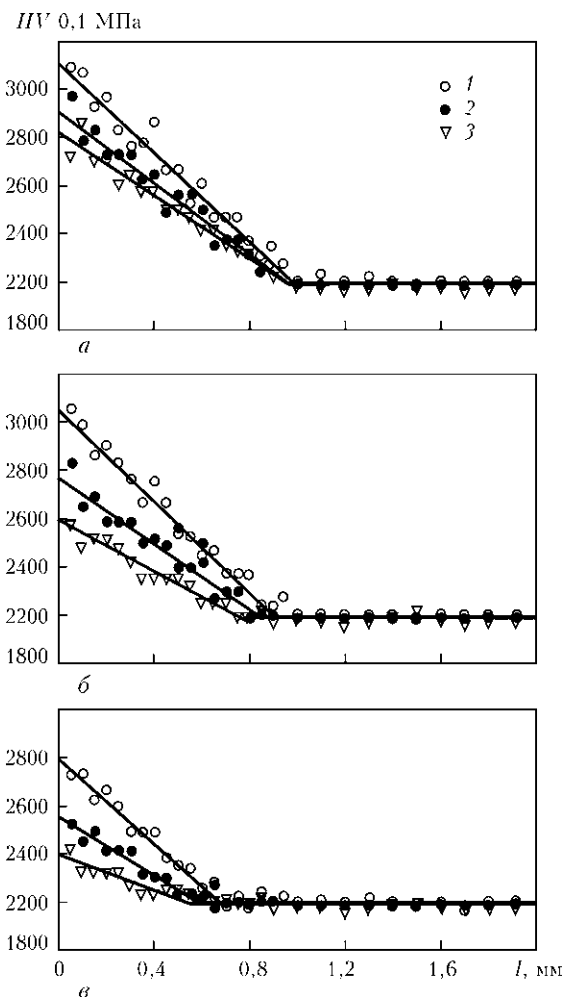


Рис. 2. Зависимость твердости приповерхностного слоя металла, упрочненного ВМП с использованием однорядной головки с диаметром цилиндрических бойков 2 (а), 3 (б) и 4 мм (в), от расстояния от дна канавки  $l$  вглубь металла при скорости выполнения ВМП 1 (1), 5 (2) и 10 мм/с (3)



Для исследования глубины пластически деформированного слоя методом измерения микротвердости изготавливали шлифы поперечных срезов путем разрезки образцов на 12 частей согласно схеме, приведенной на рис. 1. Для исключения влияния краевых эффектов из шести крайних частей (см. рис. 1, 1–3, 10–12) изготавливали односторонние микрошлифы поперечных разрезов, а из оставшихся шести частей (см. рис. 1, 4–9) — двухсторонние микрошлифы. Таким образом, на 12 частях образца получалось шесть мест для измерения микротвердости, характерной данному диаметру бойка (2, 3 или 4 мм) при заданной скорости выполнения ВМП (1, 5 или 10 мм/с). Микротвердость на поверхности поперечных разрезов измеряли перпендикулярно направлению проковки вглубь основного металла, начиная с поверхности слоя дна канавки и заканчивая при стабилизации характеристики микротвердости. В качестве измерительного прибора использовали «LECO» М-400, принцип работы которого основан на вдавлении алмазного индентора усилием 0,1 Н. При этом шаг измерения составлял 50 мкм вблизи поверхности и 100 мкм по мере удаления от нее. Полученные результаты усреднили по шести значениям измерений (см. рис. 2). Отметим, что при столь незначительном усилии на индентор используемый метод становится чувствительным не только к упрочнению металла за счет обычно наблюдаемого при ВМП возрастания плотности

дислокаций и их перераспределения внутри зерен (образование субзеренных границ и границ ячеек) [16, 17], но и к повышению уровня остаточных макронапряжений сжатия [16, 18].

Как видно из рис. 2, при упрочнении образцов стали 09Г2С технологией ВМП максимальная глубина пластически деформированного слоя (примерно 1 мм) достигается при использовании односторонней четырехбойковой головки с диаметром цилиндрических бойков 2 мм. При упрочнении технологией ВМП, используя одностороннюю четырехбойковую головку с диаметром цилиндрических бойков 3 мм, максимальная глубина пластически деформированного слоя уменьшается и составляет около 0,8 мм, а при использовании односторонней трехбойковой головки с диаметром цилиндрических бойков 4 мм — около 0,6 мм. Для рассматриваемого диапазона скоростей выполнения ВМП глубина пластически деформированного слоя в основном определяется диаметром бойков-ударников (силой удара в зоне контакта), а не скоростью перемещения инструмента, поскольку изменение глубины наклепанного слоя для одного диаметра бойка в зависимости от скорости перемещения инструмента не превышает 0,1 мм. Твердость пластически деформированного слоя металла зависит как от диаметра бойков, так и от скорости проковки. При обработке на рассматриваемых скоростях бойками диаметром 2 мм твердость поверхностно деформированного ме-

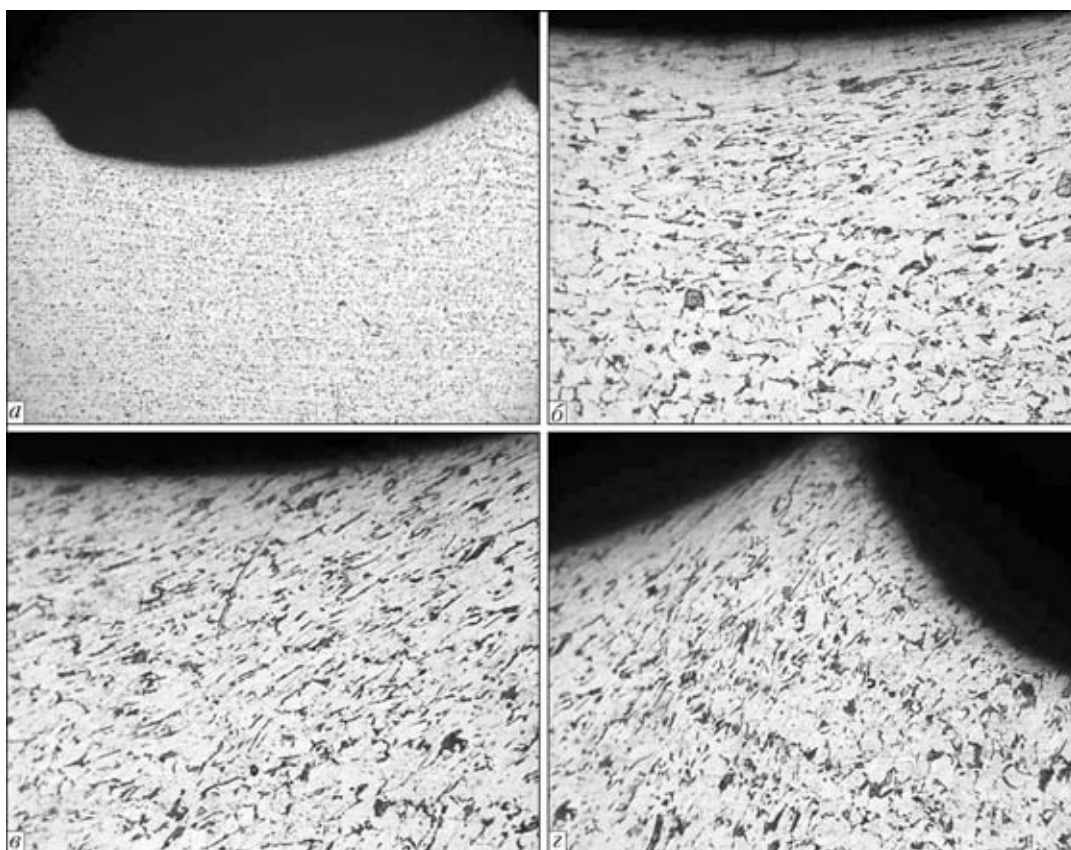


Рис. 3. Микроструктуры зоны канавки: а —  $\times 50$ ; б–г —  $\times 200$  (описания см. в тексте)



талла непосредственно под канавкой превышает твердость основного металла в 1,3...1,4 раза, бойками диаметром 3 мм — в 1,2...1,35 раза, а бойками диаметром 4 мм — в 1,1...1,25 раза. Для всех образцов наблюдается снижение твердости по мере удаления от поверхности вглубь металла. При этом твердость уменьшается с увеличением скорости выполнения ВМП. Поскольку при использовании сменных однорядных четырехбойковых головок с диаметром бойков 2 и 3 мм на малых скоростях проковки (1 мм/с) глубина пластически деформированных слоев металла (1,0 и 0,9 мм) и максимальные значения их твердости ( $HV_{0,1}$  3100 МПа и  $HV_{0,1}$  3050 МПа) практически не отличаются, то наиболее технологичными с точки зрения уменьшения коэффициента концентрации напряжений, более длительной работоспособности и обеспечивающими наибольшую глубину канавки (0,14 мм) являются цилиндрические бойки диаметром 3 мм. Поэтому оптимальными параметрами при обработке технологией ВМП сварных соединений из стали 09Г2С являются диаметр бойков сменных рабочих головок 3 мм и линейная скорость выполнения ВМП около 60 мм/мин. Несмотря на то что технологические параметры упрочнения высокочастотной проковки установлены для низколегированной стали 09Г2С, они могут приниматься в качестве оптимальных для большинства низколегированных сталей, поскольку последние имеют близкие механические свойства.

Проведены также металлографические исследования зеренной структуры металла в зоне проковки для установления характера трансформации зерен вследствие упрочнения технологией ВМП на микрошлифах поперечного среза образцов из основного металла 09Г2С. Ранее на них определяли глубину пластически деформированного слоя методом микротвердости, подвергнутых упрочнению технологией ВМП со скоростью 1, 5 или 10 мм/с с использованием однорядных четырехбойковых головок диаметром бойков 3 мм. В качестве оборудования использовали микроскоп «Neophot-32». Изменение структуры низколегированной стали 09Г2С вследствие ВМП исследовали при разном увеличении (рис. 3).

Общий вид зоны канавки представлен на рис. 3, а. Приповерхностную зону со структурными изменениями условно можно разделить на три области. В первой (рис. 3, б) деформированные зерна феррита расположены практически параллельно касательной ко дну канавки, а соответственно и поверхности образца. Перлитная составляющая структуры также удлиняется. По мере удаления от дна канавки к краю происходит некоторое изменение формы и направления зерен (вторая область). В этой области (рис. 3, в) зерна расположены под углом к поверхности образца,

Таблица 2. Степень деформации зерен в приповерхностном слое металла, упрочненного ВМП с использованием однорядной головки с диаметром цилиндрических бойков 3 мм

Скорость ВМП, мм/с	Область исследования	$K_{ф_{ср}}$	$\delta$ , мм
1	1	11,8	200
	2	6,10	500
	3	3,61	600
5	1	8,50	125
	2	6,50	150
	3	2,94	245
10	1	Интенсивной деформации зерен не обнаружено	
	2		
	3		

но остаются параллельны касательной к поверхности канавки. На границе с основным металлом, не подвергавшимся ВМП (третья область), наблюдаются единичные деформированные зерна, расположенные практически перпендикулярно к поверхности образца (рис. 3, з). Таким образом, интенсивная пластическая деформация, приводящая к изменению формы зерна, происходит путем вытягивания зерен в направлении, параллельном касательной к канавке, которая сформирована поверхностью сферы торца цилиндрического бойка. О подобном поведении зерен в поверхностных слоях армо-железа сообщали авторы работы [19], где при сжатии в ультразвуковом поле наблюдалось существенное вытягивание зерен в направлении, параллельном обрабатываемой поверхности. Результаты анализа формоизменения зерен при интенсивной деформации, создаваемой в приповерхностном слое технологией ВМП, представлены в табл. 2. Из полученных данных видно, что коэффициент формы зерна (характеризует степень деформации зерен феррита)  $K_{ф_{ср}}$  и глубина

распространения зерен, изменивших форму  $\delta$ , зависят от скорости выполнения ВМП. При малых скоростях проковки значения  $K_{ф_{ср}}$  и  $\delta$  максимальны. В работе [20] для определения истинной деформации поверхностного слоя  $e$  при истирании использовали параметр  $\gamma$ , подобный коэффициенту формы зерна  $K_{ф_{ср}} : \sqrt{3}e = \gamma = a/b$ , где  $a$ ,  $b$  — соответственно длина и ширина вытянутого зерна. Показано, что изменение формы зерен вызывается интенсивными деформациями порядка  $e \geq 1$ . Меньшие степени деформации не приводят к формоизменению зерен, а вызывают накопление и перераспределение дислокаций внутри зерен.

В нашем случае размер зоны со значительными изменениями формы зерен под канавкой (зона с

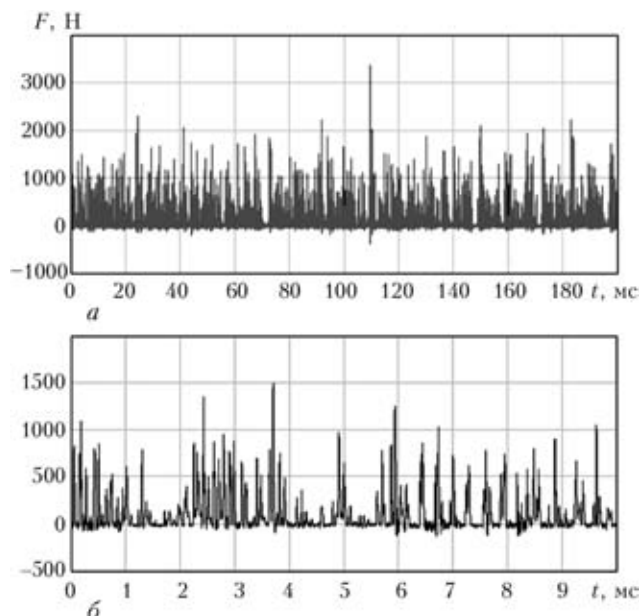


Рис. 4. Осциллограммы силы удара бойка диаметром 3 мм при использовании оборудования USP-300, записанные за 200 мс (а) и с разверткой первых 10 мс (б)

большой степенью деформации  $e > 1$ ) ограничен 200 мкм, тогда как зона пластически деформированного слоя металла, согласно измерениям микротвердости, достигает 1 мм. Следует также учитывать высокий уровень остаточных напряжений сжатия, формирующихся в процессе деформации при ВМП [16, 18, 21], которые также оказывают некоторое влияние на значение микротвердости.

С помощью пьезокерамического датчика и осциллографа с высокой разрешающей способностью записана также осциллограмма силы удара бойка диаметром 3 мм о поверхность в процессе выполнения ВМП (рис. 4). Как видно из рис. 4, а приложение нагрузки в процессе обработки осуществляется блоками импульсов различной ширины с максимальными значениями силы удара в блоке, превышающими 1000 Н. При этом продолжительность импульсов силового воздействия не превышает 100 мкс (рис. 4, б). Частота появления импульсов выше 1000 Н составляет примерно 1 кГц. В отдельных блоках сила удара превышает 2000 Н, а максимально зафиксированное значение силы удара за 200 мс составило 3400 Н.

### Выводы

1. На основании исследования глубины пластически деформированного слоя металла после применения ВМП серийным оборудованием мощностью 300 Вт установлены оптимальные параметры для упрочнения низколегированных сталей: диаметр бойков 3 мм и линейная скорость выполнения ВМП 1 мм/с.

2. Выполнение технологии ВМП при установленных оптимальных параметрах позволяет пластически

деформировать металл на глубину до 1 мм, образуя характерную канавку глубиной до 0,14 мм. При этом размер зоны под канавкой со значительными изменениями формы зерен (коэффициент формы зерна  $K_{\phi_{cp}} = 11,8$ ) составляет 200 мкм.

3. При обработке ВМП поверхности металла приложение нагрузки осуществляется блоками импульсов различной ширины с максимальными значениями силы удара в блоке, превышающими 1000 Н. Продолжительность таких импульсов силового воздействия не превышает 100 мкс, а частота их появления составляет примерно 1 кГц.

1. Zhao X., Wang D., Huo L. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment // *Materials & Design*. — 2011. — **32**, № 1. — P. 88–96.
2. Abston S. The technology and applications of ultrasonic impact technology // *Austral. Welding J.* — 2010. — **55**. — P. 20–21.
3. *The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints* / D. Yin, D. Wang, H. Jing, L. Huo // *Materials & Design*. — 2010. — **31**, № 7. — P. 3299–3307.
4. Marquis G. Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds // *Eng. Fract. Mech.* — 2010. — **77**. — P. 2051–2062.
5. *Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT)* / T. Wang, D. Wang, L. Huo, Y. Zhang // *Intern. J. Fatigue*. — 2009. — **31**, № 4. — P. 644–650.
6. *Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening* / Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy et al. // *Welding in the World*. — 2007. — **51**. — № 7/8. — P. 47–53.
7. *Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus hoher festen baustählen durch Anwendung der UIT-technologie* / U. Kuhlmann, A. Duerr, P. Guenther et al. // *Schweißen und Schneiden*. — 2005. — **57**, № 8. — S. 384–391.
8. Huo L., Wang D., Zhang Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load // *Intern. J. Fatigue*. — 2005. — **27**, № 1. — P. 95–101.
9. Statnikov E. S., Muktepavel V. O., Blomqvist A. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods // *Welding in the World*. — 2002. — **46**, № 3/4. — P. 20–32.
10. Морозничева А. В. Обработка сварных соединений ультразвуком с целью снятия остаточных напряжений. Применение ультразвука в сварочной технике // *Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана*. — 1959. — Вып. 45. — С. 32–43.
11. *Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор)* / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // *Автомат. сварка*. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
12. *Разработка и оптимизация оборудования и процесса УЗ ударной обработки сварных соединений с целью снижения остаточных напряжений* / Г. И. Прокопенко, А. Я. Недосека, А. А. Грузд, Т. А. Красовский // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 1995. — № 3. — С. 14–22.
13. Кравцов Т. Г., Севрюков В. В. Ультразвуковая обработка судовых деталей и сварных конструкций. — Николаев: УГМТУ, 2001. — 126 с.
14. Нехорошов О. Н., Першин В. П., Семухин Б. С. Применение метода ультразвуковой ударной обработки для сварных соединений конструкционных сталей // *Вест. ТГА-СУ*. — 2006. — № 2. — С. 120–125.



15. Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С., Кныш В. В. Деформационный критерий эффективности упрочнения сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2009. — № 10. — С. 48–51.
16. Characterization of ultrasonically peened and laser-shock peened surface layers of AISI-321 stainless steel / B. N. Mordyuk, Yu. V. Milman, M. O. Iefimov et al. // Surface and Coating Technology. — 2008. — **202**. — P. 4875–4883.
17. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости / П. Ю. Волосевич, Г. И. Прокопенко, В. В. Кныш, О. В. Войтенко // Металлофизика и новейшие технологии. — 2008. — **30**, № 10. — С. 1429–1443.
18. Mordyuk B. N., Prokopenko G. I. Ultrasonic impact peening for surface properties' management // J. Sound and Vibrations. — 2007. — **308**, № 3/5. — P. 855–866.
19. Пластическая деформация в ультразвуковом поле и ее возможности применительно к насыщению углеродом поверхностных слоев образцов железа / П. Ю. Волосевич, А. В. Козлов, Б. Н. Мордюк и др. // Металлофизика и новейшие технологии. — 2003. — **25**, № 5. — С. 679–692.
20. Механизм диспергирования железа при интенсивной пластической деформации трением с одновременной диффузией азота / А. И. Юркова, А. В. Белоцкий, А. В. Бякова, Ю. В. Мильман // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. — 2007. — **5**, № 2. — С. 565–588.
21. Mordyuk B. N., Prokopenko G. I. Fatigue life improvement of  $\alpha$ -titanium by novel ultrasonically assisted technique // Materials Sci. and Eng. — 2006. — **437**. — P. 396–405.

Based on investigation of the depth of plastically deformed metal layer after application of high-frequency mechanical peening, optimum parameters for strengthening low-alloyed steels were established, which enable plastic deformation of metal to the depth of up to 1 mm.

Поступила в редакцию 10.01.2011

## НОВАЯ КНИГА

**СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ:** Сб. ст. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2011. — 132 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм.

Сборник объединяет статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по проблемам контактной стыковой сварки оплавлением и другим способам сварки давлением и включает следующие разделы:

- контактная стыковая сварка железнодорожных рельсов и крестовин;
- технология и оборудование для прессовой сварки труб;
- стыковая сварка профильного проката;
- стыковая сварка высокопрочных трудносвариваемых сплавов и биметаллических соединений.

Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области сварки давлением. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов, преподавателей и аспирантов, занимающихся проблемами сварки давлением сталей, алюминиевых титановых сплавов, интерметаллидов и других материалов.



**Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка» тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Книга реализуется в печатном виде (доставка заказной бандеролью) и в электронном виде в \*.pdf формате (отправка по электронной почте с закрытием оплаты по акту выполненных работ).**