



# ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ТОНКОЛИСТОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОКОВКОЙ

**В. В. КНЫШ, И. Н. КЛОЧКОВ, М. П. ПАШУЛЯ, С. И. МОТРУНИЧ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: klochkov@paton.kiev.ua

Работа посвящена экспериментальному исследованию закономерностей сопротивления усталости тонколистовых ( $\delta = 2 \dots 3$  мм) сварных соединений алюминиевых сплавов средней и высокой прочности, выполненных способом импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСПЭ) в инертных газах, а также установлению эффективности повышения их циклической долговечности путем использования технологии высокочастотной механической проковки (ВМП) по установленным параметрам упрочнения. На основе измерения микротвердости, локальных геометрических параметров шва и угловой остаточной деформации установлены эффективные параметры упрочнения с использованием технологии ВМП тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов средней и высокой прочности с помощью портативного ручного оборудования USP-300. Исследовано влияние ВМП металла перехода шва к основному металлу на изменение коэффициента концентрации напряжений, остаточных сварочных напряжений и структуры поверхностного слоя стыковых соединений алюминиевых сплавов малых толщин. Показано, что увеличение радиуса сопряжения шва с основным металлом и устранение угловой остаточной деформации отгибанием после обработки ВМП обеспечивает снижение коэффициента концентрации напряжений в соединениях в 1,35...1,49 раза. Установлено, что долговечность на базе испытаний  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений для упрочнённых стыковых соединений сплава Д16Т увеличивается в 5 раз, для сплава АМг6 — в 4 раза и для сплава 6061-Т6 — в 7 раз по сравнению с исходным после сварки состоянием. Приведены рекомендации для эффективного упрочнения ВМП тонколистовых сварных соединений с целью повышения их циклической долговечности и устранения остаточных сварочных деформаций. Библиогр. 16, табл. 2, рис. 11.

*Ключевые слова:* сварное соединение, многоцикловая усталость, алюминиевые сплавы, циклическая долговечность, высокочастотная механическая проковка, импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом, повышение сопротивления усталости.

Применение алюминиевых сплавов как конструкционных материалов для изготовления облегченных конструкций различного назначения определили их физические, прочностные, технологические и эксплуатационные свойства [1–4]. Тонколистовые сварные конструкции из алюминиевых сплавов с высокими показателями прочности и долговечности широко используются в аэрокосмической промышленности, строительстве, транспортном машиностроении и т. п. Накоплен значительный опыт по применению алюминиевых сплавов в тонколистовых сварных конструкциях различного назначения, который показал, что проблема обеспечения их требуемой долговечности при работе в условиях переменного нагружения остается актуальной [4, 5]. С целью решения этой проблемы ведутся постоянные работы по усовершенствованию сварочных материалов, внедрению новых способов сварки, применению различных конструктивных решений узлов конструкций и послесварочных обработок [5–7].

Одной из перспективных технологий, позволяющей решать вопросы повышения производительности

сварки алюминиевых сплавов с одновременным снижением их разупрочнения и улучшения качества сварных соединений является высокопроизводительная импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (ИДСПЭ) в инертных газах [8, 9]. Однако в соответствии с ГОСТ 14806–80, разработанным в начале 1970-х годов и действующем до настоящего времени, процесс сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов может применяться только для элементов толщиной не менее 3 мм для стыковых соединений и не менее 4 мм для нахлесточных соединений. Современные импульсные источники питания с синергетическим управлением процесса сварки плавящимся электродом позволяют расширить диапазоны толщин свариваемых металлов в сторону меньших их значений при правильно отработанных режимах процесса ИДСПЭ. Однако на практике создание качественных соединений малых толщин с использованием технологии ИДСПЭ может оказаться недостаточным для обеспечения требуемой циклической долговечности сварных соединений элементов конструкций из алюминиевых сплавов средней и



высокой прочности без применения послесварочных упрочняющих обработок. Одной из современных высокопродуктивных технологий упрочнения сварных металлоконструкций является высокочастотная механическая проковка (ВМП), основанная на использовании энергии ультразвука для поверхностного пластического деформирования (ППД) материала [10]. Следует отметить, что для стыковых тонколистовых ( $\delta \leq 3$  мм) сварных соединений алюминиевых сплавов данные о применении ВМП в мировой и отечественной литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение эффективных параметров обработки технологией ВМП тонколистовых стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов АМг6, Д16Т и 6061-Т6, выполненных ИДСПЭ в инертных газах, установление закономерностей повышения сопротивления усталости и циклической долговечности упрочненных соединений.

При отработке режимов сварки стыковых соединений применяли исследуемые сплавы толщиной 2 мм и сварочную проволоку СвАМг6 (ГОСТ 7871–75) диаметром 1,2 мм. В качестве защитного газа использовали аргон высшего сорта. Автоматическую импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом выполняли от сварочной установки «Fronius TPS-2700» и «Fronius TPS-450». Перед сваркой поверхность металла зачищали шабером на глубину 0,03...0,08 мм. Угол наклона сварочной горелки составлял 10...15°, расстояние от сопла горелки до свариваемого металла 8...12 мм, длина дуги (расстояние между металлом и торцом проволоки) 3...5 мм, расход аргона 20 л/мин. Сварку стыковых соединений выполняли на съемных подкладках из нержавеющей стали с канавками для формирования корневой выпуклости шва шириной 2 мм и глубиной 0,8 мм, что обеспечивало хорошее обратное формирование шва. Геометрические параметры швов (ширину  $b$  и высоту  $h$  усиления шва на поверхности сварного соединения) определяли на поперечных макрошлифах. Геометрические параметры выпуклости корня швов практически соответствовали размерам формирующих канавок подкладок. Значения погонной энергии процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом рассчитывали по формуле  $q_{п} = K_{эф} I_{св} U_{д} / v_{св}$ , кДж/см, где  $K_{эф}$  — эффективный КПД дуги (0,72 для аргона). Расчеты показали, что при поддержании одинаковой глубины проплавления металла толщиной 2 мм повышение скорости сварки в 3 раза (например, с 20 до 60 м/ч) требует увеличения силы сварочного тока в 1,5 раза и повышения напряжения на дуге в 1,15 раза, но в конечном итоге это приводит

к снижению в 1,6 раза погонной энергии процесса сварки [11]. Такое снижение энергии уменьшает разупрочнение сварных соединений алюминиевых сплавов средней и высокой прочности, что способствует повышению их сопротивления усталости.

Известно, что основными факторами, определяющими сопротивление усталости сварных соединений конструкционных материалов, являются концентрация напряжений, обусловленная формой соединения, и остаточные сварочные напряжения (ОСН), вызванные термопластическими деформациями, возникающими в процессе остывания [5, 10, 12]. В этой связи определяли значения коэффициента концентрации напряжений (ККН), измеряли уровни и устанавливали закономерности распределения ОСН в стыковых сварных соединениях исследуемых алюминиевых сплавов.

Для количественного определения ККН необходимы данные о реальной геометрии сварного соединения. В стыковых сварных соединениях максимальные напряжения действуют в зонах сопряжения поверхности шва с основным металлом при поперечном к шву действии нагрузки и зависят преимущественно от таких параметров геометрии соединения, как радиус  $r$  и угол  $\theta$  галтельной поверхности (рис. 1, а). К числу основных геометрических параметров стыковых швов, определяющих концентрацию напряжений, относятся также ширина  $b$  и  $e$  и высота  $h$  и  $g$  выпуклости с лицевой и корневой сторон шва. В тонколистовых сварных стыковых соединениях алюминиевых сплавов, для которых свойственна угловая деформация свариваемых листов  $\gamma$  (угловое перемещение в зоне сварного соединения, обусловленное поворотом одной свариваемой пластины относительно другой), ККН зависит также от величины угловой деформации (рис. 1, б).

Значения ККН стыковых соединений определяли по формуле Стаканова—Коростылева—Рыбина [13]:

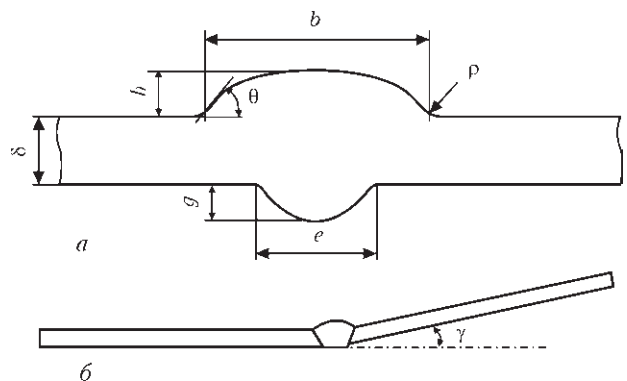


Рис. 1. Параметры, определяющие значения ККН стыковых сварных соединений: а — геометрические параметры соединения; б — угловая деформация стыкового соединения



Таблица 1. Геометрические параметры профиля швов стыковых сварных соединений ( $\delta = 2$  мм), выполненных ИДСПЭ

Сплав	Сторона обработки соединения	$\rho$ , мм	$\theta$ , град	$b$ , мм	$h$ , мм	$\gamma_{\text{ср}}$ , град	$\alpha_{\sigma}$
Д16Т	Лицевая	0,39/0,11	24/4	5,33/0,15	1,19/0,12	3	1,66/0,21
	Корневая	0,33/0,08	29/2	3,46/0,15	1,00/0,15		1,82/0,26
АМг6	Лицевая	0,55/0,21	35/9	6,59/0,19	1,34/0,16	2	1,68/0,14
	Корневая	0,31/0,16	34/13	3,72/0,47	1,10/0,18		1,78/0,48
6061-Т6	Лицевая	1,01/0,32	28/3	7,20/0,46	1,23/0,17	2	1,61/0,21
	Корневая	0,37/0,21	51/10	4,70/0,65	1,37/0,21		1,88/0,27

Примечание. Здесь и в табл. 2 числитель — средние значения; знаменатель — их среднеквадратическое отклонение.

$$\alpha'_{\sigma} = 1 + \left[ \frac{\rho}{\sin \theta} \left( \frac{2}{\delta} + \frac{4}{b} + \frac{0,8}{h} \right) \right]^{-0,5} \quad (1)$$

Область применимости выражения (1) охватывает диапазоны размеров выпуклости шва [14]:  $\rho/\delta = 0,01 \dots 0,1$ ;  $h/\delta = 0,1 \dots 0,2$ ;  $\theta = 15 \dots 30^\circ$ ;  $b/\delta = 0,15 \dots 2,8$ . ККН вследствие угловой деформации определяли по формуле Д. Колчен [15]:

$$K_{\gamma} = 1 + 3,1 \frac{\sin \gamma}{\delta}, \quad (2)$$

где  $\delta$  — толщина свариваемых пластин.

Общий ККН в стыковом соединении с учетом угловой деформации определяли по формуле

$$\alpha_{\sigma} = \alpha'_{\sigma} K_{\gamma}. \quad (3)$$

Выявлено, что для всех исследуемых материалов при толщине свариваемых пластин 2 мм угол  $\gamma$  колебался в пределах  $2 \dots 5^\circ$ , а соответствующие им значения ККН вследствие угловой деформации  $K_{\gamma}$  составили  $1,04 \dots 1,14$ . Для измерения геометрических параметров швов выбрали способ профилометрии. При реализации этого метода использовали разработанный в Институте электросварки портативный профилометр и инструментальный микроскоп БМИ-1, оснащенный головкой с механическим индикатором и конусным наконечником. По результатам измерений с использованием компьютерной обработки строили в увеличенном масштабе профили поверхностей соединений. Результаты измерения геометрических параметров типовых профилей стыковых соединений исследуемых алюминиевых сплавов представлены в табл. 1. Установленные значения теоретического ККН находятся в диапазоне  $1,61 \dots 1,68$  для лицевой и  $1,78 \dots 1,88$  для корневой стороны шва.

Измерения ОСН в сварных пластинах исследуемых сплавов со сварным швом в среднем сечении пластины проводили неразрушающим акустическим методом [16]. На рис. 2 показана зависимость максимального уровня остаточных напряжений от ширины сварных пластин сплавов 6061-Т6 и АМг6, а на рис. 3 — распределение остаточных напряжений в сварной пластине сплава АМг6 размерами  $600 \times 600 \times 2$  мм, измерен-

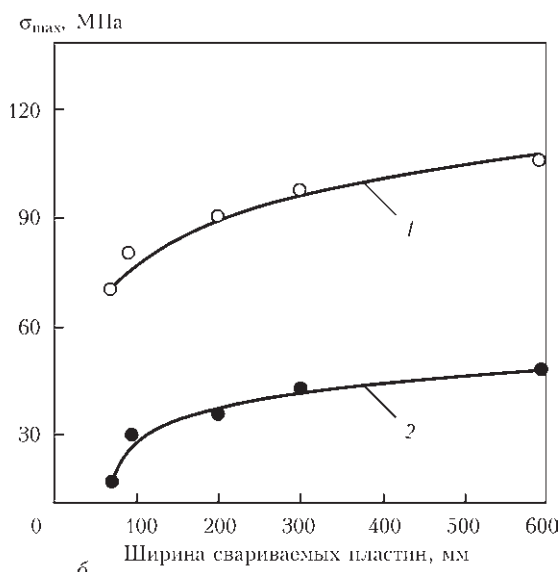
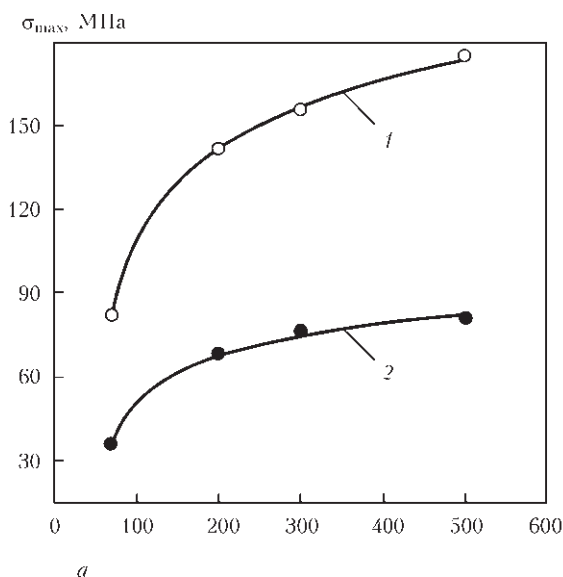


Рис. 2. Зависимость максимального уровня остаточных напряжений от ширины сварных пластин толщиной 2 мм: а — сплав 6061-Т6 ( $\sigma_{0,2} = 262$  МПа); б — АМг6 ( $\sigma_{0,2} = 200$  МПа); 1 — продольные  $\sigma_x$ ; 2 — поперечные  $\sigma_y$



**Таблица 2.** Значения ККН стыковых соединений, выполненных ИДСПЭ до упрочнения  $\alpha_\sigma$  и после упрочнения ВМП  $\alpha_\sigma^{упр}$

Сплав	Сторона обработки соединения	$\alpha_\sigma$	$\alpha_\sigma^{упр}$	$\alpha_\sigma / \alpha_\sigma^{упр}$
АМг6	Лицевая	1,68/0,14	1,13/0,07	1,49
	Корневая	1,78/0,48	1,21/0,06	1,47
6061-Т6	Лицевая	1,61/0,21	1,19/0,12	1,35
	Корневая	1,88/0,27	1,27/0,11	1,48
Д16Т	Лицевая	1,66/0,21	1,16/0,10	1,43
	Корневая	1,82/0,26	1,13/0,11	1,39

ные вдоль стыкового шва на расстоянии 2 мм от зоны сплавления. Видно, что при использовании ИДСПЭ в инертных газах для сварки тонколистовых ( $\delta = 2$  мм) алюминиевых сплавов максимальные уровни значений продольных к шву остаточных напряжений достигают  $(0,4 \dots 0,5)\sigma_{0,2}$ , а поперечные остаточные напряжения, действующие как правило вдоль направления приложения внешнего силового нагружения в два раза ниже  $(0,2 \dots 0,25)\sigma_{0,2}$ . С увеличением ширины свариваемых пластин максимальный уровень поперечных остаточных напряжений практически стабилизируется при ширине более 200 мм.

Эффективные параметры обработки стыковых соединений технологией ВМП без нарушения их геометрической стабильности определяли при односторонней проковке цельной пластины алюминиевого сплава Д16Т размерами  $300 \times 100 \times 2$  мм. Стандартными бойками диаметрами 2, 3 и 5 мм обрабатывали поверхность металла вдоль линии по центру пластины и измеряли при этом угол  $\gamma$  отклонения плоскости пластины относительно исходного состояния. По результатам измерений построили экспериментальные зависимости изменения угла отклонения от линейной скорости перемещения рабочего инструмента вдоль обрабатываемой поверхности (рис. 4).

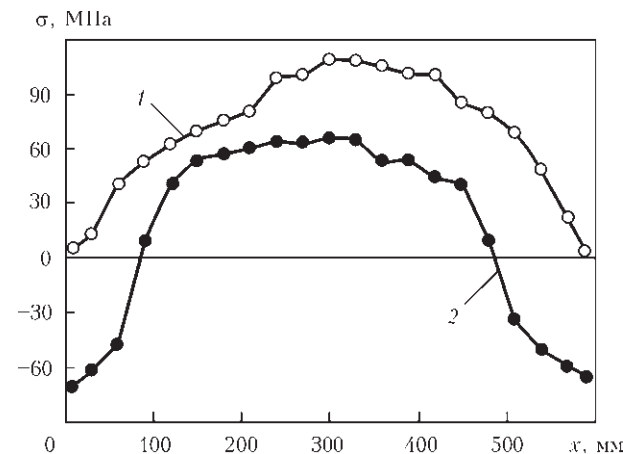


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в сварной пластине сплава АМг6 размером  $600 \times 600 \times 2$  мм, измеренных вдоль шва на расстоянии 2 мм от зоны сплавления: 1 — продольные напряжения  $\sigma_x$ ; 2 — поперечные  $\sigma_y$ .

Скорость обработки 4...10 мм/с привела к формированию максимального угла отгибания пластины, равного  $1 \dots 5^\circ$ . Значение максимального угла отклонения ( $\gamma = 5^\circ$ ) вследствие односторонней обработки цельной пластины соответствует максимальному значению возможного угла остаточной деформации тонколистовых сварных соединений исследуемых алюминиевых сплавов, выполненных ИДСПЭ (рис. 1, б). Поэтому скорость обработки соединений было рекомендовано выбрать из диапазона 4...10 мм/с. С целью повышения производительности и достижения максимального снижения ККН при упрочнении ВМП тонколистовых стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов рекомендуется обработку соединений выполнять с линейной скоростью перемещения рабочего инструмента 7...9 мм/с. Учитывая, что радиус сопряжения шва с основным металлом  $\rho$  с корневой стороны шва меньше, чем с лицевой (табл. 1) для упрочнения зоны сплавления с лицевой стороны шва выбраны бойки диаметром 3 мм, а с корневой 2 мм. В дальнейших исследованиях все образцы стыковых соединений упрочнялись технологией ВМП при указанных эффективных параметрах обработки.

Выполнены расчеты значений теоретических ККН в сварных соединениях после обработки и проведено их сопоставление с соответствующими значениями ККН соединений в исходном после сварки состоянии. При упрочнении соединений технологией ВМП выполняется проковка зон перехода металла шва к основному металлу, в результате чего в этой зоне формируются цилиндрические поверхности в виде канавок. Профиль сформированной канавки имеет радиус, который, как правило, соответствует радиусу сферической поверхности применяемых ударных бойков. Геометрические параметры профилей швов, необходимые для определения ККН, получали по профилограммам зоны сплавления упрочненных

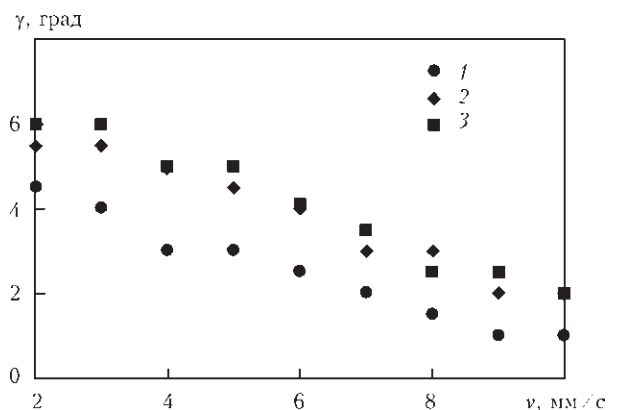


Рис. 4. Зависимость угловой деформации пластины размером  $300 \times 100 \times 2$  мм сплава Д16Т при односторонней проковке металла по линии в центре пластины от линейной скорости перемещения рабочего инструмента при выполнении ВМП: 1 —  $d = 2$ ; 2 — 3; 3 — 5 мм.

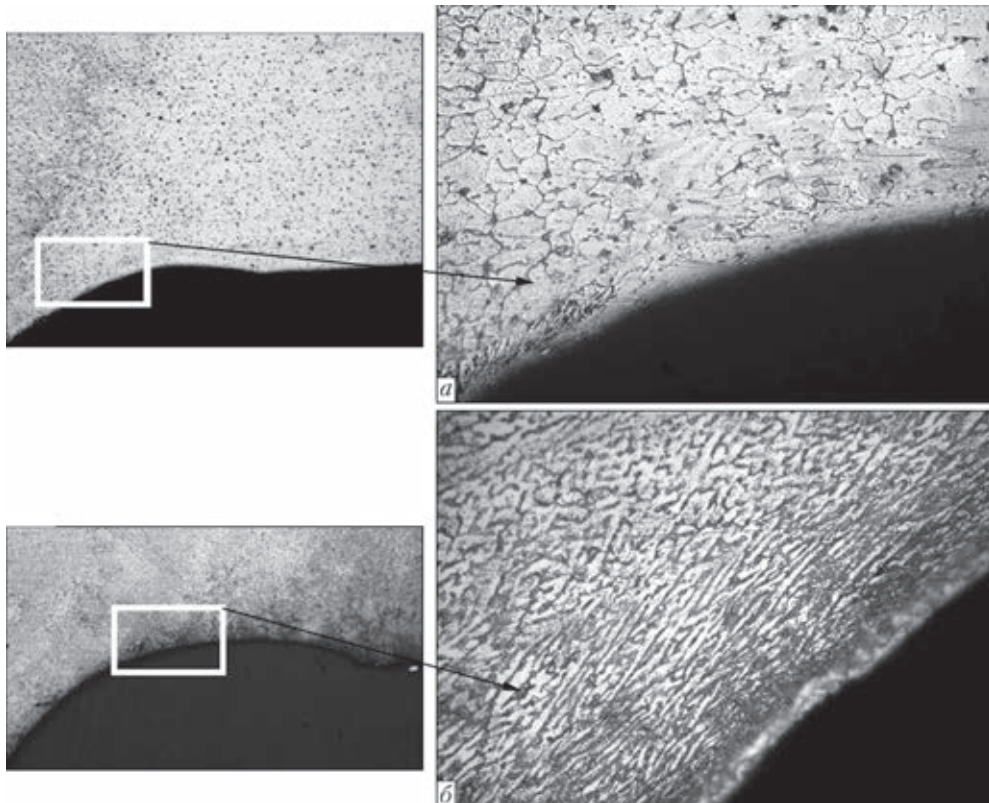


Рис. 5. Микроструктура приповерхностного слоя зоны перехода металла шва на основной металл с корневой стороны сплава Д16Т (а,  $\times 500$ ) и АМг6 (б,  $\times 400$ ) после ВМП (травлено)

сварных соединений. Значения ККН сварных соединений исследуемых сплавов после ВМП в соответствии с установленными параметрами обработки приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что снижение средних значений ККН в упрочненных соединениях при эффективных параметрах упрочнения может достигать до 1,5 раза. Такое снижение значений ККН (до 50 %) в упрочненных соединениях является важным фактором, способствующим повышению их сопротивления усталости.

Проведены металлографические исследования обработанной поверхности при увеличении до 500 раз в зоне перехода шва на основной металл сварных соединений исследуемых сплавов Д16Т и АМг6. По результатам исследования структуры упрочненного поверхностного слоя установлено, что трещины, сколы и расслоения в этом слое отсутствуют (рис. 5).

После ВМП зоны сплавления в приповерхностном слое соединений наблюдается изменение зеренной структуры на глубину до 250 мкм. При этом деформированные зерна вытянуты в плоскостях, параллельных касательной к обработанной поверхности. Измерения микротвердости металла шва, металла зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла соединения сплава АМг6 в исходном после сварки состоянии и после упрочнения ВМП этих зон показали, что ППД привело к увеличению твердости на глубине 50...60 мкм

металла шва на 65...75 %, металла ЗТВ — на 16...25 % и основного металла — на 22 % (рис. 6). Изменение структуры металла и повышение твердости в приповерхностных слоях после применения технологии ВМП показывают, что имеющие место структурный фактор и деформационное упрочнение, наряду с уменьшением значений ККН, могут оказывать положительное влияние на повышение сопротивления усталости соединений.

Методом тензометрирования проводили измерения остаточных напряжений в сварных пластинах сплава АМг6 размерами 300 $\times$ 300 $\times$ 2 мм в исходном после сварки состоянии и после ВМП

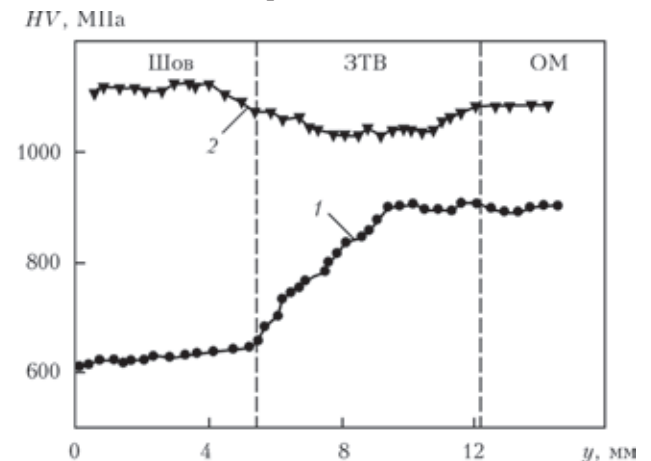


Рис. 6. Распределение микротвердости в сварном соединении сплава АМг6 в направлении, перпендикулярном шву на глубине 50...60 мкм (начало координат — в центре шва): 1 — микротвердость до ВМП; 2 — после ВМП



зоны сплавления. Полученные данные измерений ОСН вдоль стыкового шва на расстоянии 3 мм от зоны сплавления для соединений в исходном состоянии и после упрочнения приведены на рис. 7. Как видно из приведенных эпюр поперечные остаточные напряжения, действие которых совпадает с направлением прикладываемых внешних нагрузок, которые обуславливают концентрацию напряжений в зоне сплавления, незначительны. Их максимальное значение в средней части шва составляет всего 40 МПа, а после упрочнения эти напряжения снижаются еще на 23...30 %. Такие уровни напряжений существенного влияния на сопротивление усталости соединений не оказывают.

Усталостные испытания образцов основного металла и сварных соединений проводили на современной сервогидравлической машине MTS 318,25 с максимальным усилием 250 кН. Образцы корсетного типа (рис. 8) испытывали при заданных постоянных значениях размаха напряжений, отвечающих диапазону циклической долговечности  $5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений, при постоянной асимметрии цикла до полного разрушения. По результатам проведенных усталостных испытаний для каждой серии образцов на основе установленных экспериментальных данных ограниченных пределов выносливости строилась соответствующая кривая усталости (линия регрессии экспериментальных данных) в координатах  $2\sigma_a - \lg N$ .

На рис. 9 приведены экспериментальные данные, полученные по результатам испытаний на усталость четырех серий образцов сварных соединений сплава АМг6. Для асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma = 0$  ограниченный предел выносливости упрочненных ВМП зон сплавления стыковых соединений на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов увеличился на 27 % по сравнению с пределом выносливости сварных соединений в исходном после сварки состоянии. При этом циклическая долговечность соединений увеличилась в 4 раза. Эффективность проковки несколько снижается с возрастанием асимметрии цикла напряжений. Так, при  $R_\sigma = 0,4$  ограниченный предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений увеличился на 21 %. Эффективность упрочнения снижается и с возрастанием амплитуды приложенных напряжений и уже в области долговечностей ниже  $10^5$  циклов обработка ВМП практически не оказывает влияния как для отнулевого ( $R_\sigma = 0$ ), так и знакопостоянного ( $R_\sigma = 0,4$ ) переменного нагружения. Полученные экспериментальные данные сопротивления усталости упрочненных ВМП сварных соединений в многоциклового области повышаются до значений, близких соединениям со снятым усилением шва. Это свидетельствует о пер-

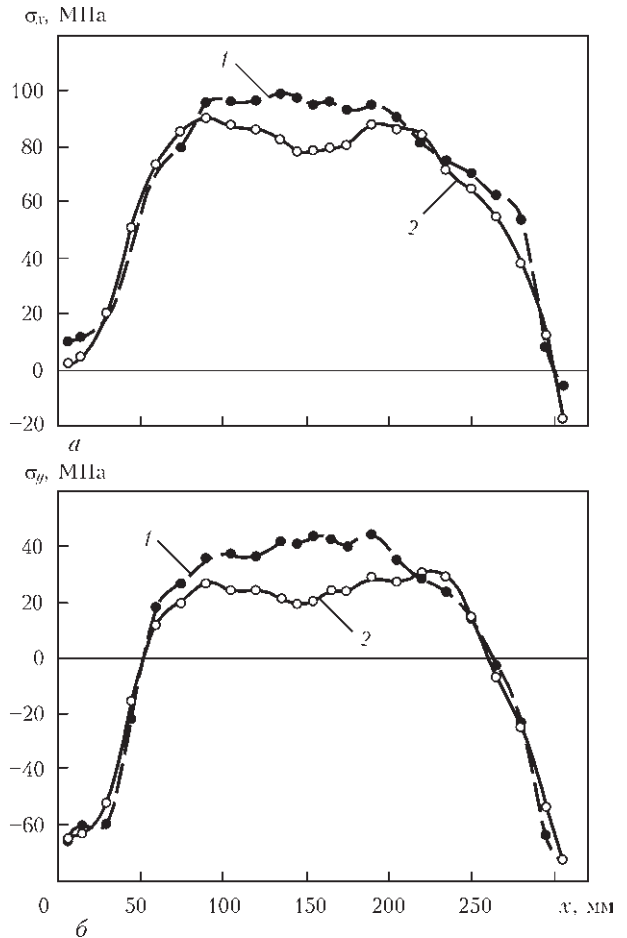


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений в сварных пластинах сплава АМг6 размерами  $300 \times 300 \times 2$  мм до (1) и после (2) обработки ВМП, измеренных в параллельных шву сечениях на расстоянии 3 мм от шва: а — продольные напряжения  $\sigma_x$ ; б — поперечные  $\sigma_y$

спективности применения малозатратной ВМП вместо трудоемкой общепринятой механической обработки.

Повышение сопротивления усталости упрочненных ВМП зон сплавления стыковых сварных соединений термически упрочняющегося сплава 6061-Т6 наблюдается во всей области долговечностей  $10^5 \dots 2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений (рис. 10). При этом их долговечность увеличивается до 7 раз по сравнению с исходным после сварки состоянием, а ограниченный предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов повысился на 40 %.

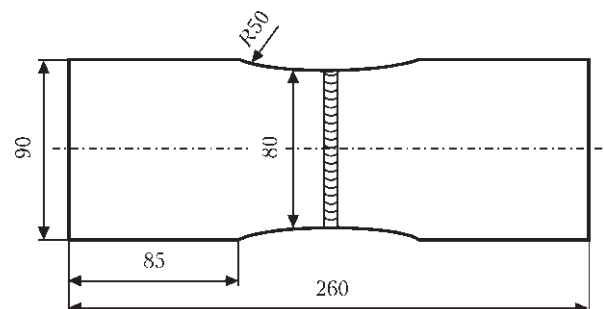


Рис. 8. Форма и геометрические размеры сварных образцов для усталостных испытаний

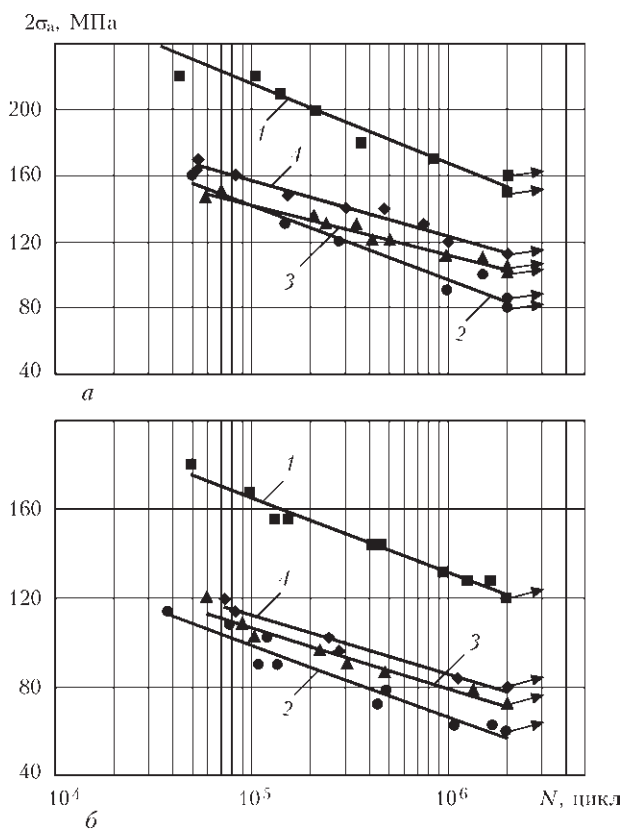


Рис. 9. Кривые усталости соединений сплава АМг6 толщиной 2 мм, отвечающие асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma = 0$  (а) и 0,4 (б): 1 — основной металл; 2 — сварные соединения в исходном состоянии; 3 — сварные соединения, упрочненные ВМП; 4 — сварные соединения с механической зачисткой усиления шва

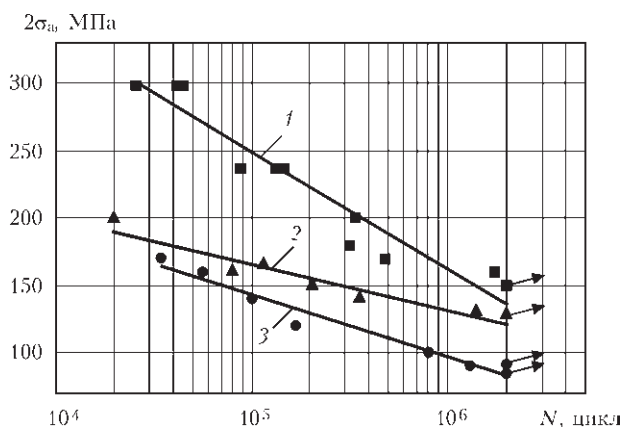


Рис. 10. Кривые усталости соединений сплава 6061-Т6 толщиной 2 мм, отвечающие асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma = 0,1$ : 1 — основной металл; 2 — сварные соединения в исходном состоянии; 3 — сварные соединения, упрочненные ВМП

Ограниченный предел выносливости стыковых сварных соединений высокопрочного алюминиевого сплава Д16Т на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений с асимметрией  $R_\sigma = 0,1$  после ВМП зоны перехода металла шва к основному металлу повысился на 30 % по сравнению с соединениями в исходном после сварки состоянии, а циклическая долговечность соединений увеличилась в 5 раз (рис. 11, а). Как и для сплава АМг6 при

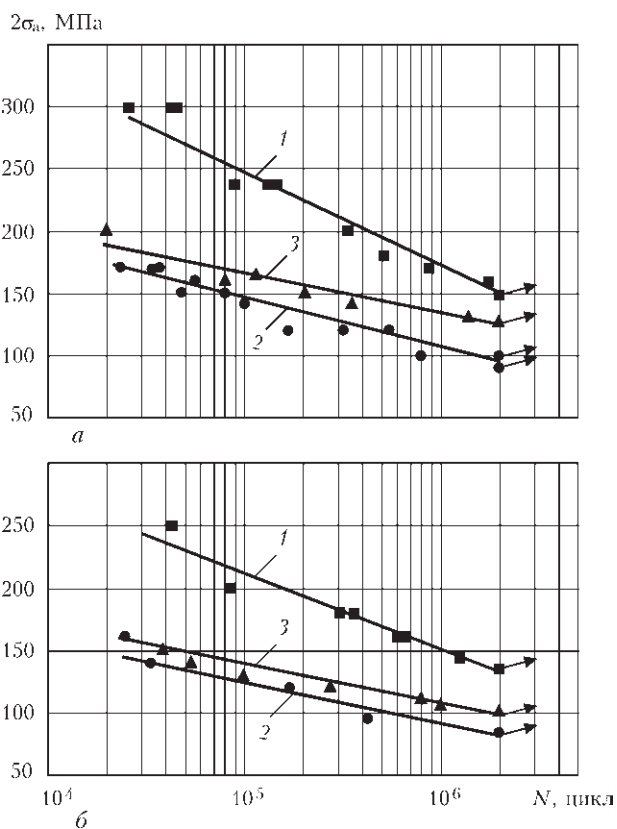


Рис. 11. Кривые усталости стыковых соединений сплава Д16Т толщиной 2 мм, отвечающие асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma = 0,1$  (а) и 0,4 (б): 1 — основной металл; 2 — сварные соединения в исходном состоянии; 3 — сварные соединения, упрочненные ВМП

возрастании асимметрии цикла напряжений эффективность упрочнения ВМП снижается. Так, при  $R_\sigma = 0,4$  ограниченный предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов увеличился только на 13 %, а циклическая долговечность при этом увеличилась в 3 раза (рис. 11, б).

Полученные результаты показывают, что упрочнение технологий ВМП зон сплавления тонколистовых стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов АМг6, Д16Т и 6061-Т6 может существенно повысить их циклическую долговечность.

### Выводы

1. Установлены и оценены параметры швов стыковых сварных соединений сплава Д16Т, АМг6 и 6061-Т6 толщиной 2 мм, впервые полученные по отработанной технологии ИДСПЭ в инертных газах в исходном состоянии и после упрочнения ВМП.

2. Исследован характер распределения остаточных напряжений при сварке ИДСПЭ в инертных газах тонколистовых ( $\delta = 2$  мм) алюминиевых сплавов средней и высокой прочности. Показано, что продольные к шву максимальные значения остаточных напряжений растяжения достигают



$(0,4 \dots 0,5)\sigma_{0,2}$ , а поперечные остаточные напряжения, действующие, как правило, вдоль направления приложения внешнего силового нагружения, в два раза ниже  $(0,2 \dots 0,25)\sigma_{0,2}$ .

3. Установлены эффективные параметры упрочнения технологий ВМП тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов средней и высокой прочности. Диапазон линейной скорости перемещения рабочего инструмента при проведении ВМП составляет 7...9 мм/с, диаметр бойка соответственно 3 и 2 мм для лицевой и корневой сторон шва. При таких параметрах обеспечивается поверхностное пластическое деформирование металла в обрабатываемой зоне соединений без нарушения их геометрической формы на глубину 0,23...0,28 мм. Применение ВМП зоны сплавления стыковых сварных соединений приводит к снижению поперечных остаточных напряжений растяжения вблизи шва на 20...50 %. При этом в зонах концентраторов напряжений стыковых соединений значения ККН снижаются в 1,35...1,49 раза, а его абсолютные значения находятся в диапазоне 1,13...1,27 для исследуемых сплавов.

4. Экспериментально обоснована эффективность упрочнения ВМП зон сплавления тонколистовых стыковых соединений алюминиевых сплавов с целью повышения их циклической долговечности. Установлено, что в многоцикловой области  $5 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений долговечность упрочненных соединений сплава Д16Т увеличивается в 5 раз, для сплава АМгб — в 4 раза и для сплава 6061-Т6 — в 7 раз по сравнению с исходным после сварки состоянием.

5. Экспериментально установлено, что предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов перемен напряжений тонколистовых стыковых соединений алюминиевого сплава АМгб, упрочненных технологией ВМП, достигает уровня предела выносливости соединений со снятыми выпуклостями шва, что на 20 % выше предела выносливости необработанных соединений. Поэтому технологию ВМП с установленными параметрами можно рекомендовать для упрочнения таких соединений вместо

более затратной и технологически сложно выполняемой механической зачисткой шва.

1. *Елагин В. И.* Конструкционные наноструктурные сплавы на алюминиевой основе // Цвет. металлы. – 2009. – № 6. – С. 103–111.
2. *Филатов Ю. А.* Деформируемые сплавы на основе систем Al–Mg–Sc // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1996. – № 6. – С. 33–36.
3. *Фридляндер И. Н., Белецкий В. М., Кривов Г. А.* Алюминиевые сплавы в авиационных конструкциях // Технологические системы. – 2000. – № 1 (3). – С. 5–17.
4. *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур, В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая.* – Киев: Екотехнологія, 2006. – 112 с.
5. *Ищенко А. Я., Лабур Т. М.* Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов. – Киев: Наук. думка, 2013. – 416 с.
6. *Влияние режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АДО на форму и пористость швов / В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко, П. П. Шейко // Автомат. сварка.* – 1991. – № 4. – С. 57–60.
7. *Повышение сопротивления усталости тавровых сварных соединений тонколистового алюминиевого сплава АМгб / В. А. Шонин, В. С. Машин, О. В. Войтенко, В. В. Новожилов // Там же.* – 2003. – № 7. – С. 9–13.
8. *Влияние режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АДО на форму и пористость швов / В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко, П. П. Шейко // Там же.* – 1991. – № 4. – С. 57–60.
9. *Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом крупногабаритных конструкций из алюминиевых сплавов / О. С. Островский, А. В. Гудко, О. Н. Кудряшев и др. // Свароч. пр-во.* – 1992. – № 10. – С. 7–9.
10. *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.
11. *Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне тонколистовых алюминиевых сплавов / В. С. Машин, В. А. Шонин, М. П. Пашуля, И. Н. Клочков // Там же.* – 2010. – № 5. – С. 49–53.
12. *Труфяков В. И.* Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1990. – 253 с.
13. *Стаканов В. И., Костылев В. И., Рыбин Ю. К.* Концентрация напряжений в стыковых сварных соединениях // Автомат. сварка. – 1987. – № 11. – С. 19–23.
14. *Кархин В. А., Копельман Л. А.* Концентрация напряжений в стыковых соединениях // Свароч. пр-во. – 1976. – № 2. – С. 6–7.
15. *Colchen D.* Application des calculs aux elements finis pour definir et valider des modeles analytiques de calcul de contrainte sur un assemblage bout a bout en alliage d'aluminium // Soudage et techniques connexes. – 2000. – 54, 3/4. – С. 3–16.
16. *Контроль напряжений на основе использования подповерхностных акустических волн / О. И. Гуца, В. Н. Смиленко, В. Г. Кот и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль.* – 2009. – № 1. – С. 11–13.

Поступила в редакцию 21.01.2014