



ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. ТРУФЯКОВ**, **В. А. ШОНИН**, **В. С. МАШИН**, кандидаты техн. наук,
Д. С. РОМАНОВСКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Для повышения сопротивления усталости сварных стыковых соединений алюминиевого сплава АМгб границы шва образцов толщиной 12 мм подвергали высокочастотной проковке. Показано, что эффективность обработки зависит от мощности ультразвукового генератора и преобразователя, применяемых для возбуждения колебаний группы игольчатых бойков, и диаметра бойков. Лучшие результаты получены при использовании ультразвуковой установки с потребляемой мощностью 0,3 кВт и трех бойков диаметром 5 мм — для области знакопеременных напряжений ($R_{\sigma} = -1 \dots 0$), а также четырех бойков диаметром 2 мм — для области однозначных напряжений ($R_{\sigma} > 0$).

Ключевые слова: сварные соединения, алюминиевые сплавы, сопротивление усталости, поверхностный наклеп, остаточные напряжения

Существенным недостатком сварных соединений алюминиевых сплавов является их низкое сопротивление усталостным разрушениям. Как следует из [1], циклическая долговечность сварных соединений алюминиевых сплавов составляет лишь 40 % от соответствующего показателя соединений конструкционных сталей. Поэтому сварные алюминиевые конструкции в большей степени, чем стальные, нуждаются в послесварочных обработках.

Как известно, способы послесварочных обработок для повышения сопротивления усталости соединений основываются на снижении концентрации напряжений, создаваемой формой соединения, либо на изменении знака или значений остаточных напряжений в зоне соединения. К первой группе можно отнести следующие способы: полное механическое снятие выпуклостей стыкового шва до уровня поверхности основного металла; шлифование поверхности в зоне перехода шва на основной металл; ТИГ-обработку; лазерную обработку. Эти способы обработки (за исключением лазерной) широко применяются на практике. Наиболее эффективным из них является способ, предусматривающий полное снятие выпуклостей шва механической обработкой с последующим шлифованием поверхности соединения. При его качественном выполнении и отсутствии дефектов в шве можно добиться повышения сопротивления усталости соединения до уровня циклической прочности основного металла. Однако это весьма дорогостоящий способ. При определении эффективности других способов обработки его используют в качестве базового.

Ко второй группе относятся следующие способы: молотковый наклеп; игольчатый наклеп; дробеструйная обработка; обработка щетками; статическая перегрузка; термическая обработка для снятия остаточных сварочных напряжений. Данные об их эф-

фективности, полученные различными исследователями, приведены в работе [1], а также в [2–4] (по-видимому, имеются и другие источники).

Одним из способов наведения сжимающих остаточных напряжений поверхностным наклепом является ультразвуковая ударная обработка (УУО). Этот способ повышения сопротивления усталости соединений разработан Государственным научно-производственным предприятием «Квант» (г. Северодвинск, Россия) и ИЭС им. Е. О. Патона [5, 6 и др.]. При его использовании в отличие от иных способов пластическому деформированию подвергается не все сварное соединение, а только его поверхность в узкой зоне перехода от шва на основной металл. После такого способа обработки наблюдается увеличение и стабилизация радиуса сопряжения указанного участка по всей длине шва, существенно снижается концентрация напряжений, уменьшается шероховатость поверхности, достигается предельный уровень сжимающих остаточных напряжений в зоне концентратора. Если придерживаться приведенной выше классификации обработок, то этот способ занимает промежуточное положение между молотковым и игольчатым наклепами. Он отличается от них тем, что поверхностная проковка узкой зоны металла выполняется группой ударных бойков сравнительно небольшого диаметра, расположенных в ряд. Бойки приводятся в обратнопоступательное движение с высокой частотой с помощью преобразователя ультразвуковых колебаний. В то же время поверхность металла обрабатывается бойками с частотой, ниже ультразвуковой. По этой причине такой способ обработки следует именовать высокочастотной проковкой.

Разработанная технология УУО для повышения сопротивления усталости сварных соединений конструкционных сталей и созданное для этой цели оборудование позволили добиться большей эффективности по сравнению с другими способами обработки, основанными на применении поверхностного наклепа [7]. Особенно это относится к сталям высокой и повышенной прочности. Меньше внимания



Таблица 1. Технические характеристики установок для высокочастотной проковки (паспортные данные)

Оборудование и инструмент	«Квант», Севмашвуз, Межотраслевая научно- технологическая лаборатория, г. Северодвинск, Россия, 1990 г.	«Ультрамет», г. Киев, Украина, 1995 г.
Ультразвуковой генератор:		
Тип	ПУ-1,2-27	ТУЗГ
Напряжение питающей сети, В	380 (трехфазный ток)	220 (однофазный ток)
Потребляемая мощность, кВт	1,8	0,3
Регулировка выходной мощности генератора, кВт	0,6–0,8–1,0–1,2	—
Масса корпуса с генератором, кг	160,0	4,5
Ручной ударный инструмент:		
Тип преобразователя	Магнетострикционный	Пьезокерамический
Частота волновода, кГц	26,5...28,0	19,5...22,5
Амплитуда колебаний торца волновода, мкм	24...40	14...22
Охлаждение	Водяное	Без принудительного охлаждения
Масса, кг	3,4	2,5
Наконечник с бойками (сменный):		
Количество игл-бойков, шт.	До 4	До 4
Диаметр иглы-бойка, мм	2...4	2...5
Длина иглы-бойка, мм	15...25	15...25
Радиус сферы торцевой поверхности иглы-бойка, мм	2...4	2...5

уделялось разработке технологии УУО применительно к соединениям алюминиевых сплавов. Использование режимов УУО для стальных конструкций, не приводит к адекватным результатам в случае алюминиевых сплавов. Примером могут служить результаты исследований, выполненных Институтом сварки Франции. Испытания на усталость показали, что УУО способствовала повышению предела выносливости (на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений) угловых соединений стали E460 на 73, стыковых соединений стали E690 на 74, угловых соединений стали E690 на 192, стыковых соединений алюминиевого сплава 6061T6 только на 21 % [2].

Следует отметить, что во всех ранее проведенных исследованиях оценка эффективности выполнялась преимущественно при коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = 0,1$ (реже при $R_\sigma = -1$). Известно, однако, что в области однозначных переменных напряжений (при $R_\sigma > 0$) эффективность обработок, основанных на изменении уровня остаточных напряжений, может существенно понижаться с возрастанием значений R_σ . Это относится и к УУО [8].

Цель данной работы — установить эффективные режимы УУО стыковых соединений алюминиевого сплава АМг6 с учетом влияния асимметрии цикла переменного нагружения.

Методика проведения исследований. Оценку эффективности высокочастотной проковки выполняли путем сопоставления результатов испытаний на усталость трех видов образцов стыковых сварных соединений: в исходном состоянии после сварки; обработанных механически (выпуклости швов срезали фрезерованием до уровня основного метал-

ла, затем соединение шлифовали); прошедший высокочастотную проковку (рис. 1).

Все образцы были изготовлены из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 12 мм и имели $\sigma_B = 366$ МПа и $\sigma_{0,2} = 174$ МПа. Сварку образцов выполняли двусторонним швом (ГОСТ 14806–80) плавящимся электродом СвАМг6 диаметром 2 мм МИГ-сваркой в аргоне и гелии. Заготовки образцов шириной 75...85 мм сваривали в пакетах по 4...5 шт. в зажатом состоянии. Угол двусторонней разделки составлял 70° с притуплением 5 мм. Сварку производили с использованием источника постоянного тока ВДУ-506 и аппарата А1431 на следующем режиме: сварочный ток $I_{св} = 320$ А; напряжение дуги $U_d = 34$ В; скорость подачи проволоки $v_{п.пр} = 1,236 \cdot 10^{-1}$ м/с; расход аргона составлял $1,67 \cdot 10^{-3}$, а гелия — $1,67 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Чтобы выявить лучший режим проковки, образцы третьего вида отличались между собой интенсивностью наклепа и другими параметрами обработки. Было важно снизить потребляемую мощность ударного инструмента по сравнению с используемой для обработки стальных соединений. С этой целью, кроме обычно применяемой для УУО установки «Квант», имеющей выходную мощность ударного инструмента 0,6...1,2 кВт, была опробована установка «Ультрамет» с потребляемой мощностью 0,3 кВт, технические характеристики которых приведены в табл. 1.

Интенсивность проковки применяемого оборудования устанавливали на пластинах сплава АМг6 размером 50×50 мм и толщиной 8 мм. За критерий оценки интенсивности проковки принимали вы-

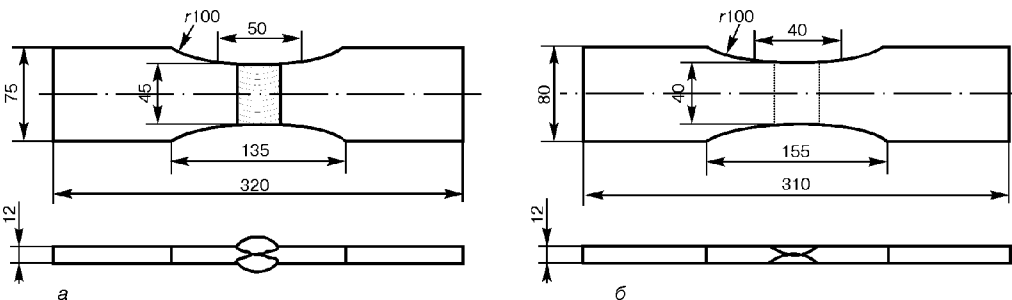


Рис. 1. Образцы стыковых сварных соединений в исходном состоянии после сварки без обработки (а), со снятой выпуклостью шва, а также после высокочастотной проковки (б)

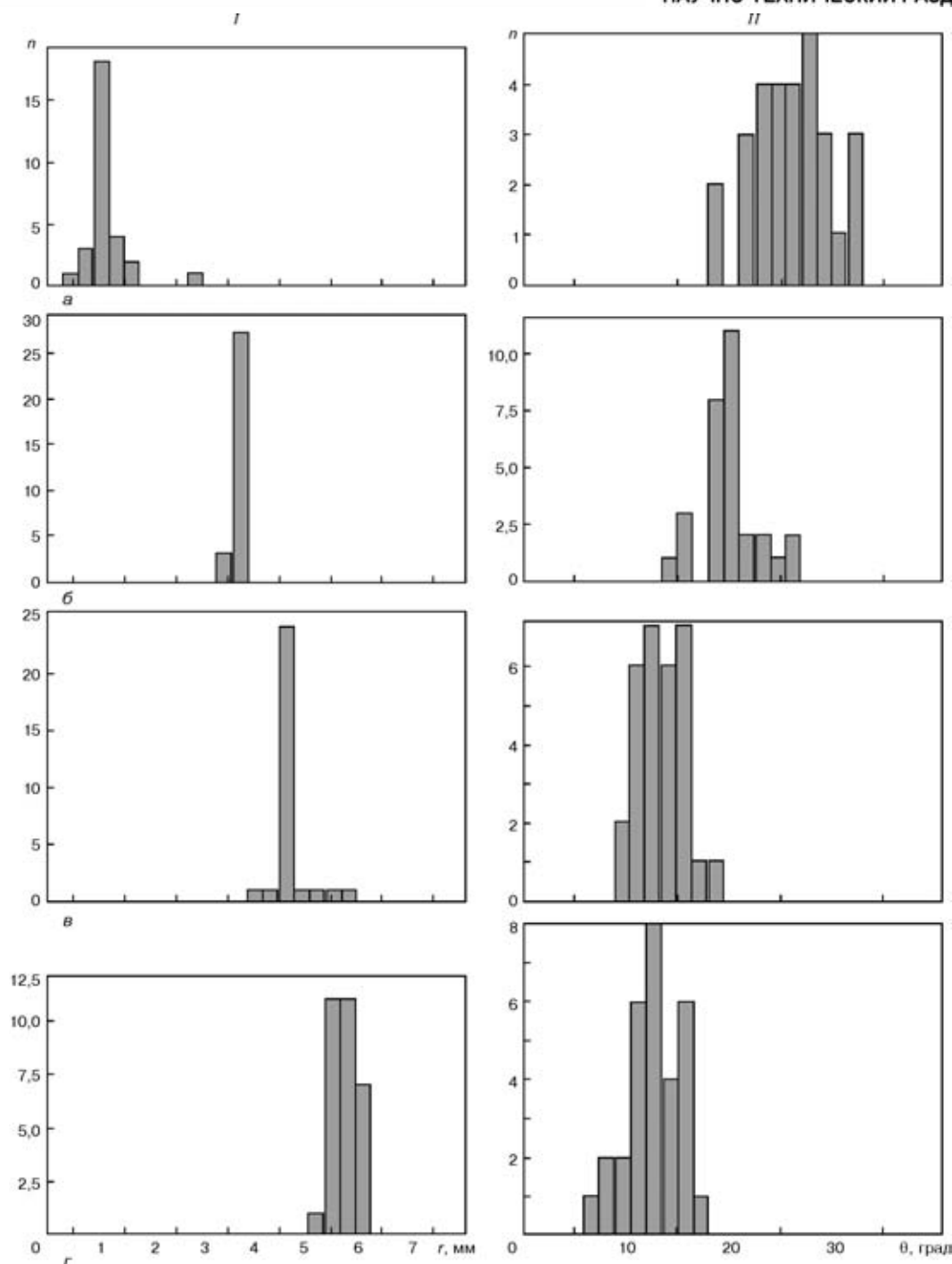


Рис. 2. Влияние технологии высокочастотной проковки на параметры профиля границ шва — радиуса перехода шва на основной металл $r(I)$ и угла их сопряжения $\theta(II)$: a — исходное состояние; b — обработка на режиме 1; $c-d$ — то же на режиме соответственно 2 и 3; n — частота событий

соту выпучивания (относительно плоскости, ограниченной окружностью радиусом 19 мм), образуемую при наклепе поверхности пластины [9]. Перед проковкой для снятия остаточных напряжений пластины отжигали при $T = 310$ °С. Поверхность пластин для проковки ограничивали окружностью радиусом 22 мм. Время проковки (80 с) было установлено экспериментально до полного равномерного покрытия отпечатками бойков диаметром 2 мм. Высоту выпучивания пластин замеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Высокочастотную проковку выполняли на трех режимах. *Режим 1*: потребляемая мощность генератора — 0,3 кВт (установка «Ультрамет»); частота колебаний — 19,5... 22,5 кГц; амплитуда колебаний выходного торца волновода — 14... 22 мкм; диаметр бойков — 2 мм; количество бойков — 4 шт.; скорость перемещения инструмента — $7 \cdot 10^{-3}$ м/с. *Режим 2*: выходная мощность генератора — 1,0 кВт (установка «Квант»); частота колебаний — 26,5... 28,0 кГц; амплитуда колебаний выходного торца волновода — 24... 40 мкм; диаметр бойков — 3 мм; количество бойков — 4 шт.; скорость перемещения инструмента — $6 \cdot 10^{-3}$ м/с. *Режим 3*: пот-

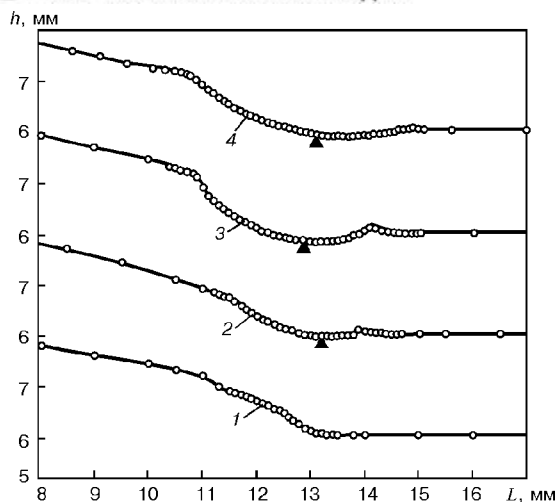


Рис. 3. Профилотграммы сварного соединения на участке L в зоне концентратора напряжений: 1 — исходное состояние; 2–4 — после высокочастотной проковки границ шва соответственно на режимах 1–3

ребляемая мощность генератора — 0,3 кВт (установка «Ультратет»); частота колебаний — 19,5...22,5 кГц; амплитуда колебаний выходного торца волновода — 14...22 мкм; диаметр бойков — 5 мм; количество бойков — 3 шт.; скорость перемещения инструмента — $5 \cdot 10^{-3}$ м/с.

При проковке достигались увеличение и стабилизация радиуса перехода шва на основной металл по всей длине стыкового соединения. Как показали измерения, он равнялся примерно радиусу торцевой поверхности бойка. Измерения радиуса перехода шва на основной металл r и угла их сопряжения θ определяли с помощью слепков из пластифицированной массы в случайно выбранных образцах, подлежащих затем усталостным испытаниям. Каждый слепок длиной, равной протяженности шва, разрезался на 15...16 частей размером по 3 мм каждая. Параметры r и θ в каждой части на срезах измеряли инструментальным микроскопом БМИ-1. По результатам замеров были построены гистограммы (рис. 2). Если в исходном состоянии значения r изменялись от 0,8 до 2,8 мм, а θ — от 19 до 33°, то после высокочастотной проковки эти параметры существенно стабилизировались. Дополнительно профиль выпуклости шва в исходном состоянии и после обработки определяли с помощью профилометра с ценой деления индикатора 0,01 мм и микрометрического винта с шагом 0,005 мм. Эти измерения выполняли только посередине образцов. Результаты измерений (рис. 3) совпали с полученными на слепках. Замеры радиуса перехода на основной металл и угла их сопряжения, а также параметры формы швов (высота h и ширина b) позволили установить средние значения и среднеквадратичные отклонения коэффициента концентрации напряжения α_σ исследуемых соединений в исходном состоянии и после обработки (рис. 4). В зависимости от принимаемого диаметра бойков значения коэффициента α_σ уменьшались на 26...37, а дисперсия — на 85...95 %.

Испытания на усталость образцов проводили на электрогидравлической машине УРС-20 при переменном осевом нагружении в мягком режиме с час-

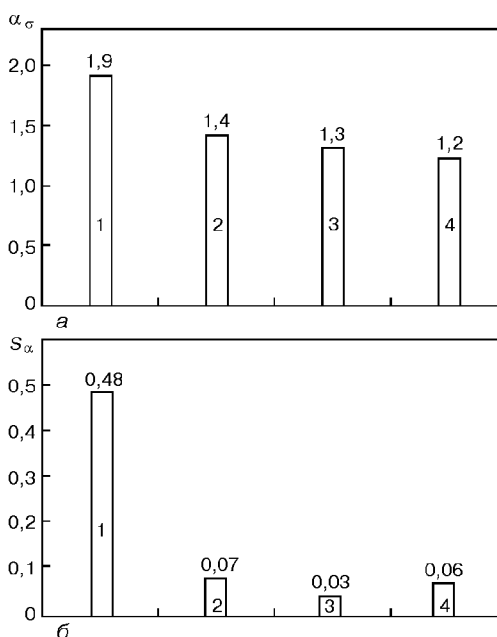


Рис. 4. Влияние технологии обработки на средние значения (а) и среднеквадратичные отклонения S_{α_σ} (б) коэффициента концентрации напряжения α_σ сварных соединений пластин сплава АМг6 толщиной 12 мм (1–4 — см. обозначения рис. 3)

тотой 5...6 Гц. Точность показаний нагружения составляла ± 1 %. Образцы каждого вида испытывали до полного разрушения при симметричном ($R_\sigma = -1$), отнулевом ($R_\sigma = 0$) и асимметричном ($R_\sigma = 0,4$) циклах переменного нагружения. Поскольку основной целью работы являлось установление эффективных режимов обработки, база испытаний была ограничена $1 \cdot 10^6$ циклами. Испытания выполняли при количестве циклов N перемен напряжений от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^6$. В этом интервале N испытывали образцы всех 15 серий (в среднем по 3 образца в серии). При этом во внимание не принимались результаты испытаний образцов, разрушение которых начиналось на уровне возникновения пор или оксидных включений (плен). Всего было испытано на усталость 56 образцов.

Результаты исследований. Результаты испытаний на усталость образцов всех серий представлены на рис. 5. Повышение сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевого сплава АМг6 после высокочастотной проковки по сравнению с соответствующим показателем соединения в исходном состоянии, наблюдали на всех режимах обработки и при всех значениях коэффициента асимметрии цикла. В зависимости от режима обработки наибольшее (73...109 %) повышение отмечалось при симметричном цикле напряжений, наименьшее (20...45 %) — при отнулевом цикле. Пределы ограниченной выносливости при симметричном σ_{-1} и отнулевом σ_0 циклах нагружения значительно возрастали с увеличением диаметра бойков от 2 до 5 мм. Изменение интенсивности наклепа, обусловленное увеличением мощности генератора, не оказало заметного влияния на пределы ограниченной выносливости при применении бойков диаметром 2 и 3 мм. Достигнутые результаты при высокочастотной проковке превышали соответствующий показатель сопротивления усталости соединения со снятой

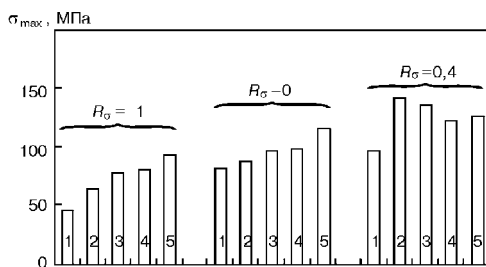


Рис. 5. Изменение значений предела ограниченной выносливости σ_{max} при $N = 1 \cdot 10^6$ в зависимости от технологии обработки соединения и асимметрии цикла переменных напряжений: 1 — без обработки; 2 — обработанные механически; 3–5 — соответственно обработанные на режимах 1–3

Таблица 2. Зависимость интенсивности проковки от размеров и количества бойков, времени обработки и мощности применяемой установки

Диаметр бойков, мм	Количество бойков, шт.	Время обработки, с	Высота выпучивания, мм	
			«Ультрамет» (0,3 кВт)	«Квант» (1,0 кВт)
2	4	80	0,06	0,13
		160	0,08	0,31
		240	0,09	0,48
3	4	80	0,05	0,25
		160	0,10	0,42
		240	0,14	0,52
5	3	80	0,08	—
		160	0,12	—
		240	0,15	—
		400	0,17	—

выпуклостью стыкового шва. Наилучшие результаты были получены на режиме 3.

Иная картина наблюдалась в области однозначных переменных напряжений ($R_\sigma = 0,4$). Циклическая долговечность образцов после высокочастотной проковки была ниже, чем у образцов со снятой выпуклостью стыкового шва. Увеличение диаметра бойков от 2 до 5 мм при неизменной (0,3 кВт) мощности генератора не привело к возрастанию предела ограниченной выносливости, как это имело место при знакопеременных напряжениях, а увеличение (до 1000 Вт) выходной мощности генератора при диаметре бойков 3 мм заметно снизило эффективность проковки. При $R_\sigma = 0,4$ лучший результат был получен на режиме 3, характеризующимся малой интенсивностью проковки. Предел ограниченной выносливости образцов, обработанных на режиме 3, равный 136 МПа, лишь на 4 % ниже аналогичного показателя образцов со снятой выпуклостью стыкового соединения (142 МПа). Повышенное сопротивление усталости по сравнению с исходным состоянием составляло 42 %.

Таким образом, наибольшая циклическая долговечность стыковых соединений пластин алюминиевого сплава АМг6 толщиной 12 мм в области

In order to improve the fatigue resistance of butt welded joints on aluminium alloy AMg6, the boundaries of welds on 12 mm thick samples were subjected to high-frequency peening. It is shown that treatment effectiveness depends on the power of ultrasonic generator and converter applied for excitation of vibrations in an array of needle-shaped pins and on pin diameter. The best results were obtained, using an ultrasonic unit of 300 W consumed power with three pins of 5 mm diameter for the region of alternating stresses ($R_\sigma = -1 \dots 0$) and four pins of 2 mm diameter — for the region of stresses of a constant sign ($R_\sigma > 0$).

знакопеременных напряжений достигается при использовании установки «Ультрамет» мощностью 0,3 кВт и диаметре бойков 5 мм, а в области однозначных переменных напряжений — на установке той же мощности и диаметре бойков 2 мм.

Выводы

1. Высокочастотную проковку сварных швов в зонах перехода на основной металл с целью повышения сопротивления усталости соединений алюминиевых сплавов следует выполнять с меньшей интенсивностью наклепа, чем при обработке аналогичных соединений конструкционных сталей.

2. Эффективность высокочастотной проковки изменяется в зависимости от асимметрии цикла переменного нагружения. С повышением коэффициента асимметрии цикла эффективность снижается. Режимы обработки должны выбираться с учетом влияния асимметрии цикла или уровня переменного нагружения.

3. Применительно к стыковым соединениям алюминиевого сплава АМг6 толщиной 8... 12 мм наилучшие результаты были получены при использовании установки «Ультрамет» с потребляемой мощностью 0,3 кВт. В области знакопеременных напряжений рекомендуется применять бойки диаметром 5 мм, а в области однозначных напряжений ($R_\sigma > 0$) — диаметром 2 мм.

1. *Hobbacher A.* Effect of improving methods on the fatigue strength of welded aluminium joints. — S. l., [1991]. — 15 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1415).
2. *Improvement of fatigue strength in welded joints (in HSS and in aluminium alloy) by ultrasonic hammer peening* / J. Janosch, H. Koneczny, S. Debiez et al. — S. l., [1995]. — 24 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW XIII-1594-95).
3. *Ahmed N. U., Jarvis B. L., Viano D. M.* High-current GTA welding // Australasian Welding J. — 1995. — № 1. — P. 14-16.
4. *Calcraft R. C., Schumann G. O., Viano D. M.* Fatigue of marine grade aluminium alloys // Ibid. — 1997. — № 1. — P. 22-25.
5. *Эффективность применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений* / П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 4-7, 15.
6. *Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций ультразвуковой ударной обработкой* / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, Е. Ш. Статников и др. — Киев, 1989. — [4 с.]. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 32).
7. *The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints* / V. L. Trufiyakov, E. S. Statnikov, P. P. Mikheev, A. S. Kuzmenko. — S. l., [1998]. — 12 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1745).
8. *Труфяков В. И.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 1. — С. 11-19.
9. *Hertel H.* Ermudungsfestigkeit der Konstruktionen. — Berlin: Springer-Verl., 1969. — 659 S.

Поступила в редакцию 16.11.2000