



МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМГ6, ВЫПОЛНЕННЫХ В СРЕДЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА

В. А. ШОНИН, канд. техн. наук, А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты экспериментальных исследований сопротивления малоциклового усталости стыковых соединений сплава АМГ6 толщиной 6 мм при осевом отнулевом нагружении в зависимости от геометрии выпуклости шва, обусловленной способами сварки TIG и MIG. Обоснована возможность оценки предела ограниченной выносливости стыковых соединений по параметру отношения высоты выпуклости к ширине шва, который имеет удовлетворительную корреляцию с расчетным коэффициентом концентрации напряжений на границах шва.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка в защитных газах, неплавящийся и плавящийся электроды, стыковое соединение, сопротивление усталости, выпуклость шва, внутренние дефекты шва, концентрация напряжений

Одним из основных факторов, определяющих низкие значения сопротивления усталости стыковых сварных соединений по сравнению с основным металлом, является концентрация напряжений на границах шва [1–6]. Она преимущественно зависит от таких локальных параметров профиля выпуклости шва, как радиус [3] и угол сопряжения поверхностей наплавленного и основного металла [4]. Контроль за этими параметрами в сварных соединениях является весьма трудоемкой операцией [7, 8].

Внешние параметры профиля — ширина шва и высота его выпуклости, которые регламентируются стандартами на сварные стыковые соединения и контролируются при изготовлении конструкций, влияют на прочность шва при статическом нагружении [1, 2, 4] и учитываются при оценке класса качества сварного соединения [9 и др.].

Механическое снятие выпуклой части шва до уровня поверхности основного металла для устранения концентрации напряжений приводит к заметному снижению статической прочности и не всегда обеспечивает повышение сопротивления усталости сварного стыкового соединения. Это обусловлено более низкими характеристиками прочности металла шва, по сравнению с основным металлом, а также наличием внутренних дефектов [1, 2, 4, 5, 10, 11]. Очевидно, в этом случае выпуклая часть шва является необходимым конструктивным элементом. Выбор способа и режима дуговой сварки исходя из параметров выпуклости шва, при которых обеспечиваются высокие значения сопротивления усталости и статической прочности соединения, является актуальной задачей.

Известно [12–15], что формообразование выпуклости стыкового шва зависит прежде всего от ширины зоны проплавления, количества расплавленного основного и присадочного металла, а также от давления дуги, теплофизических характеристик расплавленного металла, силы тяжести и капиллярных сил. Влияние этих факторов на выпуклость

шва предопределяется режимом сварки, подготовкой свариваемых кромок и пространственным положением сварочной ванны.

Все параметры профиля выпуклости шва, обусловленные процессом сварки, взаимосвязаны между собой. Так, радиус r и угол θ сопряжения поверхностей шва и основного металла связаны зависимостью $r = f(1/\theta)$ [12, 13], а угол θ находится в прямо пропорциональной зависимости с высотой выпуклости h и в обратно пропорциональной — с шириной шва b [15]. При этом отношение параметров h/b используют в качестве обобщенного параметра внешней формы профиля шва в стыковом соединении [3]. Учитывая, что коэффициент концентрации напряжений α_σ и отношение h/b являются функциями одних и тех же параметров, а именно, $\alpha_\sigma = f(r, \theta)$ и $h/b = \varphi(r, \theta)$, величину α_σ можно представить как $\alpha_\sigma = f[\varphi_1(h/b)] = F(h/b)$. Эта зависимость может служить основой при выборе по параметрам профиля выпуклости технологии сварки, обеспечивающей оптимальные значения коэффициента концентрации напряжений и сопротивления усталости стыковых соединений.

Цель работы — установить характеристики сопротивления усталости сварных стыковых соединений алюминиевого сплава в зависимости от геометрии выпуклости шва при различных способах сварки и экспериментально обосновать возможность использования внешних параметров выпуклости шва для оценки сопротивления усталости.

Методика исследований. Исследовали пластины из алюминиевого сплава АМГ6 толщиной 6 мм. Две пластины размером 100×300 мм² сваривали встык швом длиной 300 мм за один проход на подкладке, без разделки кромок, с зазором 1...2 мм неплавящимся (TIG) и плавящимся (MIG) электродами по шести различным вариантам (табл. 1). Перед сваркой кромки стыка зачищали шабером.

При сварке TIG применяли защитный газ аргон (его расход составлял 3,3 м³/с), неплавящийся электрод диаметром 8 мм и присадочную проволоку СвАМГ6 диаметром 2 мм. Сварку по варианту 1 производили переменным током от источника питания дуги УДГ-501, по варианту 2 — импульсным симметричным, а по варианту 3 — импульсным разно-



полярным асимметричным током прямоугольной формы от источника И-126.

При сварке MIG использовали проволоку СвАМг6 диаметром 1,6 мм. В случае вариантов 4 и 5 применяли постоянный ток при обратной полярности от источника питания дуги ВДУ-504, а в варианте 6 — импульсный ток с частотой 100 Гц от источника ИУП-1. В варианте 4 использовали смесь защитных газов 2,5 м³/с Ar + 7,5 м³/с He, а в вариантах 5 и 6 — только аргон, расход которого составлял 2,5 м³/с.

Было сварено 17 пластин размером 200×300 мм². После сварки выпуклость шва с обратной стороны соединения зашлифовывали до уровня поверхности основного металла. Сваренные пластины разрезали механическим способом поперек шва на заготовки образцов шириной 50 мм и длиной 200 мм с последующим фрезерованием боковых поверхностей в зоне сварного соединения. После фрезерования по длине 40 мм ширина рабочей зоны образца составляла 40 мм с радиусом R = 30 мм перехода к захватным участкам.

Геометрию профиля сварного соединения в образцах измеряли профилометром, оснащенный индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм и микрометрическим винтом с ценой деления 0,005 мм по методике, описанной в работе [8]. С помощью компьютерной обработки данных измерений определяли значения ширины и высоты выпуклости шва, а также радиуса и угла сопряжения поверхностей сварного соединения с основным металлом.

Исходя из полученных значений параметров профиля сварного соединения вычисляли коэффициент концентрации напряжений α_σ на границах шва по зависимости Б. М. Березовского, О. А. Бакши [16]:

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{1}{\left(\frac{r}{h} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} + 4\frac{r}{s} + 5\frac{r}{b+r}\right)^{2/3}}, \quad (1)$$

где s — толщина свариваемого металла.

Определяли среднестатистические значения коэффициентов концентрации напряжений $\bar{\alpha}_\sigma$ и от-

носительной выпуклости h/\bar{b} , а также средние квадратичные отклонения S_α коэффициентов концентрации напряжений и относительной выпуклости $S_{h/b}$ (табл. 2). Объем w наплавленного при сварке металла на погонную длину 1 м шва находили по формуле

$$w = \frac{\pi d_{\text{пр}}^2 v_{\text{пр}}}{4v_{\text{св}}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{пр}}$ — диаметр проволоки; $v_{\text{пр}}$ — скорость подачи проволоки; $v_{\text{св}}$ — скорость сварки.

Усталостные испытания образцов проводили на осевое растяжение в условиях мягкого нагружения с частотой 0,05... 0,07 Гц при отнулевом цикле напряжений $R_\sigma = 0$ на модернизированной испытательной машине УМЭ-10тм. Для каждого варианта было испытано от 5 до 23 образцов.

Результаты испытаний и их обсуждение. Результаты малоцикловых испытаний представлены зависимостью максимального номинального напряжения цикла от долговечности до разрушения в логарифмических координатах (рис. 1). На рисунке доверительные границы положения кривых усталости при 95%-ной вероятности отмечены штриховыми линиями, а области разброса экспериментальных данных — тонкими сплошными линиями. Значения пределов прочности и ограниченной выносливости в диапазоне долговечности $N = 2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ циклов представлены в табл. 3; там же даны значения квадратичного отклонения S_σ при базе испытаний $N = 1 \cdot 10^4$ циклов.

При испытаниях зарождение усталостной трещины в образцах происходило преимущественно по границам сварного шва. Установлено, что лучшими характеристиками сопротивления усталости обладают соединения, выполненные сваркой TIG. Долговечность их в 1,5... 3,0 раза выше, чем у соединений, сваренных способом MIG. Пределы ограниченной выносливости у сварных соединений, выполненных по варианту 5 способом MIG, на 12... 22 % ниже, чем у соединений, выполненных по варианту 1 способом TIG. Снижение пределов ограниченной выносливости на 6... 11 % обеспечивает сварка MIG с использованием защитных газов Ar + He по вари-

Таблица 1. Режимы однопроводной сварки стыкового соединения

№ варианта	Способ сварки	$U_{\text{х.х.}}$, В	$U_{\text{д.}}$, В	$I_{\text{св.}}$, А	$v_{\text{св.}}$, м/с	$v_{\text{пр.}}$, м/с
1	TIG	70	12	360	0,0028	0,026
2	»	70	12	340/340*	0,0031	0,024
3	»	70	12	410/205*	0,0022	0,018
4	MIG	35	30	270	0,0097	0,146
5	»	30...32	25...26	275...300	0,0064	0,179
6	»	36/106**	20...21	195	0,0071	0,135

* Значения прямого и обратного тока.
** Значения напряжения холостого хода в паузе и в импульсе.

Таблица 2. Параметры, характеризующие выпуклость шва и концентрацию напряжений на его границах

№ варианта	Способ сварки	$w \cdot 10^4$, м ³ /м	h, мм	b, мм	α_σ	S_α	h/\bar{b}	$S_{h/b}$
1	TIG	0,29	1,12	14,7	1,28	0,140	0,077	0,020
2	»	0,24	1,18	13,4	1,19	0,153	0,089	0,019
3	»	0,26	1,03	14,7	1,14	0,075	0,071	0,018
4	MIG	0,30	1,29	16,5	1,52	0,302	0,082	0,023
5	»	0,56	2,42	18,1	2,11	0,464	0,135	0,024
6	»	0,38	2,72	14,4	2,44	0,593	0,190	0,030



Таблица 3. Характеристики сопротивления разрушению стыковых сварных соединений при статическом и циклическом нагружении*

№ варианта	Способ сварки	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{ МПа}$				
			$N = 2 \cdot 10^3$	$N = 5 \cdot 10^3$	$N = 1 \cdot 10^4$		$N = 2 \cdot 10^4$
					$\bar{\sigma}_{\text{max}}^*$	S_{σ}	
1	TIG	329,5	291,6	245,0	214,8	15,97	188,3
2	»	325,4	293,1	236,1	200,5	13,61	170,2
3	»	325,4	293,1	236,1	200,5	13,61	170,2
4	MIG	330,0	259,1	222,1	198,0	15,89	176,0
5	»	332,1	227,1	199,9	181,6	9,98	164,9
6	»	336,2	221,1	192,5	173,4	17,99	156,2

* $\bar{\sigma}_{\text{max}}$ — средние значения.

анту 4. В варианте 6 по сравнению с 5 использованы в 1,5 раза большая скорость сварки и в 1,2 раза большая скорость подачи электродной проволоки. Импульсный режим сварки при способах TIG (варианты 2, 3) и MIG (вариант 6) не обеспечивает повышения сопротивления усталости сварных соединений. Их пределы ограниченной выносливости в среднем на 5 % ниже, чем у соединений, выполненных соответствующими способами сварки на обычном переменном токе (варианты 1 и 5).

Некоторые образцы, сваренные по способу TIG и имеющие минимальную (около 1 мм) выпуклость шва, разрушались по шву от внутренних дефектов типа пор и оксидных включений. Дефекты образовались в нижней корневой части шва и значительно снизили долговечность соединения. Причем результаты испытаний образцов с дефектами шва (рис. 2) практически не выпадают из области разброса результатов испытаний образцов, сваренных по способу MIG, для которых характерна значительная (1,3... 2,7 мм) высота выпуклости шва.

Повышенному сопротивлению малоциклового усталости образцов сварных соединений с бездефектными швами отвечают малые выпуклости и низкие значения коэффициентов концентрации напряжений, обусловленные формой соединения на границах шва (см. табл. 2). С увеличением значений h/b и α_c сопротивление малоциклового усталости соединений снижается. Изменение выпуклости шва от $h/b = 0,8... 0,16$ для исследованных баз долговечности соединений $N = 2 \cdot 10^3... 2 \cdot 10^4$ сопровождается снижением пределов ограниченной выносливости соединений на 9... 21 % (рис. 3). При этом прочность соединений на растяжение повышается приблизительно на 3 % (табл. 3).

Значительная выпуклость шва в соединениях, выполненных по способу MIG, образуется в отличие от способа TIG за счет увеличения объема наплавленного металла. Это объясняется возрастанием в 7 раз скорости подачи проволоки при увеличении скорости сварки в 3 раза. При сварке MIG в защитных газах Ar + He по варианту 4 значение h/b по сравнению с вариантом 5 снижается в 1,7 раза вследствие уменьшения объема наплавленного металла в 1,9 раза (см. табл. 2). При этом коэффициент концентрации напряжений снижается в 1,4 раза. Однако при сварке MIG импульсным током по вари-

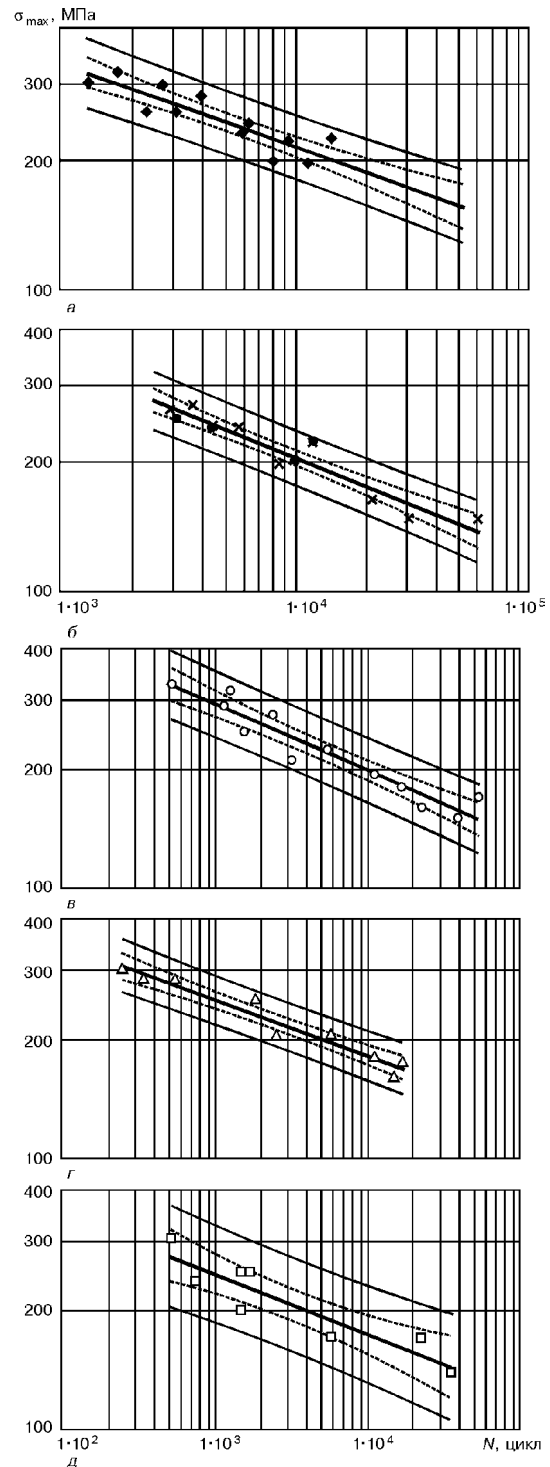


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний образцов стыковых соединений, сваренных различными способами: а — вариант 1 (◆), сварка TIG, синусоидальный ток; б — вариант 2 (●), сварка TIG, импульсный синусоидальный ток; вариант 3 (×), сварка TIG, импульсный асимметричный ток; в — вариант 4 (○), сварка MIG, синусоидальный ток; г — вариант 5 (Δ), сварка MIG, синусоидальный ток; д — вариант 6 (□), сварка MIG, импульсный ток (во всех случаях, кроме варианта 4, использован Ar, в варианте 4 — защитные газы Ar + He; $R_{\sigma} = 0$)

анту 6 уменьшение объема наплавленного металла до значений, близких к полученным при TIG сварке, не приводит к уменьшению выпуклости шва, поскольку происходит заметное сужение его ширины и увеличение высоты выпуклости. Корреляцион-

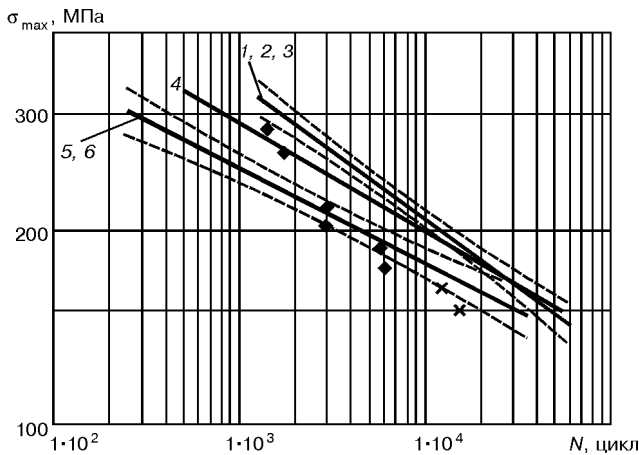


Рис. 2. Кривые усталости и их доверительные границы (95%-ной вероятности) для сварных стыковых соединений с бездефектными швами трех групп образцов (варианты 1–3 при сварке TIG, варианты 4–6 при способе MIG, см. обозначения рис. 1), а также результаты испытаний образцов, разрушившихся по шву от внутренних дефектов: ◆ — вариант 1; × — вариант 2

ная связь между отношением h/b и коэффициентом α_σ представлена на рис. 4. Вследствие значительного возрастания отношения h/b и коэффициента концентрации напряжений на границах шва происходит максимальное (на 17... 24 %) снижение пределов ограниченной выносливости соединений, выполненных по варианту 6, по сравнению с вариантом 1.

При малых значениях отношения h/b шва, выполненного неплавящимся электродом, влияние импульсного сварочного тока на характеристики сопротивления усталости не столь значительно, как при способе MIG.

Таким образом, влияние способа и режима сварки на сопротивление усталости сварных стыковых соединений обусловлено изменениям формы профиля выпуклости и параметров сопряжения шва и основного металла, которым соответствуют определенные значения коэффициента концентрации напряжений.

Учитывая, что сопротивление усталости стыкового соединения определяется условиями концентрации напряжений на границах шва и основываясь

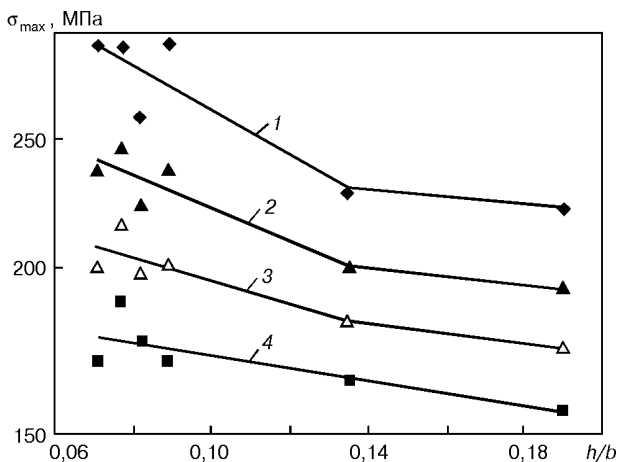


Рис. 3. Зависимость пределов ограниченной выносливости σ_{max} образцов стыкового соединения от параметра выпуклости шва h/b при различных базах испытаний: 1 — $N = 2 \cdot 10^3$; 2 — $5 \cdot 10^3$; 3 — $1 \cdot 10^4$; 4 — $2 \cdot 10^4$

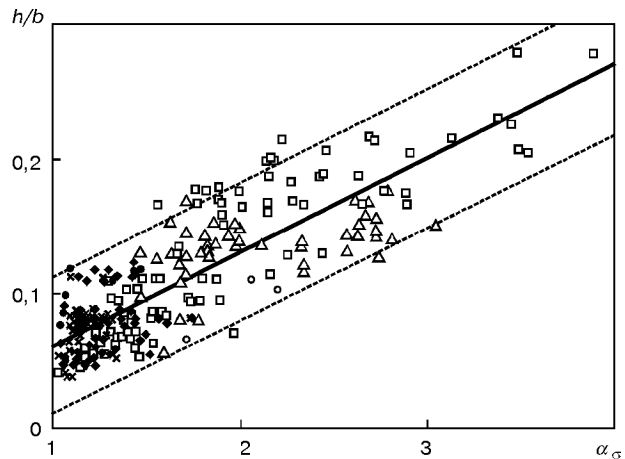


Рис. 4. Зависимость между коэффициентом концентрации напряжений α_σ на границах шва и параметром его выпуклости h/b в стыковых соединениях сплава АМг6, выполненных плавящимся и неплавящимся электродами (см. обозначения рис. 1)

на полученной удовлетворительной корреляционной связи между коэффициентом α_σ и параметром h/b для данного типа соединения, представляется возможным прогнозировать долговечность соединения путем установления такого режима сварки по заданному значению h/b , которому с определенной вероятностью отвечает предел ограниченной выносливости.

Возможность использования параметра h/b в качестве косвенного критерия для оценки сопротивления усталости сварных соединений дает основание для уточнения подходов к установлению регламентируемого стандартами качества сварного соединения. Реально получаемый параметр h/b шва, выполненного по ГОСТ 14806–80 однопроходной сваркой без разделки кромок пластин толщиной 6 мм, имеет разброс значений в пределах 0,036... 0,158. Такому широкому диапазону значений этого параметра отвечает увеличенный разброс значений сопротивления усталости стыковых соединений. Ограничение пределов значений параметра h/b при контроле формы выпуклости швов позволит снизить разброс значений α_σ , а следовательно, приведет к существенному уменьшению разброса значений сопротивления усталости соединений. При этом выборка результатов измерений сварных соединений с одинаковыми параметрами h/b (см. рис. 4) покажет частотное распределение значений α_σ , близкое к нормальному.

Низкие значения параметра выпуклости h/b , полученные в сварных соединениях при сварке неплавящимся электродом, способствуют повышению сопротивления малоциклового усталости границ шва вследствие снижения концентрации напряжений. Однако уменьшение высоты выпуклости приводит к увеличению напряжения в металле шва. При этом возрастает вероятность снижения долговечности соединения из-за внутренних дефектов до значений, характерных для соединений со значительной высотой выпуклости шва. Поэтому путь к существенному повышению сопротивления усталости стыковых сварных соединений за счет уменьшения высоты выпуклости шва в этом случае может оказаться неэффективным. Внутренние дефекты, которые



весьма сложно выявлять и устранять, неизбежно остаются в швах даже высокого класса исполнения.

В случае применения импульсной сварки плавящимся электродом уменьшение объема наплавляемого металла до получаемого при сварке TIG не обеспечивает увеличения долговечности соединения из-за возрастания значений параметра выпуклости сварного h/b , как и в соединениях, выполненных сваркой MIG с увеличенными объемами наплавляемого металла. Увеличение высоты выпуклости шва, направленное на снижение напряжений в металле шва, не станет причиной ухудшения качества сварного соединения, если применять дополнительные меры для повышения сопротивления усталости соединения на границах шва [17 и др.].

Оптимальные значения параметра h/b , при которых достигается высокое сопротивление малоциклового усталости, минимально проявляются дефекты шва и наблюдается удовлетворительная статическая прочность стыкового сварного соединения, обеспечиваются при применении способа сварки плавящимся электродом в защитных газах Ar + He при высокой скорости сварки и минимальном объеме наплавляемого металла.

Таким образом, при выполнении сварного стыкового соединения оптимизацию геометрии профиля выпуклости шва рекомендуется осуществлять на основе взаимосвязи между внешними параметрами выпуклости, концентрацией напряжений в зонах сопряжения шва и основного металла, а также условиями проявления влияния внутренних дефектов шва при статическом и циклическом нагружении.

Выводы

1. Установлено, что сопротивление малоциклового усталости образцов стыкового соединения снижается с увеличением параметра внешней формы выпуклости шва, определяемого отношением высоты выпуклости к ширине. Этот параметр имеет удовлетворительную корреляционную связь с коэффициентом концентрации напряжений в зоне сопряжения шва и основного металла, где зарождаются усталостные трещины.

2. При уменьшении параметра выпуклости шва h/b и соответственном снижении коэффициента концентрации напряжений α_σ на границах шва возрастает опасность усталостного разрушения сварного соединения из-за внутренних дефектов. При этом долговечность образца снижается до значений, характерных для швов со значительными выпуклостями, выполненных сваркой плавящимся электродом с использованием обычного переменного или импульсного тока.

Results of experimental studies of low-cycle fatigue resistance of butt welded joints in alloy AMg6 6 mm thick under axial off-zero loading, depending upon the geometry of convexity of the weld caused by the TIG and MIG welding methods, are given. The possibility has been established of evaluating the fatigue life limit by a parameter of the convexity height to weld width ratio, which has a satisfactory correlation with the calculated coefficient of stress concentration at the weld boundaries.

3. Для получения оптимальной формы профиля выпуклости шва, обеспечивающей повышенное сопротивление усталости стыкового соединения сплава AMg6 толщиной 6... 8 мм при минимальной вероятности разрушения от внутренних дефектов шва, рекомендуется высокоскоростная сварка плавящимся электродом в защитных газах Ar + He при минимальном объеме наплавляемого металла.

1. *Сильвестров А. В.* Усталостная прочность сварных соединений сплава AMg6 // Свароч. пр-во. — 1960. — № 7. — С. 15–17.
2. *Савельев В. Н., Чижевский С. В., Навроцкий Д. М.* Технология сварки и прочность сварных соединений из алюмино-магниевого сплавов. Сер. Сварка, пайка и резка металлов. — Л.: ЛДНТП, 1963. — Вып. 5. — 31 с.
3. *Груфяков В. И., Осауленико Л. Л., Корягин Ю. А.* Концентрация напряжений в стыковых соединениях // Автомат. сварка. — 1966. — № 10. — С. 19–21.
4. *Sanders W. W.* Fatigue behavior of aluminum alloy weldments // WRC Bulletin. — 1972. — April, № 171. — P. 31.
5. *Krüger U.* Fatigue strength of defective TIG-welded joints of thin-walled aluminium alloys. — Porto, 1981. — 26 p. (Colloquium on aluminium and its alloys in welded construction).
6. *Sanders W. W., Dey R. H.* Fatigue behavior of aluminum alloy weldments // WRC Bulletin. — 1983. — August, № 286. — P. 21.
7. *Lieurade H. P.* Fatigue testing of welded components. — IW Doc. XIII-WG1-37–92. — France, 1994. — 38 p.
8. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1985. — 256 с.
9. *NF A 89220.* Алюминий и алюминиевые сплавы. Сварка. Классификация и контроль сварных соединений. — Avril, 1973. — S. 447–467.
10. *Lawrence F. V., Munse W. H., Burk J. D.* Effect of porosity on the fatigue properties of 5083 aluminum alloy weldments // WRC Bulletin. — 1975. — June, № 206. — P. 23.
11. *Лабур Т. М., Ищенко А. Я., Покляцкий А. Г.* Влияние включений оксидной пленки на характеристики сопротивления разрушению сварных соединений алюминиевого сплава AMg6 НПП при различных температурах // Автомат. сварка. — 1990. — № 12. — С. 59–60.
12. *Бельчук Г. А., Налетов В. С.* О некоторых закономерностях формирования сварного шва в месте сопряжения шва с основным металлом // Сварка в судостроении. — 1972. — № 79. — С. 15–21.
13. *Березовский Б. М., Стихий В. А.* Особенности формирования зоны перехода от усиления стыкового шва к основному металлу // Вопросы свароч. пр-ва. — 1981. — № 266. — С. 99–106.
14. *Березовский Б. М.* Смачивание и растекание сварочной ванны на поверхности металла // Автомат. сварка. — 1983. — № 10. — С. 31–34.
15. *Пацкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф.* Поверхностные явления при сварке металлов. — Киев: Наук. думка, 1991. — 240 с.
16. *Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю.* Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–19.
17. *Hobbacher A.* Verbesserung der Schwingfestigkeit geschweißter Aluminium-Bauteile durch Nachbehandlung // Aluminium. — 1991. — № 7/8. — S. 786–791.

Поступила в редакцию 02.06.2000,
в окончательном варианте 11.02.2001