



## ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО СПЛАВА АМГ6 ПРИ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ

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

Представлены результаты исследования механических свойств при поперечном растяжении стыковых соединений алюминиевого сплава АМГ6 толщиной 1,9 мм, полученных гибридной лазерно-дуговой сваркой и сваркой плавящимся электродом в аргоне по традиционной технологии. Рассмотрено влияние на механические свойства соединений таких послесварочных обработок, как снятие выпуклостей шва и высокочастотная механическая проковка поверхностных слоев металла на границах шва.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, тонкостенные конструкции, гибридная лазерно-дуговая сварка, сварка плавящимся электродом, стыковое соединение, механические свойства, растяжение, выпуклость шва, высокочастотная механическая проковка

Важным показателем, определяющим эффективность применения гибридных способов сварки алюминиевых сплавов, является высокая производительность этого процесса при значительном уменьшении тепловложения [1] в сравнении с обычными процессами дуговой сварки. Из гибридных способов сварки наиболее перспективным является сочетание лазерного пучка (ЛП) со сваркой плавящимся электродом в инертных газах (МИГ) [2, 3].

Вместе с тем, данных о прочностных свойствах соединений, полученных лазерно-дуговой сваркой МИГ+ЛП, имеется недостаточно, чтобы рекомендовать этот процесс для изготовления ответственных алюминиевых тонкостенных конструкций. В большинстве случаев такие конструкции эксплуатируются в условиях воздействия переменных нагрузок и подвержены накоплению усталостных повреждений в соединениях. Учитывая низкое по сравнению с основным металлом сопротивление усталости сварных соединений, полученных дуговыми способами сварки, их долговечность повышают путем послесварочных обработок таких, как снятие выпуклостей, локальная проковка поверхностей на

границах шва [4, 5]. Поэтому наряду с данными о комплексе механических свойств соединений, выполненных гибридным способом, в состоянии после сварки, важно иметь также данные об их состоянии после обработок, обеспечивающих повышение долговечности соединений.

Цель настоящей работы — установить влияние способа сварки МИГ+ЛП на механические свойства при растяжении стыковых соединений тонколистового алюминиевого сплава АМГ6 в исходном состоянии и после дополнительных обработок, а также сравнить их со свойствами однотипных соединений, полученных сваркой МИГ.

Для сварки образцов использовали листы сплава АМГ6 толщиной 1,9 мм, сварочную проволоку СвАМГ6 диаметром 1,2 мм (ГОСТ 7871–75) и защитный газ — аргон (ГОСТ 10157–79). Сварку МИГ выполняли с применением типового оборудования «Fronius TPS-2700» на следующем режиме: сварочный ток  $I_{св} = 90$  А; напряжение на дуге  $U_{д} = 17,8$  В; скорость сварки  $v_{св} = 50$  м/ч; скорость подачи проволоки  $v_{п.пр} = 5,9$  м/мин. Гибридную сварку МИГ+ЛП осуществляли с использованием промышленного CO<sub>2</sub>-лазера ЛП-104 с полезной мощностью 2,5 кВт на режиме сварки МИГ:  $I_{св} = 185$  А;  $U_{д} = 23,3$  В;  $v_{св} = 300$  м/ч;  $v_{п.пр} = 11,8$  м/мин [6]. Химический состав основного металла и металла шва сварных соединений был установлен с помощью спектрального анализа (таблица). Основной металл отличался следующими

Химический состав металла сварного шва (мас. %)

Зона вырезки темплета	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ni	Ti	Fe
Основной металл	0,14...0,15	6,2...6,3	0,62...0,64	0,06...0,07	0,20...0,22	0,03	0,03	0,28
Сварной шов:								
МИГ	0,14	6,0	0,63	0,05	0,10	0,02	0,03	0,16
МИГ+ЛП	0,15	6,1	0,64	0,05	0,18	0,02	0,03	0,19

механическими свойствами:  $\sigma_B = 35,7...365,4$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 191,8...209,2$  МПа;  $\sigma_{0,01} = 151,4...157,2$  МПа;  $E = 70,95...71,31$  ГПа;  $\delta_5 = 18,6...20,4$  %.

Механические свойства сварных соединений определяли на плоских стандартных образцах в соответствии с ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84. Образцы для испытаний вырезали из крупногабаритных сварных заготовок. Шов в образцах был расположен перпендикулярно к волокнам проката и действию нагрузки при испытаниях. В соединениях, полученных сваркой МИГ+ЛП, толщина шва составляла  $(1,4...1,8)a_{o.m}$  (где  $a_{o.m}$  — толщина основного металла), а в полученных сваркой МИГ —  $(2,1...2,3)a_{o.m}$ . Длину пропорционального или рабочего участка образца принимали равной 50 мм, а ширину — 20 мм.

Исследовали три варианта образцов: 1 — после сварки; 2 — с удаленными выпуклостями; 3 — с прокованными поверхностями на границах шва без удаления выпуклостей. Для каждого варианта подготавливали не менее трех однотипных образцов.

Локальную высокочастотную механическую проковку в образцах, полученных по варианту 3, осуществляли ультразвуковым пьезокерамическим портативным инструментом [5]. Наконечники инструмента имели однорядную группу игольчатых бойков диаметром 3 мм. Скорость проковки составляла 4...5 мм/с. Снятие выпуклостей шва в образцах варианта 2 выполняли путем шлифования до уровня поверхности основного металла вдоль оси образца.

Испытания на растяжение проводили с использованием модернизированной машины УМЭ-10тм. Диаграммы деформирования записывали с по-

мощью двухкоординатного самописца типа Н307/1. Для определения условных значений предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и предела упругости  $\sigma_{0,01}$  использовали тензометр с базой  $l_e = 25$  мм. При этом скорость перемещения захватов испытательной машины составляла 0,5 мм/мин, а при дальнейшем испытании до разрушения образца — 5 мм/мин. Относительное удлинение  $\delta_5$  после разрыва исследуемых образцов определяли исходя из начальной расчетной длины  $l_0 = 5,65\sqrt{ba} = 35$  мм (здесь  $b, a$  — соответственно ширина и толщина образца). Характер накопления остаточных деформаций в различных зонах сварного соединения устанавливали по значениям локального относительного удлинения  $\delta_1$ . Для этого применяли поперечную разметку с шагом 1 мм вдоль оси образца. Нанесение рисок до испытаний и измерение удлинения образца между рисками после испытаний осуществляли с помощью инструментального микроскопа БМИ-1.

Результаты испытаний на растяжение представлены средними значениями показателей механических свойств соединений трех образцов (рис. 1 и 2). Значения относительного сужения  $\psi$  (рис. 1, в) определяли только для гладких образцов со снятыми выпуклостями шва. Типичное распределение локального относительного удлинения  $\delta_1$  в соединении после разрушения показано на рис. 3.

Данные о механических свойствах соединений, полученных гибридной сваркой МИГ+ЛП, заметно отличаются от таковых у соединений, сваренных МИГ. Образцы стыковых соединений, полученных гибридной сваркой, при всех вариантах изготовления характеризуются в среднем более

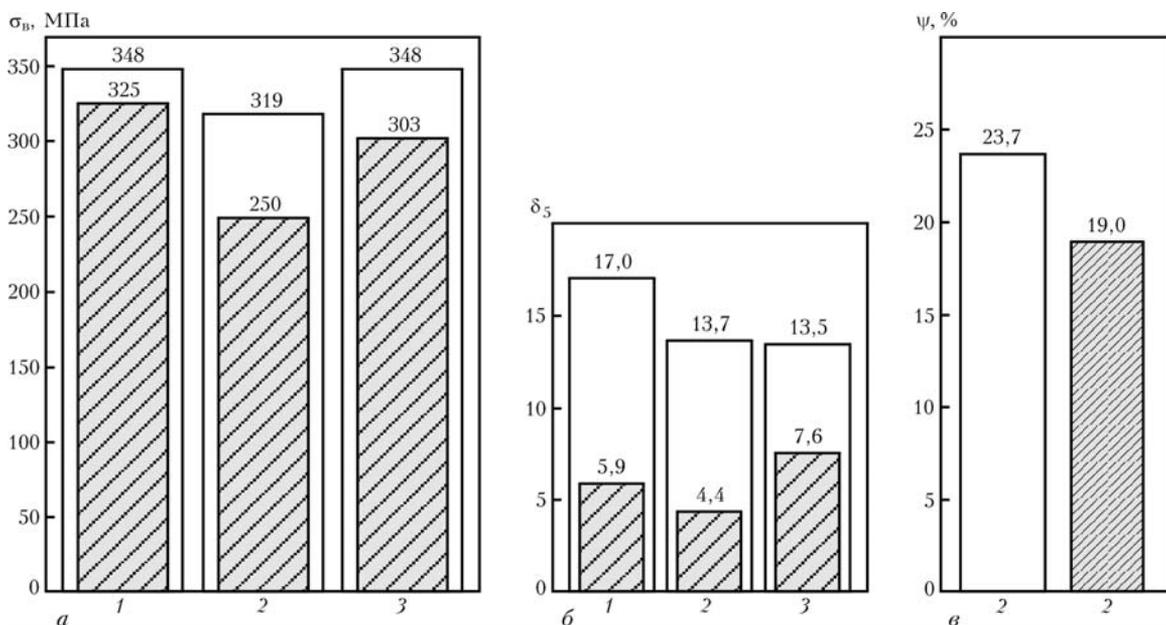


Рис. 1. Механические свойства при кратковременных испытаниях на растяжение стыковых соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП (заштрихованные области) и МИГ (светлые), после сварки (1), проковки (2) и снятия выпуклостей шва (3): а — кратковременная прочность  $\sigma_B$ ; б — относительное удлинение  $\delta_5$ ; в — относительное сужение  $\psi$

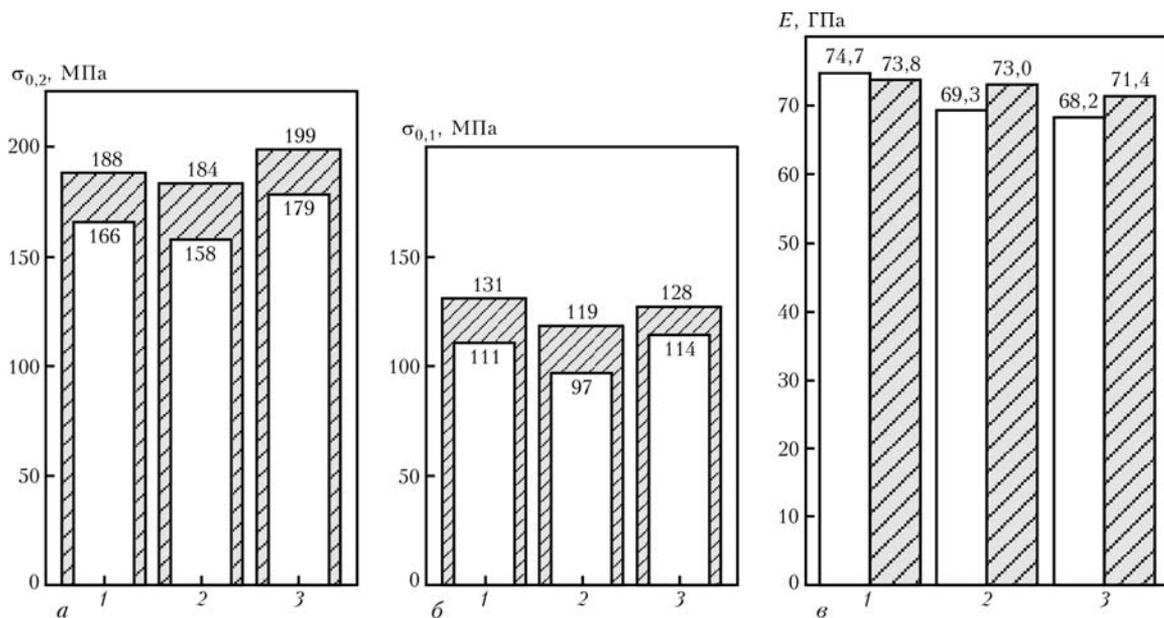


Рис. 2. Уругопластические (а) и уругие (б, в) свойства при растяжении соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП (заштрихованные области) и МИГ (светлые): 1–3 — см. рис. 1

высокими значениями предела уругости  $\sigma_{0,01}$  и текучести  $\sigma_{0,2}$  по сравнению с таковыми у соединений, выполненных сваркой МИГ. При этом значения кратковременной прочности  $\sigma_{\text{в}}$  и относительного удлинения  $\delta_5$  ниже, чем значения  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\delta_5$  соединений, полученных сваркой МИГ (рис. 1, 2).

Испытания геометрически однородных соединений (гладкие пропорциональные образцы, изготовленные по варианту 2) показали, что гибридный способ сварки по сравнению со сваркой МИГ способствует повышению значений  $\sigma_{0,2}$  на 16 %,  $\sigma_{0,01}$  на 23 %, модуля уругости  $E$  на 5 %, при этом снижаются значения  $\sigma_{\text{в}}$  на 28 %,  $\delta_5$  — в 3,1 раза,  $\psi$  — в 1,3 раза. В этом случае разрушение происходит в металле шва, которому в значительной мере соответствуют механические характеристики соединений, представленные на рис. 1 и 2. Различие в термических условиях указанных выше процессов сварки влияет на неоднородность механических свойств металла шва, околошовной зоны и зоны сплавления, о чем свидетельствует характер неравномерного распределения локального относительного удлинения  $\delta_1$ . У соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП, максимальные остаточные деформации при деформировании до разрушения накапливаются в металле шва (рис. 3, в). Металл околошовной зоны, который мало подвержен термическому влиянию, деформируется практически равномерно. В соединениях, полученных сваркой МИГ, максимальные остаточные деформации накапливаются как в металле шва, так и околошовной зоне вследствие значительного термического влияния этого способа сварки (рис. 3, г).

Визуальный осмотр изломов гладких образцов показал, что соединения, полученные сваркой МИГ+ЛП, разрушаются по шву с хрупким отрывом. Поверхность разрушения имеет серый цвет и шероховатость, характерную для зернистого излома. В зонах сплавления трещиноподобных образований не обнаружено. Соединения, полученные сваркой МИГ, разрушались по шву. Характер разрушения вязкий, поверхность излома ориентирована под углом 45° к оси нагружения. Изломы имели гладкую блестящую поверхность и надрывы по зоне сплавления.

Выпуклости создают непропорциональное нагружение вдоль оси образца и способствуют увеличению предельного разрушающего усилия для сварного шва. При этом в соединениях, полученных сваркой МИГ+ЛП, ответственной за разрушение является зона сплавления. Кратковременная прочность такого соединения (вариант 1) на 30 % выше, чем  $\sigma_{\text{в}}$  соединений со снятыми выпуклостями шва (вариант 2). Для соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП, характерны минимальная наружная выпуклость без натеков на зону сплавления и наличие неглубоких подрезов. Остаточные деформации в соединениях при разрушении распределяются равномерно в околошовной зоне до внешних границ зоны сплавления, а максимальные значения  $\delta_1$  имеют место преимущественно в зонах сплавления и частично в прилегающих к ней участках шва и основного металла (рис. 3, а). Кратковременная прочность зоны сплавления оказалась несколько (на 2 %) выше, чем у металла шва, выполненного сваркой МИГ (см. рис. 1).

При сварке МИГ значительная высота выпуклостей с натеками на основной металл в зоне

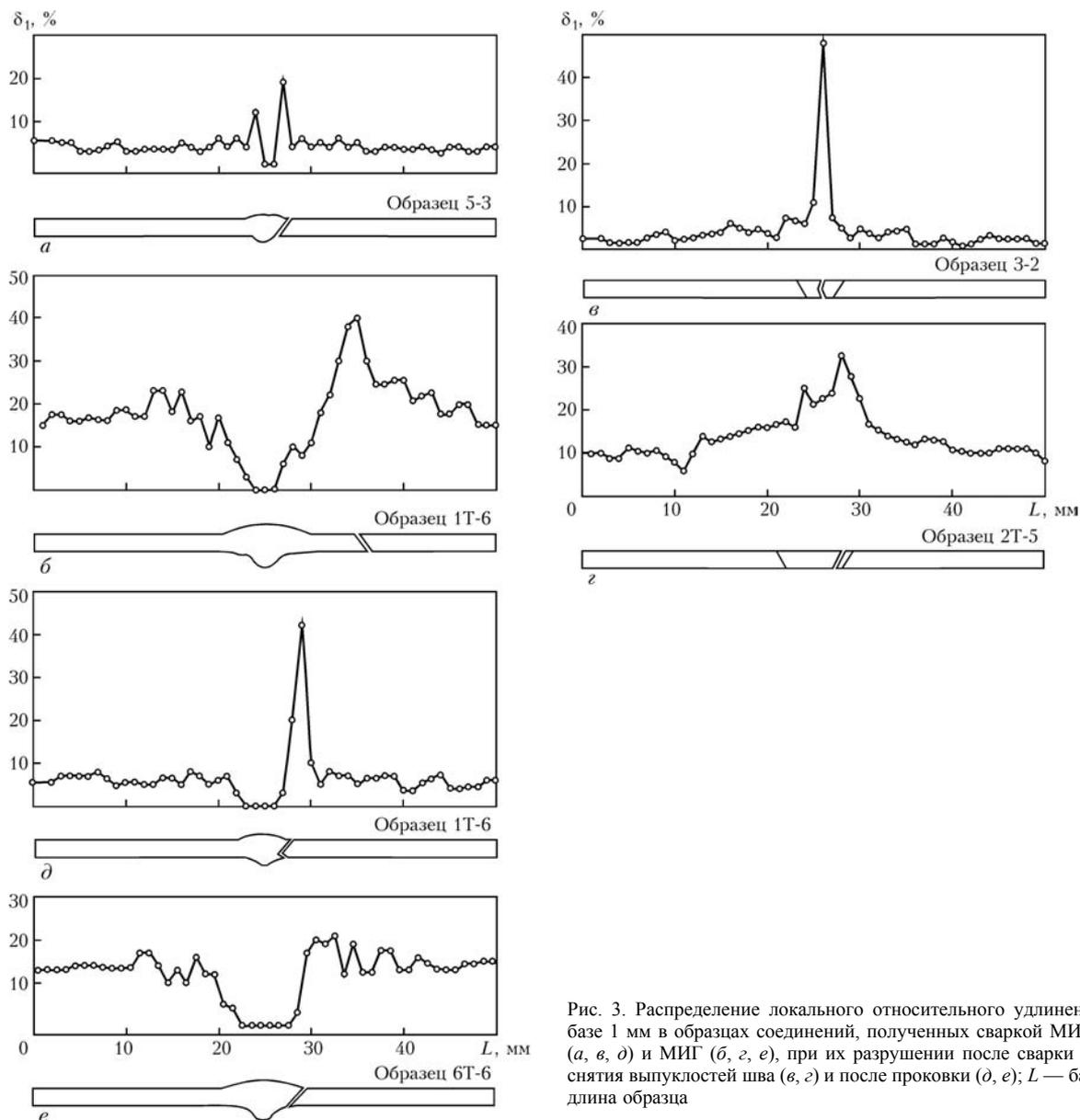


Рис. 3. Распределение локального относительного удлинения на базе 1 мм в образцах соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП (*а, в, д*) и МИГ (*б, з, е*), при их разрушении после сварки (*а, б*), снятия выпуклостей шва (*в, з*) и после проковки (*д, е*); *L* — базовая длина образца

сплавления, образовавшимися при формировании шва, стала причиной разрушения соединений вдали от шва по зоне термического влияния на расстоянии около 10 мм от внешней границы шва (рис. 3, *б*). Кратковременная прочность соединений (вариант 1) оказалась в среднем на 9 % выше, чем у соединений со снятыми выпуклостями (вариант 2). В шве с исходными выпуклостями остаточное удлинение не наблюдалось. На изломах образцов имелись отслоения натека металла шва от поверхностей основного металла и надрывы по зоне сплавления под натеком.

У соединений с исходными выпуклостями шва (вариант 1), полученных сваркой МИГ+ЛП, значения  $\sigma_{0,01}$  и  $\sigma_{0,2}$  выше соответственно на 10 и 2 %, а при сварке МИГ — соответственно на 14 и 5 % по сравнению с аналогичными показателями соединений со снятыми выпуклостями шва. Зна-

чения относительного удлинения  $\delta_5$  в соединениях, полученных сваркой МИГ+ЛП, увеличились в 1,34 раза, а при сварке МИГ — в 1,24 раза. Выпуклость шва в соединениях, полученных сваркой МИГ+ЛП, мало влияет на значение  $E$ , а в случае сварки МИГ способствует повышению значений  $E$  на 8 %.

Локальная проковка поверхностного слоя металла на границах шва в соединениях, полученных сваркой МИГ+ЛП (вариант 3), вызвала повышение значений  $\sigma_{0,2}$  до 6 % и снижение значений  $\sigma_{0,01}$  на 2 % по сравнению с аналогичными показателями соединений в исходном состоянии (вариант 1). После проковки соединений, полученных сваркой МИГ, значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{0,01}$  повысились соответственно до 8 и на 3 %. При этом у соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП, значения модуля упругости  $E$  уменьшились на 3 %,



а у полученных сваркой МИГ — до 9 % (см. рис. 2). Очевидно, прокованные слои металла сдерживают начальную стадию пластических деформаций в сварных соединениях, но приводят к снижению модуля упругости. При этом  $\sigma_v$  прокованных соединений в среднем на 13 % ниже, чем исходных соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП, и остается практически неизменной у соединений, полученных сваркой МИГ (см. рис. 1). Разрушение соединения после проковки происходило преимущественно по зонам сплавления и имело вязкий характер. На изломах разрушенных образцов заметны участки отслоения прокованного металла. Причем в зонах проковки снижается уровень накопленного остаточного удлинения (см. рис. 3, *д*, *е*).

Таким образом, стыковые соединения тонколистового алюминиевого сплава АМг6, полученные сваркой МИГ+ЛП с использованием электродной проволоки СвАМг6, отличаются повышенными значениями пределов упругости и текучести, что может положительно сказаться на повышении сопротивления усталости этих соединений при многоцикловом нагружении. Кратковременная прочность и пластичность металла шва при гибридной сварке не достигают значений, характерных для соединений, полученных сваркой МИГ. Поэтому снимать выпуклости шва для повышения долговечности соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП, нецелесообразно. Эффект локальной проковки соединений с неснятыми выпуклостями проявляется в повышении предела текучести. При этом кратковременная прочность соединений не повышается.

Механические свойства соединений, полученных гибридной сваркой МИГ+ЛП, по-видимому, обусловлены металлургическим фактором, а именно влиянием скорости кристаллизации шва на его структурное состояние, при этом влияние механического фактора (поперечная усадка металла шва) ослабевает и образование кристаллизационных трещин при высокоскоростном выполнении шва не происходит [7].

Results of investigation into transverse tension properties of 1.9 mm thick welded joints in aluminium alloy АМg6, made by hybrid laser-arc and MIG welding in argon atmosphere by the traditional technology, are presented. Effect of such postweld treatments as removal of weld reinforcement and high-frequency peening of metal surface layers at the weld boundaries is considered.

## Выводы

1. Применение гибридной высокоскоростной сварки МИГ+ЛП тонколистового алюминиевого сплава АМг6 обеспечивает повышение значений пределов упругости на 18 % и кратковременной прочности на 13 % стыковых соединений с выпуклостями шва по сравнению с аналогичными показателями соединений, полученных сваркой МИГ.

2. Равные усилия для разрушения шва и прилегающих к нему зон в соединениях, полученных сваркой МИГ+ЛП, обеспечиваются только при наличии выпуклостей вследствие того, что прочность и пластичность металла шва, выполненного с использованием электродной проволоки СвАМг6, не достигают значений кратковременной прочности основного металла.

3. Применение послесварочной высокочастотной механической проковки поверхностного слоя на границах металла шва с выпуклостями способствует возрастанию предела текучести сварного соединения, при этом значение кратковременной прочности не повышается.

1. *Штауфер Х., Хакль Х.* Лазерно-дуговая сварка в автомобильной промышленности // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 29–32.
2. *Dilthey U., Lueder F., Wieschemann A.* Erweiterte Möglichkeiten beim Schweißen von Aluminiumlegierungen durch den Laser-MIG-Hybridprozeß // Aluminium. — 1999. — 75, № 1/2. — S. 64–75.
3. *Shida T., Hirokawa M., Sato S.* CO<sub>2</sub>-laser welding of aluminum alloys (Welding of aluminum alloys using CO<sub>2</sub>-laser beam in combination with MIG arc) // Quarterly J. Jap. Weld. Soc. — 1997. — 15, № 1. — P. 18–23.
4. *Повышение сопротивления усталости тавровых сварных соединений тонколистового алюминиевого сплава АМг6 / В. А. Шонин, В. С. Машин, О. В. Войтенко, В. В. Новожилов // Автомат. сварка. — 2003. — № 7. — С. 9–13.*
5. *Применение высокочастотной механической проковки для повышения сопротивления усталости стыковых соединений алюминиевых сплавов / В. И. Труфяков, В. А. Шонин, В. С. Машин, Д. С. Романовский // Там же. — 2001. — № 7. — С. 7–11.*
6. *Остаточные напряжения в соединениях тонколистового сплава АМг6, вызванные дуговой и лазерно-дуговой сваркой / В. А. Шонин, В. С. Машин, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Недей // Там же. — 2006. — № 9. — С. 26–36.*
7. *Рабкин Д. М.* Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.

Поступила в редакцию 11.09.2005