



ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ ТОНКОЛИСТОВОГО СПЛАВА АМг6, ВЫЗВАННЫЕ ДУГОВОЙ И ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

В. А. ШОНИН, В. С. МАШИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук, Т. Н. НЕДЕЙ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований остаточных деформаций и напряжений в стыковых соединениях сплава АМг6 толщиной 1,9 мм, полученных сваркой МИГ и МИГ + лазерный пучок. Установлено, что при шестикратном увеличении скорости сварки (гибридный процесс) обеспечивается двукратное уменьшение поперечного сечения шва, полуторное — околошовной зоны с продольными остаточными напряжениями и более чем четырехкратное — поперечных остаточных напряжений.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка плавлением, стыковые соединения, тонколистовые конструкции, околошовная зона, остаточные деформации, остаточные напряжения

В процессе сварки листовых конструкций в металле шва и околошовной зоне происходит неизбежное накопление термопластических деформаций, что обуславливает образование продольных и поперечных остаточных деформаций и напряжений [1]. Известно, что поперечные растягивающие остаточные напряжения в зоне концентраторов напряжений от выпуклой формы шва снижают сопротивление усталости соединений при поперечном действии переменных напряжений внешней нагрузки [2]. Эти остаточные напряжения уравновешены в сечении стыкового соединения, проходящем вдоль сварного шва, и зависят от размеров соединяемых элементов, скорости сварки и длины сварного шва. К тому же, при сварке тонколистовых элементов остаточные деформации и напряжения вызывают потерю устойчивости при сжатии основного металла вследствие воздействия усадочных сил в шве и зоне термического влияния (ЗТВ). Возникающие остаточные деформации изгиба являются причиной значительной неравномерности распределения остаточных напряжений по толщине металла и повышенной остаточной напряженности в поверхностных слоях околошовной зоны соединения. В связи с этим при изготовлении сварных листовых конструкций следует уделять должное внимание снижению поперечных растягивающих остаточных напряжений в соединениях.

Одним из эффективных путей снижения остаточных деформаций и напряжений, возникающих в тонкостенных конструкциях, является применение высокопроизводительных процессов сварки, обеспечивающих минимальное тепловло-

жение. В этом плане заслуживают внимания гибридные способы сварки, получившие в последние годы широкое развитие [3–5]. Они основаны на локализации тепловой энергии в зоне плавления, что позволяет значительно увеличивать скорость сварки и глубину проплавления при уменьшении тепловложения в основной металл. Наиболее перспективным для соединения тонколистовых алюминиевых сплавов является способ сварки плавающим электродом (МИГ) с применением лазерного пучка (ЛП), который может обеспечить повышенную скорость сварки с низкой погонной энергией, и как следствие, уменьшение поперечных остаточных деформаций и напряжений. Однако пока не имеется данных о влиянии скорости сварки на уровень остаточных напряжений и деформаций для тонколистовых алюминиевых конструкций.

Цель настоящей работы — установить уровни и характер распределения остаточных деформаций и напряжений в стыковых соединениях тонколистового алюминиевого сплава АМг6, полученных гибридным МИГ+ЛП и традиционным МИГ способами сварки.

Методика проведения исследований. Исследования проводили на образцах стыкового соединения, состоящего из двух пластин размером $300 \times (125+125) \times 1,9$ мм из сплава АМг6, сваренных стыковым швом за один проход. Длину и ширину пластин выбирали исходя из условия получения максимально возможных остаточных напряжений. За основу принимали принцип подобия крупногабаритным образцам большой толщины, в которых образуются максимальные остаточные напряжения. Для этого их длину и ширину уменьшали пропорционально изменению толщины металла.

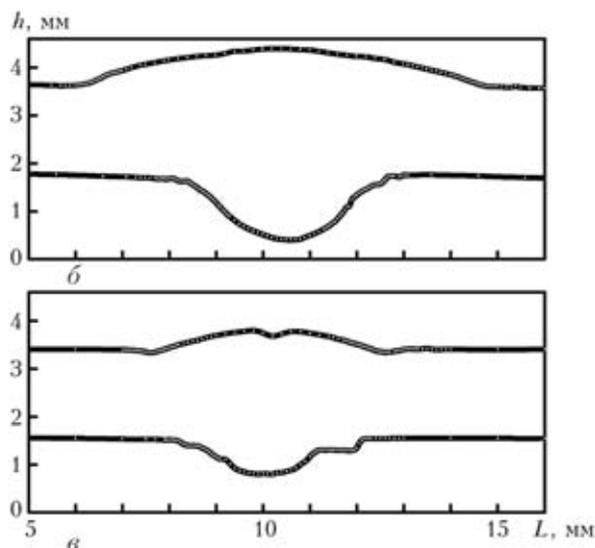
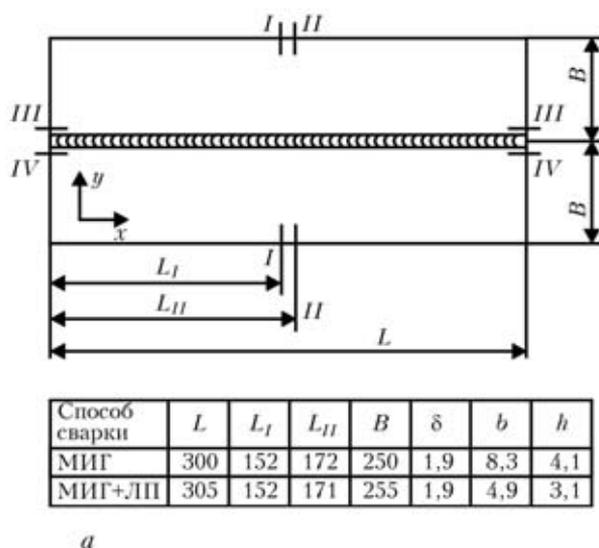


Рис. 1. Схема образца стыковых соединений сплава АМгб (а) и профили сварных швов, выполненных сваркой МИГ (б) и МИГ+ЛП (в): L — длина образца; L_I, L_{II} — расстояние от начала шва до места установки датчика; B — ширина свариваемых пластин; δ — толщина основного металла; b — ширина шва с его лицевой стороны; h — высота шва (все размеры даны в миллиметрах); $I-IV$ — сечения

Сварку образцов выполняли в нижнем положении на формирующей подкладке из нержавеющей стали сварочной проволокой АМгб диаметром 1,2 мм. Образцы при сварке закрепляли в жестком кондукторе. Для сварки плавящимся электродом в инертных газах применяли типовое оборудование «Fronius TPS-2700» и промышленный CO₂-лазер ЛТ-104. Защитной средой являлся аргон. Сварку МИГ выполняли на следующем режиме: ток сварки $I_{св} = 90$ А; напряжение на дуге $U_d = 17,8$ В; скорость сварки $v_{св} = 50$ м/ч; скорость подачи проволоки $v_{п.пр} = 5,9$ м/мин. Сварку гибридным способом осуществляли при полезной мощности лазера 2,5 кВт на следующем режиме сварки МИГ: $I_{св} = 185$ А; $U_d = 23,3$ В; $v_{св} = 300$ м/ч; $v_{п.пр} = 11,8$ м/мин. На рис. 1 приведены габаритные размеры стыковых соединений и профили швов, построенные методом профилометрирования.

Для экспериментальной оценки остаточных деформаций в околошовной зоне применяли разрушающий метод тензометрирования, основанный на измерении упругих деформаций в локальном участке исследуемого металла сварного соединения при его полной разгрузке [6]. Указанный метод отличается высокой точностью и позволяет определять остаточные деформации как на поверхности стыкового соединения, так и усредненные по толщине образца. Разгрузку осуществляли путем механической вырезки участка металла с тензорезисторными датчиками, наклеенными на лицевой и обратной поверхностях соединения. Для этого из каждой серии сваренных образцов выбирали один образец-свидетель, на котором выполняли измерения остаточных деформаций и напряжений.

Значения остаточных деформаций определяли с лицевой и обратной стороны поверхности стыкового соединения в направлениях, параллельных оси шва (сечения $I-I$ и $III-III$) и перпендикулярных ко шву ($II-II$ и $IV-IV$) (рис. 1). Продольные сечения $I-I$ и $II-II$ проходили вдоль ЗТВ на расстоянии 5...7 мм от оси шва, а поперечные $III-III, IV-IV$ — на расстояниях 152 и 172 мм от начала шва (рис. 1). Тензодатчики сопротивления (проволочные типа ПКБ и ПКП и фольговые типа КФ) прикрепляли клеем типа циакрин. Для сечений $I-I$ использовали датчики ПКБ с базой 20 мм, для $II-II$ — ПКП с базой 10 мм, для $III-III$ — КФ с базой 10 мм, а для $IV-IV$ — ПКБ и ПКП с базой 5 мм. Расположение датчиков отвечало принятым направлениям двух компонент напряжений, ориентированных вдоль $\sigma_{ост(x)}$ (сечения $I-I$ и $III-III$) и поперек $\sigma_{ост(y)}$ ($II-II$ и $IV-IV$) шва. Для каждого образца использовали до 80 тензометрических датчиков.

Измерения деформаций выполняли с помощью прибора ИСД-3. Температурную компенсацию осуществляли путем использования однотипных датчиков, наклеенных на ненагружаемые пластины из указанного сплава. Тензодатчики из партии каждого типа проверяли на тарировочном устройстве с применением контрольной балки размером 400×30×10 мм из сплава АМгб для сжатия и растяжения поверхностных слоев металла при нагружении чистым изгибом. Погрешность значений деформаций, полученных при измерении, по сравнению с расчетными не превышала ±4 %.

После измерения исходных значений сопротивления датчиков разгрузку металла начинали с зоны активных растягивающих остаточных напряжений. С этой целью сначала высверливали от-



верстия диаметром 10 мм по металлу сварного шва вдоль его длины с шагом 30...50 мм, что дало возможность значительно снизить уровни активных растягивающих остаточных напряжений. Затем выпиливали поочередно участки пластины с наклеенными датчиками. Измеренные значения сопротивления датчиков до и после разгрузки в виде $\varepsilon = \Delta \text{о.е.д} \cdot 10^{-5}$ (здесь о.е.д — относительные единицы деформации) представляли аппроксимируемыми линейными графиками, построенными для различных сечений и направленности остаточных деформаций с отсчетом от середины (сечения I-I и II-II) и начала (III-III и IV-IV) шва. С помощью этих графиков корректировали экспериментальные данные о продольных и поперечных деформациях при условном совмещении координат датчиков.

Расчеты поверхностных остаточных напряжений двухосного направления осуществляли по значениям остаточных деформаций, полученным экспериментально, с использованием известных формул теории упругости [6]:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y); \quad \sigma_y = \frac{E}{2-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x),$$

где σ_x и σ_y — продольные и поперечные напряжения; E — модуль упругости ($E = 69000$ МПа); ε_x и ε_y — соответственно продольные и поперечные относительные деформации; μ — коэффициент Пуассона, $\mu = 0,33$.

Усредненные по толщине продольные и поперечные остаточные напряжения определяли из выражения

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{\sigma_{\text{ост}}^B + \sigma_{\text{ост}}^H}{2},$$

где $\sigma_{\text{ост}}^B$ — напряжения на верхней (лицевой) поверхности соединения; $\sigma_{\text{ост}}^H$ — то же на нижней (обратной) его поверхности. Кривые, характеризующие распределение продольных и поперечных остаточных напряжений в рассматриваемых сечениях соединений, показаны на рис. 2. Неравномерность распределения остаточных напряжений по толщине металла, вызванная остаточным изгибом, представлена (рис. 3) разницей между значениями остаточных напряжений на лицевой и обратной поверхности соединения:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{\sigma_{\text{ост}}^B - \sigma_{\text{ост}}^H}{2}.$$

Данные измерений тензометрическими датчиками на кривых распределений остаточных напряжений обозначены точками.

Результаты исследований и обсуждение. Усредненные по толщине значения продольных остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}(x)}$ в поперечном сечении I-I центральной части сварных образцов отвечают известному [2] характеру распределений. Они уравновешены по сумме сил и моментов

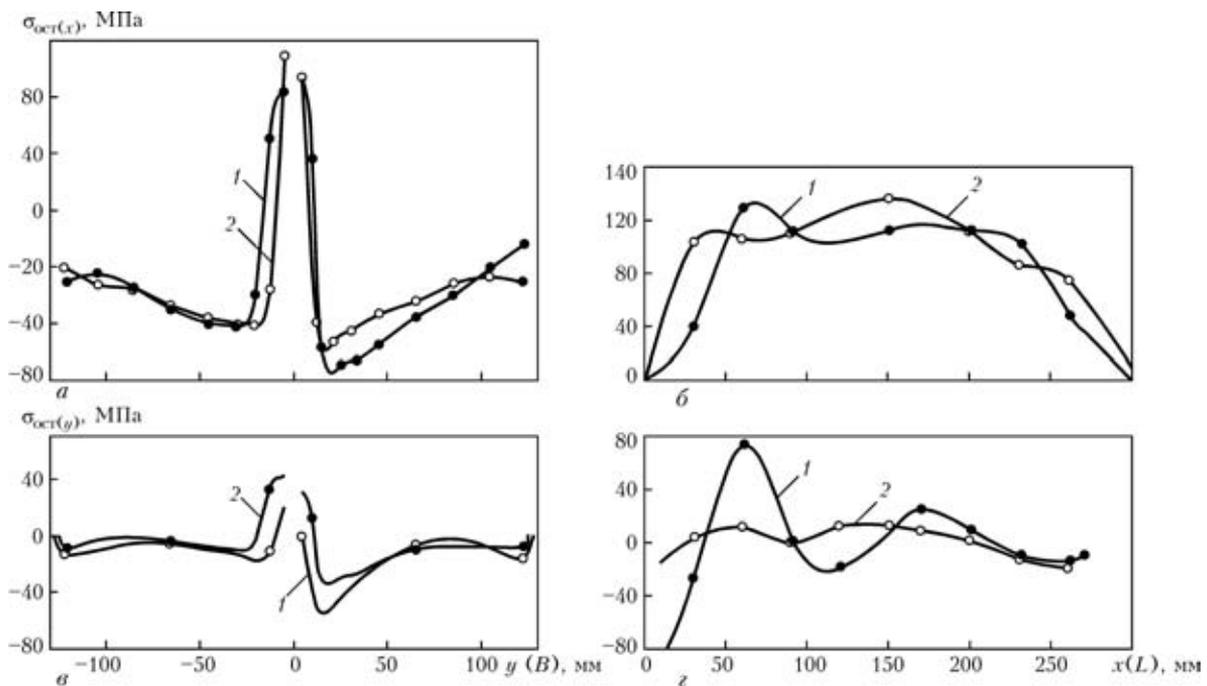


Рис. 2. Средние значения остаточных напряжений продольной (а, б) соответственно в поперечном I-I и продольном III-III сечениях и поперечной компоненты (в, г) соответственно в поперечном II-II и продольном IV-IV сечениях: 1 — сварка МИГ; 2 — МИГ+ЛП

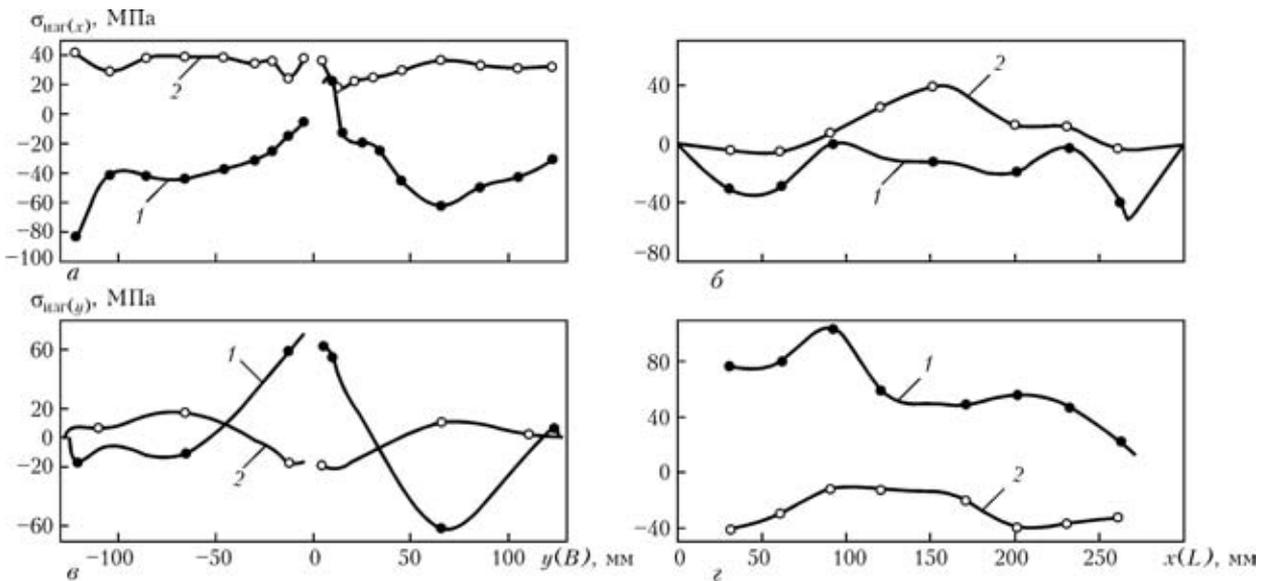


Рис. 3. Напряжения изгиба на лицевой поверхности образцов в продольном направлении по оси x ($a, б$) соответственно для сечений $I-I$ и $III-III$ и в поперечном по оси y ($в, г$) направлениях соответственно для сечений $II-II$ и $IV-IV$ (1, 2 — см. рис. 2)

в плоскости их действия (рис. 2, a). Как следует из рис. 2, $a, в$, ширина околосшовной зоны с активными растягивающими остаточными напряжениями при гибридном способе сварки в 1,5 раза меньше, чем в стыковых соединениях, полученных способом сварки МИГ. В сечении $III-III$ значения продольных растягивающих напряжений $\sigma_{ост(x)}$ достигают максимума в центральной части образца и уменьшаются до нуля в начале и конце соединения (рис. 2, $б$). В случае использования способа сварки МИГ+ЛПП максимальные значения продольных растягивающих остаточных напряжений в середине образца незначительно превышают $\sigma_{ост(x)}$ при сварке МИГ.

Усредненные по толщине поперечные остаточные напряжения $\sigma_{ост(y)}$ вдоль сечения $IV-IV$ имеют волновой характер распределения (рис. 2, $г$). В первой волне, распространяющейся на начальном участке шва длиной около 110 мм, максимальные значения напряжений $\sigma_{ост(y)}$ достигают ± 80 МПа при сварке МИГ и не превышают ± 20 МПа при сварке МИГ+ЛПП. Характер распределения поперечных остаточных напряжений $\sigma_{ост(y)}$ вдоль шва существенно отличается от широко описанного в литературе, например в [7], тем, что остаточные напряжения при сварке уравниваются уже на начальном участке соединения длиной 100...120 мм. Дальнейшее формирование поперечных остаточных напряжений отличается невысокими пиковыми значениями. Они локально уравновешены и достигают максимальных значений только вблизи шва (рис. 2, $в, г$).

При сварке МИГ пиковые значения $\sigma_{ост(y)}$ в последующих за первой волнах поперечных остаточных напряжений снижаются до ± 30 МПа, что обусловлено, очевидно, выравниванием градиента температур вдоль соединения. При гибридном

способе сварки МИГ+ЛПП поперечные остаточные напряжения $\sigma_{ост(y)}$ не достигают пиковых значений вследствие увеличения в 6 раз скорости сварки и уменьшения в 1,5 раза погонной энергии этого процесса по сравнению со сваркой МИГ, поскольку режимы гибридной сварки определяют условия значительного уменьшения градиентов температур в продольном направлении соединения.

Различие в уровнях и характере распределения остаточных деформаций (искривления) соединений, полученных сваркой МИГ и МИГ+ЛПП, в значительной мере связано с размерами зон активных растягивающих остаточных напряжений и формой сварного шва (см. рис. 1). Как уже отмечалось выше, при гибридном способе сварки МИГ+ЛПП ширина зоны с растягивающими остаточными напряжениями в 1,5 раза меньше. Причем уменьшение (в 2 раза) площади сечения шва происходит в основном за счет заметного сокращения площади сечения лицевой выпуклости шва. Это существенно сказывается на уменьшении уровня дополнительных остаточных напряжений от продольного $\sigma_{изг(x)}$ и поперечного $\sigma_{изг(y)}$ искривлений образца, полученного гибридным способом сварки (рис. 3).

При сварке МИГ остаточный изгиб соединения в продольном направлении вызывает появление на лицевой поверхности соединения дополнительных сжимающих остаточных напряжений, а на обратной его стороне — растягивающих напряжений $\sigma_{изг(x)}$. В поперечном сечении $I-I$ на лицевой поверхности соединения $\sigma_{изг(x)}$ достигают максимальных значений по краям образца и минимальных — вблизи шва (рис. 3, a), а в продольном сечении $III-III$ $\sigma_{изг(x)}$ отличаются волновым распределением невысокого уровня (рис. 3, $б$). Соединения, полученные способом МИГ+ЛПП,



в продольном направлении имеют обратное искривление. При этом на лицевой поверхности образца дополнительно образуются продольные растягивающие остаточные напряжения невысокого уровня, а на его обратной стороне — сжимающие остаточные напряжения изгиба $\sigma_{изг(x)}$. В поперечном сечении *I–I* на лицевой поверхности соединения они распределены равномерно, а в продольном сечении *III–III* растягивающие напряжения сосредоточиваются преимущественно в середине образца (рис. 3, а, б).

Соединения, полученные сваркой МИГ в поперечном направлении так же, как в продольном, имеют бóльшие искривления, чем при сварке МИГ+ЛП. В поперечном сечении *II–II* на лицевой поверхности стыкового соединения, полученного сваркой МИГ, дополнительные поперечные растягивающие остаточные напряжения изгиба $\sigma_{изг(y)}$ достигают высокого уровня преимущественно в области шва (70 МПа); вблизи краев образца они преобразуются в сжимающие остаточные напряжения, достигающие значений до –70 МПа (рис. 3, в, г). В продольном сечении *IV–IV* высокие поперечные растягивающие остаточные напряжения изгиба $\sigma_{изг(y)}$ действуют по всей длине околошовной зоны с некоторым спадом в конце шва (105 МПа в начале и 55 МПа в конце шва). Для соединений, полученных сваркой МИГ+ЛП, поперечные остаточные напряжения изгиба $\sigma_{изг(y)}$ в сечении *II–II* на лицевой поверхности вблизи шва являются сжимающими, а вблизи краев — растягивающими, их значения не превышают ± 20 МПа (рис. 3, в). В соединениях, полученных гибридным способом, поперечные остаточные напряжения изгиба $\sigma_{изг(y)}$ в продольном сечении *IV–IV* в основном сжимающие, они действуют по всей длине околошовной зоны и их значения не превышают 40 МПа с заметным спадом в центральной части образца до –10 МПа (рис. 3, г).

Таким образом, при сварке тонколистовых образцов стыковых соединений образуются средние по толщине (номинальные) двухосные остаточные напряжения, уравновешенные в поперечных сечениях. На эти напряжения накладываются дополнительные напряжения от изгиба, вызванные потерей устойчивости пластин от действия сжимающих (уравновешивающих) остаточных напряжений в околошовной зоне и дополнительных моментов от усадки шва вследствие неравномерности лицевой и корневой выпуклостей и неравномерности пластических деформаций по толщине ЗТВ. Вследствие этого суммарное распределение остаточных напряжений, измеренных только на поверхности сварного соединения, имеет неуравновешенный характер.

Волновое распределение поперечной компоненты остаточных напряжений $\sigma_{ост(y)}$ в околошов-

ной зоне стыковых соединений, полученных сваркой МИГ напроход, отмечалось ранее [2]. Очевидно, поперечная компонента напряжений стремится к уравновешенному состоянию на более коротких расстояниях, чем длина шва, что свидетельствует о независимости формирования продольной и поперечной компонент остаточных напряжений. Причем неравновесное состояние компонент остаточных напряжений в двух взаимно перпендикулярных сечениях сварного соединения определяется законом о независимости упругих уравновешенных сил продольного и поперечного направлений. Это означает, что как при внешней (упругой) нагрузке образца, так и при упругой разгрузке остаточных напряжений, две компоненты упругих продольных и поперечных напряжений подчиняются принципу суперпозиции (или независимости действия сил) [8]. Поэтому при разрезании образца вдоль шва происходит полная разгрузка поперечных сил и моментов и частичная разгрузка продольных сил и моментов, обусловленная прекращением действия противоположных моментов отрезанной части соединения. При разрезании образца поперек шва поперечные остаточные напряжения сохраняют свои значения, если они в вырезаемых участках соединения локально уравновешены, а продольные остаточные напряжения снижаются и вблизи линии разрезки равны нулю.

Выводы

1. В сравнении с традиционной сваркой МИГ гибридная высокоскоростная сварка плавящимся электродом в сочетании с CO_2 -лазером в аргоне стыковых соединений тонколистового алюминиевого сплава АМг6 способствует значительному уменьшению поперечных остаточных деформаций и напряжений за счет шестикратного увеличения скорости сварки, 40%-го снижения ее погонной энергии и двукратного уменьшения сечения шва.

2. При традиционном способе сварки МИГ тонколистовых алюминиевых сплавов в околошовной зоне стыкового соединения формируются поперечные остаточные напряжения, распределение которых носит волной характер. Их усредненные экстремальные значения составляют ± 80 МПа в первой волне, которая распространяется на расстоянии 100...120 мм от начального участка шва. Поперечный остаточный изгиб инициирует дополнительные поперечные остаточные напряжения, образующиеся на поверхности стыкового соединения, равные ± 105 в его начале и ± 55 МПа в конце.

3. При гибридной сварке МИГ+ЛП значения поперечных остаточных напряжений в околошовной зоне не превышают ± 20 МПа, а дополнительных поперечных остаточных напряжений от



изгиба образца находятся в пределах ± 40 МПа. Зона с продольными растягивающими остаточными напряжениями сужается в 1,5 раза по сравнению с соответствующими остаточными напряжениями в соединениях, полученных сваркой МИГ.

1. *Гатовский К. М.* Деформации и напряжения, возникающие при сварке конструкций // Сварка судовых конструкций. — Л.: Судостроение, 1980. — С. 250–320.
2. *Влияние* размеров образца сварного соединения алюминиевого сплава на остаточную напряженность и сопротивление усталости / В. А. Шонин, О. И. Гуца, В. С. Машин и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 2. — С. 21–31.
3. *Штауфер Х., Хакль Х.* Лазерно-дуговая сварка в автомобильной промышленности // Там же. — 2001. — № 12. — С. 29–32.

The paper gives the results of experimental studies of residual welding strains and stresses in butt joints of AMg6 alloy 1.9 mm thick made by MIG welding and MIG + laser beam welding. It is established that a six times increase of the welding speed (hybrid process) provides a two times narrowing of the weld cross-section, one-and-a-half times narrowing of the HAZ with longitudinal residual stresses and more than four times reduction of the transverse residual stresses.

4. *Dilthey U., Lueder F., Wieschemann A.* Erweiterte Moeglichkeiten beim Schweißen von Aluminiumlegierungen durch den Laser-MIG-Hybridprozeß // Aluminium. — 1999. — 75, № 1/2. — S. 64–75.
5. *Shida T., Hirokawa M., Sato S.* CO₂-laser welding of aluminum alloys (welding of aluminum alloys using CO₂-laser beam in combination with MIG arc) // Quarterly J. of Jap. Weld. Soc. — 1997. — 15, № 1. — P. 18–23.
6. *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справоч. пособие* / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. — Киев: Наук. думка, 1981. — 584 с.
7. *Винокуров В. А.* Сварочные деформации и напряжения. — М.: Машиностроение, 1968. — 236 с.
8. *Феодосьев В. И.* Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 512 с.

Поступила в редакцию 17.05.2005,
в окончательном варианте 01.09.2005

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предлагаемый процесс лазерной резки заключается в раскрое листового материала по любому заданному контуру под действием лазерного излучения мощностью до 1 кВт. Продукты эрозии при этом удаляются из зоны действия излучения струей воздушно-кислородной смеси.

В состав оборудования входят быстропроточный технологический CO₂-лазер, трехкоординатный манипулятор, зеркала оптического тракта, резак с фокусирующим объективом.



Габариты разрезаемого листа зависят от размеров манипулятора и обычно составляют 1...2 м. Один из действующих в нашем отделе резательных комплексов показан на рисунке. По сравнению с микроплазменной технологией при лазерной резке значительно повышается точность (порядка $\pm 0,01$ мм), отсутствует конусность реза. Ширина реза достигает 0,7 мм, что значительно сокращает количество отходов, делает технологию экологичной, улучшает условия труда. Отсутствуют такие характерные для плазменной резки вредные факторы, как шум, свечение электрической дуги, значительно снижается выброс вредных аэрозолей. Можно резать неэлектропроводные материалы больших толщин. Производительность — до 500 мм/мин при резке черной стали толщиной 6 мм, до 2000 мм/мин при резке нержавеющей стали толщиной 1 мм.

Общий вид комплекса для лазерной резки с компьютерным управлением

Контакты: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 77
Тел.: (38044) 261 52 28, 261 50 83, 269 19 11
Факс: (38044) 227 15 66
E-mail: shelyagin@paton.kiev.ua