



Лазерная сварка разнородных металлов. Обзор

Часть 2

С. В. Курынцев¹, И. Н. Шиганов²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Во второй части представлено продолжение обзора отечественных и зарубежных статей по теме лазерная сварка разнородных металлов, в частности титана с алюминием, алюминия с медью и других наиболее распространенных пар металлов. На основе анализа научных статей установлено, что при сварке титана и алюминия встык рационально смещать лазерный луч на алюминий (предел прочности 168–180 МПа), тогда как при сварке внахлест рационально воздействовать лазерным лучом со стороны титана. Смещение лазерного луча и режимы сварки существенно влияют на толщину ИМС, которую при сварке встык можно снизить до 2–6 мкм. При сварке алюминия и меди лазерный луч необходимо смещать на алюминий как при сварке внахлест, так и при сварке встык. Основным эксплуатационным свойством соединения алюминия и меди является электропроводность, которая напрямую зависит от толщины и состава ИМС. Также рассмотрены технологии сварки титана и магния, стали и меди и других пар металлов.

Ключевые слова: лазерная сварка, разнородные металлы, свариваемость, микроструктура, интерметаллидный слой, механические свойства

Статья получена: 14.09.2020
Принята к публикации: 10.12.2020

Dissimilar Metal Laser Welding. Review

Part 2

S. V. Kuryntsev¹, I. N. Shiganov²

¹ A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI, Kazan, Russia

² N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The second part continues to review the domestic and foreign articles on the topic of dissimilar metal laser welding, in particular, titanium with aluminum, aluminum with copper and other most common metal pairs. Based on the analysis of scientific articles, it has been established that when welding titanium and aluminum butt joint, it is efficient to offset the laser beam to aluminum (ultimate strength 168–180 MPa), while it is efficient to influence the laser beam from the side of titanium in overlapping welding. The offset of the laser beam and welding modes significantly affect the thickness of the IML, which can be reduced to 2–6 microns with butt welding. When welding aluminum and copper, the laser beam needs to be biased towards the aluminum, both for overlapping and butt welding. The main operational property of the aluminum-copper compound is electrical conductivity, which directly depends on the thickness and composition of the IML. The technologies of welding titanium and magnesium, steel and copper, and other pairs of metals are also considered.

Keywords: laser welding, dissimilar metals, weldability, microstructure, intermetallic layer, mechanical properties

Received on: 14.09.2020

Accepted on: 10.12.2020



1. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ТИТАНОВЫМИ СПЛАВАМИ

Как уже было сказано в первой части обзора (см. *Фотоника*. 2020;14(6):492–506), согласно количественному анализу статей по реферативной базе данных Скопус за последние 4 года на втором месте по распространению применения лазерной сварки для разнородных металлов после пары сталь + алюминий, находится пара титан + алюминий. Попытки соединения биметаллических переходников из сплавов на основе титана и алюминия теплопрессовой [1, 2] и другими видами механического и термомеханического классов сварки предпринимались достаточно давно. Полученные соединения в виде переходников использовались для изготовления топливных, масляных и терморегулируемых систем летательных аппаратов и успешно прошли стендовые испытания. Однако данные по соединению термическими видами сварки титана и алюминия с такими же положительными результатами отсутствуют. Лазерная сварка, благодаря своей прецизионности воздействия и высоким скоростям охлаждения, может положительно повлиять на металлургические и термомеханические процессы при сварке титана и алюминия, физические свойства которых существенно отличаются. Так же, как и в случае сварки стали и алюминия, наибольшее распространение получили нахлесточные и стыковые соединения.

Авторы [3] исследуют влияние смещения лазерного луча на титановый сплав VT-20 при его сварке встык с алюминиевым сплавом 1461 и влияние послесварочной термической обработки на механические свойства соединений. Лазерный луч смещают на 0 мм, 0.5 мм, 1 мм, термическая обработка производится при температуре 490 °C, 540 °C, 590 °C в течение 4 и 6 часов. В результате исследований авторы заключают, что максимальные значения предела прочности на разрыв имеют образцы, полученные при смещении лазерного луча на 1 мм (168 МПа), минимальные – без смещения 0 мм (75 МПа). Повышение температуры и времени термической обработки существенно снижает механические свойства, что может объясняться существенно различными коэффициентами термического расширения при достаточно высокой температуре термической обработки (490–590 °C). Влияние низкотемпературной термической обработки на толщину интерметаллического слоя (ИМС) и на механические свойства сварных соединений титана и алюминия исследуют авторы [4]. Смещение луча, как и в предыдущей

1. LASER WELDING OF ALUMINUM ALLOYS WITH TITANIUM ALLOYS

As it already has been mentioned in the first part of the review (See *Photonics Russia*. 2020;14(6):492–506), according to the quantitative analysis of articles on the Scopus abstract database over the past 4 years, the titanium + aluminum pair is second to steel + aluminum pair in the spread of laser welding for dissimilar metals. Attempts to join bimetallic adapters from alloys based on titanium and aluminum by heat pressing [1, 2] and other types of mechanical and thermomechanical classes of welding have been undertaken for a long time. The resulting connections, in the form of adapters, were used for the manufacture of fuel, oil and temperature-controlled systems of aircraft and successfully passed bench tests. However, there are no data on thermal welding of titanium and aluminum with the same positive results. Laser welding, due to its precision of action and high cooling rates, can positively affect metallurgical and thermal deformation processes when welding titanium and aluminum, the physical properties of which differ significantly. Just as in the case of welding steel and aluminum, overlap and butt joints are most common.

The authors of [3] study the effect of laser beam offset on titanium alloy VT-20 during butt welding with aluminum alloy 1461 and the effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of joints. The laser beam is offset by 0 mm, 0.5 mm, 1 mm, heat treatment is carried out at a temperature of 490 °C, 540 °C, 590 °C, for 4 and 6 hours. As a result of the research, the authors conclude that the maximum values of the tensile strength have the samples obtained with a offset of the laser beam by 1 mm (168 MPa), the minimum without offset 0 mm (75 MPa). An increase in the temperature and time of heat treatment significantly reduces the mechanical properties, which can be explained by significantly different coefficients of thermal expansion, at a sufficiently high heat treatment temperature (490–590 °C). The influence of low-temperature heat treatment on the thickness of the intermetallic layer (IML) and on the mechanical properties of welded joints of titanium and aluminum are studied by the authors [4]. The beam is offset, as in the previous work, on titanium (by 1 mm), long-term heat treatment of the obtained welded joints is carried out for 336 h and 138 h at temperatures of 350 °C and 450 °C, respectively. The thickness of the IML in the obtained welded joints was in the range of 30–50 microns, depending on the heat

работе, производится на титан (на 1 мм), проводится долговременная термическая обработка полученных сварных соединений 336 ч и 138 ч при температуре 350 °С и 450 °С соответственно. Толщина ИМС в полученных сварных соединениях находилась в пределах 30–50 мкм в зависимости от тепловложения при сварке. Авторы делают следующие выводы: термическая обработка при температуре 350 °С не влияет на толщину и строение ИМС, предел прочности при растяжении (90–100 МПа) сравним с максимальным без термической обработки (100–110 МПа). При этом отмечено, что после термической обработки при температуре 450 °С толщина ИМС увеличилась, а предел прочности при растяжении снизился до 55–75 МПа.

Исследование влияния смещения лазерного луча на алюминиевый сплав 5A06 в диапазоне 300–700 мкм при сварке встык с титановым сплавом Ti6Al4V описано в работе [5]: толщина соединяемых встык листов 1,5 мм.

Максимальные механические свойства при испытании на разрыв (183 МПа) сварных соединений получены при следующих режимах сварки: смещение луча – 500 мкм, скорость сварки – 11 мм/сек, мощность лазерного излучения – 1130 Вт, толщина ИМС при данных режимах – около 3 мкм. В работе уделяется внимание тщательному исследованию излома после испытаний на растяжение, так как он состоит из трех частей: центральной части, разрушенной по линии титан/сварной шов (хрупкое разрушение), верхней и нижней частей, разрушенных по сварному шву (вязкое разрушение). Верхняя и нижняя части сварного шва образованы в результате смачивания расплавленным алюминием кромок титана (рис. 1 а, б) и имеют существенно отличающийся от центральной части фазовый состав. На рис. 1 с, d представлены СЭМ изображения микроstructures областей С и А соответственно, представленных на рис. 1 б: видно, как значительно отличается толщина ИМС

input during welding. The authors draw the following conclusions, heat treatment at a temperature of 350 °С does not affect the thickness and structure of the IML, the tensile strength (90–100 МПа) is comparable to the maximum without heat treatment (100–110 МПа). Whereas after heat treatment at a temperature of 450 °С, the thickness of the IML increased, and the tensile strength decreased to 55–75 МПа.

The study of the effect of laser beam offset on 5A06 aluminum alloy in the range of 300–700 μm in butt welding with titanium alloy Ti6Al4V is described in [5], the thickness of butt-welded sheets is 1.5 mm. The maximum mechanical properties during tensile testing (183 МПа) of welded joints were obtained under the following welding modes: beam offset – 500 microns, welding speed – 11 mm/s, laser radiation power – 1130 W, IML thickness under these modes is about 3 microns. The work pays attention to a thorough study of the fracture after

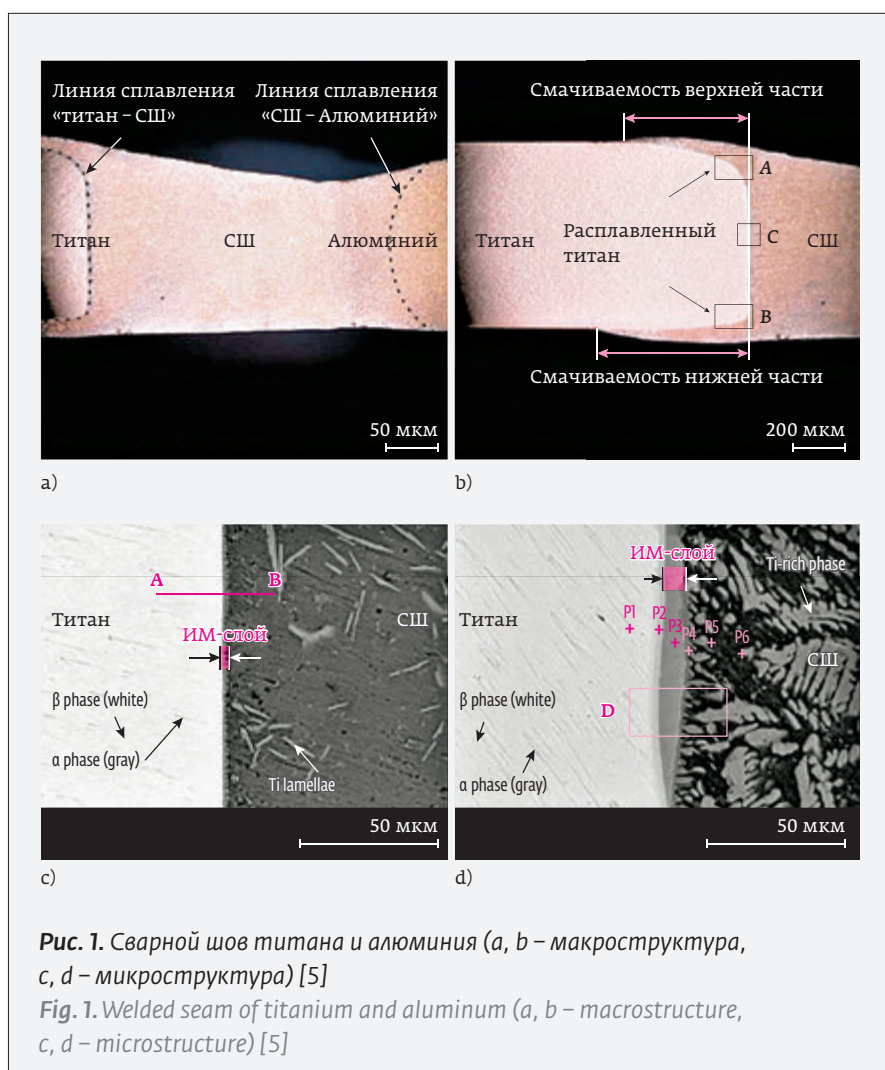


Рис. 1. Сварной шов титана и алюминия (а, б – макроструктура, с, d – микроструктура) [5]

Fig. 1. Welded seam of titanium and aluminum (a, b – macrostructure, c, d – microstructure) [5]



и микроструктура сварного шва в зависимости от глубины сварного шва. Авторы делают вывод о том, что механические свойства зависят не только от толщины и типа ИМС, но и от области и объема смачивания титана жидким алюминием.

Эффект влияния смещения лазерного луча на алюминий и режимов колебаний лучом при сварке с титаном встык исследуют авторы [6]. Указанные параметры сварки влияют на распределение энергии, микроструктуру и механические свойства соединений. Как и в предыдущей работе, смещение лазерного луча на 100–200 мкм и параметры колебаний луча существенно влияют на микроструктуру соединения. Также микроструктура соединений значительно отличается по глубине: чем ближе к источнику нагрева, тем больше толщина ИМС. Максимальные значения предела прочности при разрыве – около 170 МПа, при толщине ИМС ~2 мкм.

Особенности строения сварных швов, полученных лазерной сваркой титанового сплава VT6S и алюминиевого сплава 1424, описаны авторами [7]. В отличие от приведенных выше работ [5, 6] авторы используют достаточно высокие скорости сварки 70–100 мм/сек и смещают лазерный луч на алюминиевый сплав на 200 мкм. При использовании скорости сварки 100 мм/сек наблюдается более тонкий ИМС: авторы заключают, что для образования ИМС с меньшей толщиной необходимо уменьшать тепловложение посредством увеличения отступа на алюминиевый сплав, увеличения скорости сварки и уменьшения мощности лазерного излучения.

В работе [8] авторы исследуют нахлесточные сварные соединения пластин из титана и алюминия, воздействие лазерным лучом производится со стороны титана, применяется импульсный лазер (300 Вт), сварка производится с перекрещиванием точек [9], основные варьируемые параметры – диаметр точки и импульс лазера. Особое внимание авторы уделяют исследованию области зарождения межфазной трещины, так как это важный индикатор свойств сварного соединения. Выявлено, что вероятное место зарождения и распространения трещин – это поверхность между разными ИМС ($TiAl$ и $TiAl_3$) с высоким уровнем плотности дислокаций (рис. 2). Результаты показывают, что ИМС с разным стехиометрическим составом ($TiAl$ и $TiAl_3$ и др.) будет являться слабым местом сварного соединения, в котором будет зарождаться трещина, тогда как ИМС постоянного состава будет являться более стабильным с точки зрения механических свойств.

tensile tests, since it consists of 3 parts: the central part fractured along the titanium/weld line (brittle fracture), upper and lower parts destroyed along the weld seam (ductile fracture). The upper and lower parts of the weld are formed as a result of wetting the titanium edges with molten aluminum (Fig. 1 a, b), and have a phase composition that is significantly different from the central part. Fig. 1 c, d shows SEM images of the microstructure of regions C and A, respectively, shown in Fig. 1b, it can be seen how significantly the thickness of the IML and the microstructure of the welded seam differ, depending on the depth of the welded seam. The authors conclude that the mechanical properties depend not only on the thickness and type of the IML, but also on the area and volume of titanium wetting with liquid aluminum.

The effect of the influence of the offset of the laser beam on aluminum and the modes of oscillation of the beam when welding with titanium butt joint is studied by the authors of [6]. The specified welding parameters affect the energy distribution, microstructure and mechanical properties of the joints. As in the previous work, the offset of the laser beam by 100–200 μm and the parameters of the beam oscillations significantly affect the microstructure of the joint. Also, the microstructure of the joints differs significantly in depth, the closer to the heating source, the greater the thickness of the IML. The maximum values of the ultimate strength at rupture are about 170 МПа, with an IML thickness of ~2 μm .

Features of the structure of welds obtained by laser welding of titanium alloy VT6S and aluminum alloy 1424 are described by the authors [7]. In contrast to the above works [5, 6], the authors use rather high welding speeds of 70–100 mm/s and offset the laser beam onto the aluminum alloy by 200 μm . When using a welding speed of 100 mm/s, a thinner IML is observed, the authors conclude that in order to form an IML with a smaller thickness, it is necessary to reduce heat input by increasing the indent on the aluminum alloy, increasing the welding speed and reducing the laser radiation power.

In work [8], the authors study the overlapping welded joints of plates made of titanium and aluminum, exposure to a laser beam is performed from the titanium side, a pulsed laser (300 W) is used, welding is performed with overcrossing points [9], the main variable parameters are the point diameter and laser pulse. The authors pay special attention to the study of the region of interfacial crack initiation, since this is an important indicator of

Наблюдение начала разрушения не только по хрупкому ИМС, но и по ЗТВ алюминия при испытаниях на срез нахлесточных соединений описаны авторами в работах [10, 11]. Было проведено исследование влияния тепловложения и воздействия лазерным лучом со стороны алюминия и со стороны титана, выявлено, что наиболее оптимальным является воздействие со стороны титана. Режимы сварки и тепловложение существенно влияют не только на фазовый состав за счет скоростей охлаждения, но и на диффузионные процессы и как результат на распределение химических элементов по сечению сварного шва из разнородных металлов, что также влияет на фазовый состав [12].

Необходимо подчеркнуть, что в работах [5, 6, 8] используется сравнительно маленькая для лазерной сварки, скорость 11–17 мм/сек, тогда как в работах [7, 10, 11] используется скорость сварки, которая в разы превосходит указанную (100–150 мм/сек), однако за счет большего смещения лазерного луча на алюминий толщина ИМС находится примерно в одинаковых пределах (2–6 мкм).

Как и в случае сварки стали и алюминия, при сварке титана и алюминия толщина и состав промежуточного между двумя металлами ИМС является проблемной областью сварного соединения. При сварке встык также является распространенной техника смещения лазерного луча: в большинстве случаев луч смещается на алюминий, величина смещения зависит от толщины соединяемых заготовок, а толщина ИМС зависит от режимов сварки и находится в пределах 2–6 мкм. Применение смещения лазерного луча на титан приводит к образованию в разы большего по толщине ИМС, механические свойства таких соединений на 40–50% ниже соединений, полученных при смещении луча на алюминий.

2. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С МЕДЬЮ

Параметры решетки и размер атомов меди и алюминия схожи, тип кристаллической решетки одинаковый, постоянные решеток соизмеримы, поэтому алюминий и медь образуют твердые растворы замещения ограниченной растворимости, предельная растворимость меди в алюминии составляет 2,2 ат.%, также образуются различные интер-

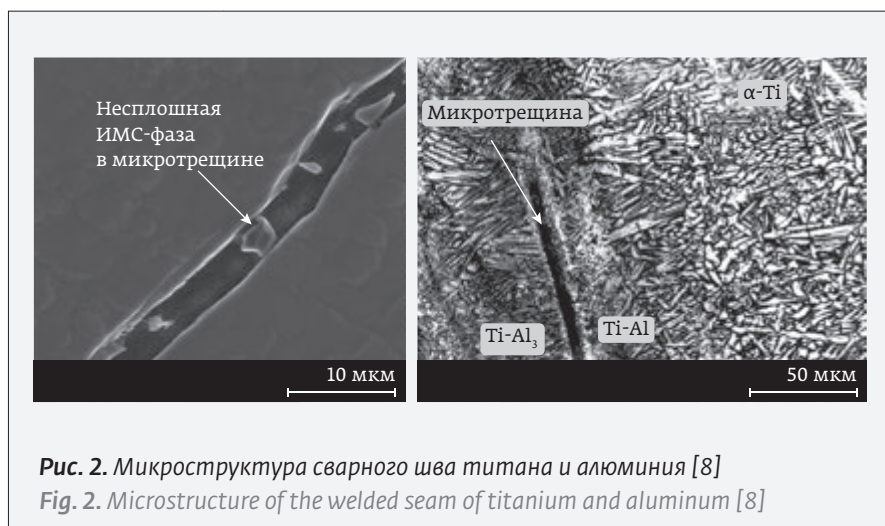


Рис. 2. Микроструктура сварного шва титана и алюминия [8]
Fig. 2. Microstructure of the welded seam of titanium and aluminum [8]

the properties of the welded joint. It was revealed that the probable place of crack initiation and propagation is the surface between different IMLs (TiAl and TiAl₃) with a high level of dislocation density (Fig. 2). The results show that IML with different stoichiometric composition (TiAl and TiAl₃, etc.) will be the weak point of the welded joint, in which a crack will nucleate, while IML of constant composition will be more stable in terms of mechanical properties.

The observation of the onset of fracture not only in the brittle IML, but also in the HAZ of aluminum during shear tests of overlap joints is described by the authors in [10, 11]. A study of the influence of heat input and exposure to a laser beam from the side of aluminum and from the side of titanium was carried out, it was found that the most optimal effect is from the side of titanium. Welding modes and heat input significantly affect not only the phase composition due to the cooling rates, but also the diffusion processes and, as a result, the distribution of chemical elements over the cross section of the weld from dissimilar metals, which also affects the phase composition [12].

It should be emphasized that in works [5, 6, 8], a relatively small speed for laser welding is used, 11–17 mm/s, while in works [7, 10, 11], the welding speed is used, which is several times higher than that indicated (100–150 mm/s), however, due to the greater offset of the laser beam on aluminum, the thickness of the IML is approximately in the same range (2–6 microns).

As in the case of welding steel and aluminum, when welding titanium and aluminum, the thickness and composition of the intermediate between the two metals, the IML is a problem area of the

металлидные фазы ($\text{Al}_2\text{Cu} - \theta$, $\text{AlCu} - \eta_2$, $\text{Al}_3\text{Cu}_4 - \zeta_1$, $\text{Al}_4\text{Cu}_9 - \delta$, $\text{Al}_4\text{Cu}_9 - \gamma_1$) [13].

Как и при сварке алюминия с титаном или с железом основные типы соединений стыковое и нахлесточное. Ввиду того что алюминий и медь являются самыми распространенными проводниками электрического тока, при сварке в основном используются чистые сплавы, имеющие минимальное электросопротивление. Как было сказано в первой части обзора, чистые медь и алюминий, в основном медь, имеют низкий коэффициент поглощения лазерного излучения и имеют высокие значения теплопроводности, поэтому лазерная сварка данной пары металлов осложнена.

Как правило, для соединения данной пары пластичных металлов применяют механические виды сварки, такие как холодная, взрывом, прокаткой, ультразвуковая. Ввиду того что лазерный луч как инструмент металлообработки многофункционален, и иногда от соединения меди и алюминия требуется минимальный металлургический контакт или микроконтакт, при этом не требуется высоких механических характеристик, для их соединения применяют лазерную сварку. Исследованию соединений посвящено достаточное количество работ, в которых в основном исследуются типы интерметаллидов и их влияние на значения электросопротивления. Следует отметить, что электросопротивление интерметаллидов в 5–8 раз больше, чем меди и алюминия, а механические свойства при испытаниях на срез находятся в пределах 100–120 МПа.


Авторы [13] исследуют, какая из образующихся интерметаллидных фаз является более хрупкой


welded joint. In butt welding, the laser beam offset technique is also common, in most cases the beam is displaced to aluminum, the offset value depends on the thickness of the workpieces being joined, and the IML thickness depends on the welding modes and is in the range of 2–6 microns. The use of a offset of the laser beam on titanium leads to the formation of an IML that is many times larger in thickness, the mechanical properties of such compounds are 40–50% lower than those obtained by offset of the beam on aluminum.

2. LASER WELDING OF ALUMINUM ALLOYS WITH COPPER

The lattice parameters and the size of copper and aluminum atoms are similar, the type of crystal lattice is the same, the lattice constants are comparable, therefore, aluminum and copper form solid substitution solutions of limited solubility, the limiting solubility of copper in aluminum is 2.2 at.%, and various intermetallic phases ($\text{Al}_2\text{Cu} - \theta$, $\text{AlCu} - \eta_2$, $\text{Al}_3\text{Cu}_4 - \zeta_1$, $\text{Al}_4\text{Cu}_9 - \delta$, $\text{Al}_4\text{Cu}_9 - \gamma_1$) are formed [13].

As in welding aluminum with titanium or with iron, the main types of joints are butt and overlap. Due to the fact that aluminum and copper are the most common conductors of electric current, pure alloys with minimal electrical resistance are mainly used in welding. As it was said in the first part of the review, pure copper and aluminum, mainly copper, have a low coefficient of absorption of laser radiation and have high thermal conductivity values; therefore, laser welding of this pair of metals is complicated.

117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 8 | +7 (499) 578-05-48 | sales@laser-export.com





ЭЛАНИК®
ЭЛЕМЕНТНЫЙ
ЛАЗЕРНЫЙ
АНАЛИЗАТОР

**КОМПАКТНЫЕ ЛАЗЕРЫ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
C, Si, Cr, Mn, Ni, Cu, Al, Ti и др.

АНАЛИЗ УГЛЕРОДА
В СТАЛИ И ЧУГУНЕ!
БЕЗ
ИНЕРТНОГО ГАЗА!

СЕРИЯ «ТЕХНОЛОГИЯ»




АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО
СОСТАВА ПОКРЫТИЙ

www.elanik.ru

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ:

- Высокая энергия в импульсе (до 1000 мкДж)
- Компактный дизайн
- Высокая пиковая мощность
- Короткий импульс (<10 нс)
- Прекрасное качество пятна
- Кондуктивное охлаждение излучателя
- Высокая стабильность энергии от импульса к импульсу



www.laser-export.com
www.laser-compact.ru

и приводит к ухудшению механических свойств. Сварка производится внахлест при воздействии лучом со стороны алюминия. Авторы заключают, что в основном трещины зарождаются в фазах AlCu и Al₄Cu₉, химический состав поверхности излома имеет 61,6–62,7% меди, остальное – алюминий, что соответствует фазе Al₄Cu₉.

В работе [14] исследуется влияние колебаний и смещения лазерного луча на алюминий в диапазоне 0–400 мкм. Сварка производится в вакууме при пониженном атмосферном давлении, тип соединения стыковое, после подготовки образцов проводятся измерения электросопротивления. Показано, что соотношения плавления соединяемых материалов – важный фактор при получении качественного соединения, который может успешно контролироваться смещением лазерного луча на алюминий. Толщина слоя взаимодействия меди и алюминия, полученная при оптимальных режимах сварки и смещении луча на 300 мкм на алюминий, составляет 80 мкм, толщина интерметаллидного слоя 8–13 мкм, электрические свойства соединения ухудшились незначительно.

Исследование влияния параметров синусоидальных колебаний лазерным лучом перпендикулярно направлению сварки на механические свойства и электросопротивление описаны авторами [15]: сварка производится внахлест, толщина соединяемых листов 1 мм, лазерным лучом воздействовали со стороны алюминия. Авторы рассматривают геометрию сварного шва (ширину и глубину проплавления в медь) как функцию от параметров колебаний лучом (амплитуды и частоты), затем рассматривают содержание меди в сварном шве и электросопротивление как функцию от геометрии сварного шва. В результате проведенных исследований делаются следующие выводы: для обеспечения минимального электросопротивления соединяемых заготовок толщиной 1 мм при сварке внахлест, требуется ширина соединения равная минимум 1 мм (рис. 3); при сварке лазерным лучом без поперечных колебаний ширина соединения равна 0,2–0,3 мм, с поперечными колебаниями 1–1,2 мм за счет увеличения ширины сварочной ванны со стороны алюминия; минимальное электросопротивление и макси-

As a rule, mechanical types of welding are used to join this pair of plastic metals, such as cold, explosion, rolling, ultrasonic. Due to the fact that the laser beam, as a metalworking tool, is multifunctional and sometimes a minimum metallurgical contact or microcontact is required from the connection of copper and aluminum, and high mechanical characteristics are not required, laser welding is used to connect them. A sufficient number of works are devoted to the study of compounds, in which, mainly, the types of intermetallics and their influence on the values of electrical resistance are studied. It should be noted that the electrical resistance of intermetallic compounds is 5–8 times higher than that of copper and aluminum, and the mechanical properties during shear tests are in the range of 100–120 MPa.

The authors of [13] study which of the formed intermetallic phases is more brittle and leads to a deterioration in mechanical properties. Welding is performed with an overlap when exposed to the beam from the aluminum side. The authors conclude that mainly cracks originate in the AlCu and Al₄Cu₉ phases, the chemical composition of the fracture surface is 61.6–62.7% copper, the rest is aluminum, which corresponds to the Al₄Cu₉ phase.

In [14], the influence of oscillations and offset of a laser beam on aluminum in the range 0–400 μm is studied. Welding is carried out in a vacuum at reduced atmospheric pressure, the type of joint is butt, after preparation of the samples, the electrical resistance is measured. It is shown that the ratio of the melting of the materials to be joined

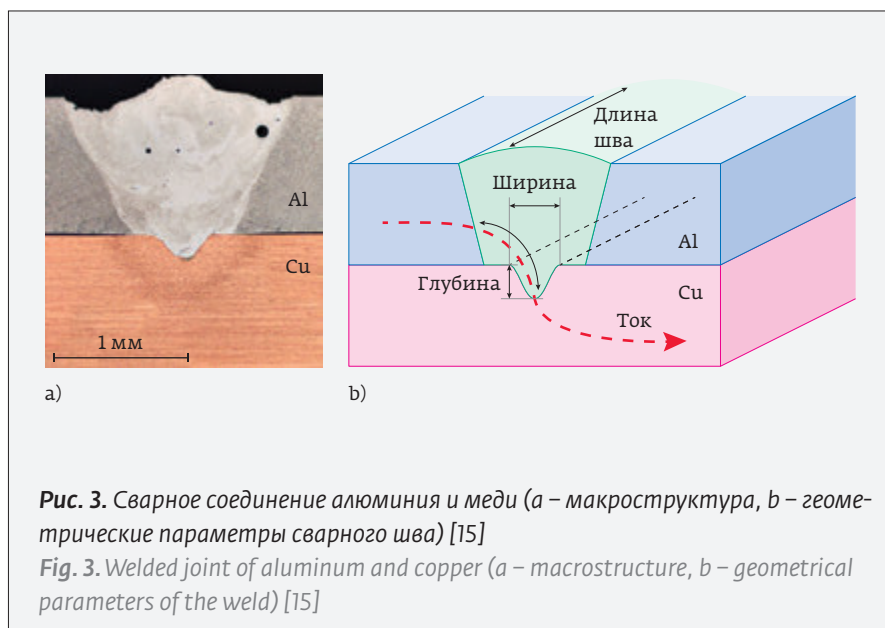


Рис. 3. Сварное соединение алюминия и меди (а – макроструктура, б – геометрические параметры сварного шва) [15]

Fig. 3. Welded joint of aluminum and copper (a – macrostructure, b – geometrical parameters of the weld) [15]



мальные механические свойства можно получить при максимальном соотношении ширины к глубине сварного шва (>4) (рис. 3), при этом глубина проплава в медь должна быть не менее 0,2 мм. Также, основываясь на корреляции механических свойств и электросопротивления, авторы предлагают использовать измерение электросопротивления как метод неразрушающего контроля сварного соединения.

Метод мониторинга процесса лазерной сварки меди и алюминия и контроля смещения лазерного луча, основанный на наблюдении спектра конкретной длины волны для алюминия (394,4 и 396,1 нм) и для меди (578 нм) предложен авторами [16]. Ввиду того что смещение лазерного луча на один из свариваемых металлов является фактором, существенно влияющим на образование интерметаллидного слоя, разработка методов контроля микро-смещений является актуальной задачей. Физической основой метода является изменение длины волны спектра эмиссии плазменного факела в результате смещения лазерного луча на один из компонентов.

В других работах по лазерной сварке алюминия и меди рассматриваются, микросварка электроконтактов [17–20], влияние режимов сварки и присадочного материала на микроструктуру и механические свойства [21–23], теоретические исследования оптимального смещения источника тепла, основанные на фазовой диаграмме [24].

3. ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С МАГНИЕВЫМИ СПЛАВАМИ

Как было сказано в первой части обзора, по распространенности применения лазерной сварки для разнородных металлов после сварки алюминия и меди находятся такие пары, как титан и никель, сталь и титан, сталь и никель, магний и титан,

is an important factor in obtaining a high-quality joint, which can be successfully controlled by offsetting the laser beam to aluminum. The thickness of the layer of interaction between copper and aluminum, obtained with optimal welding conditions and a beam offset of 300 microns on aluminum, is 80 microns, the thickness of the intermetallic layer is 8–13 microns, the electrical properties of the joint did not deteriorate significantly.

The study of the influence of the parameters of sinusoidal oscillations by a laser beam perpendicular to the welding direction on the mechanical properties and electrical resistance is described by the authors [15], welding is performed with an overlap, the thickness of the sheets being joined is 1 mm, the laser beam was applied from the aluminum side. The authors consider the geometry of the weld (width and depth of penetration into copper) as a function of the beam oscillation parameters (amplitude and frequency), then consider the copper content in the weld and electrical resistance as a function of the geometry of the weld. As a result of the research carried out, the following conclusions are drawn. To ensure the minimum electrical resistance of the jointed workpieces with a thickness of 1 mm when overlapping welding, a joint width of at least 1 mm is required (Fig. 3). When welding with a laser beam without transverse oscillations, the joint width is 0.2–0.3 mm, with transverse oscillations 1–1.2 mm due to an increase in the width of the weld pool on the aluminum side. The minimum electrical resistance and maximum mechanical properties can be obtained at the maximum width to depth ratio of the weld (>4) (Fig. 3), while the penetration depth into copper must be at least 0.2 mm. Also, based on the correlation of mechanical properties and electrical resistance, the authors propose to use the measurement of electrical resistance as a method of non-destructive testing of a welded joint.

ИНФРАКРАСНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ $\lambda=2-8$ мкм
СВЕТОДИОДЫ $\lambda=3-7$ мкм
ИНФРАКРАСНЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ
ПИРОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

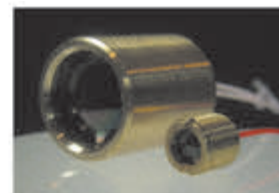


ПРЕИМУЩЕСТВА:

Высокая чувствительность
 Низкое энергопотребление
 Высокое быстродействие
 Неограниченный срок службы

ПРИМЕНЕНИЯ:

Приборы газового анализа
 Низкотемпературная пирометрия
 Тестирование тепловизионных систем
 Тепловизоры



ООО «ИоффеЛЭД»

www.ioffeled.com, Mremennyu@mail.ioffe.ru,
 +7911 2294360, Санкт-Петербург, Политехническая 26

сталь и медь. Из которых с точки зрения перспективности применения и высоких механических характеристик можно выделить пары титан и магний, сталь и медь.

Способы и технологии сварки встык и внахлест титана и магния являются достаточно сложными, в большинстве рассмотренных работ применяется нанесение покрытий из меди или никеля электролитическим осаждением на титан. Основным технологическим параметром, помимо режимов сварки и смещения лазерного луча, является толщина осажденного покрытия (рис. 4).

В работе [25] описано влияние толщины осажденного медного покрытия (диапазон 10,8–28,2 мкм) на микроструктуру и механические свойства стыкового соединения титанового и магниевых сплавов. Механизм образования соединения, зависящий от толщины медного покрытия и области сварного шва (нижняя или верхняя части), разделяется на металлургический (рис. 5 а) и механический (рис. 5 б). Из представленных данных видно, что при толщине покрытия 19,7 мкм наблюдается ровная линия сплавления и перехода от титана к сварному шву, тогда как при толщине покрытия 24,9 мкм линия перехода грубая, неровная и, помимо металлургического контакта, наблюдается механическое взаимодействие поверхности титана и присадочного материала.

Также авторы данной работы имеют другие публикации [26–31] по сварке титана и магния, основанные на аналогичном подходе к организации эксперимента и методам исследования. В этих работах рассматривается влияние толщины электроосажденного покрытия, материала покрытия (медь, никель, их комбинация), режимов лазерной сварки, исследован способ лазерной кондукционной лазерной сварки [9, 32], что является перспективным направлением исследований ввиду существенной разницы температур плавления титана и магния.

На рис. 6 а представлена схема процесса взаимодействия присадочного материала со свариваемыми металлами. Механизм кристаллизации металла сварного шва на границе взаимодействия титан, покрытый медью – присадочный материал на основе магния, при толщине покрытия 19,7 мкм представлен на рис. 6 б. В основу иллюстрации положен анализ микроструктуры. Аналогичный механизм кристаллизации и образования различных фаз при толщине покрытия 24,9 мкм представлен на рис. 6 с (верхняя часть шва) и рис. 6 д (нижняя часть шва). Как

A method for monitoring the process of laser welding of copper and aluminum and controlling the offset of the laser beam based on observing the spectrum of a specific wavelength for aluminum (394.4 and 396.1 nm) and for copper (578 nm) was proposed by the authors [16]. In view of the fact that the offset of the laser beam on one of the metals being welded is a factor that significantly affects the formation of the intermetallic layer, the development of methods for controlling micro-offsets is an urgent task. The physical basis of the method is the change in the wavelength of the emission spectrum of the plasma torch, as a result of the offset of the laser beam to one of the components.

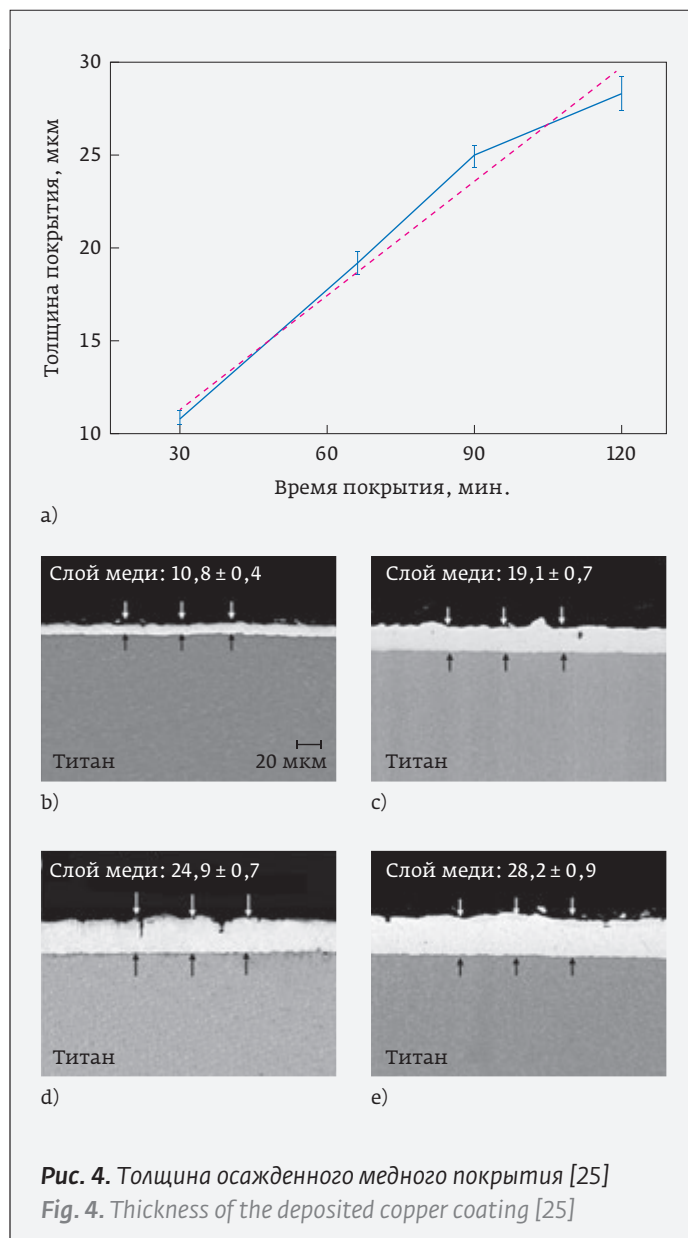


Рис. 4. Толщина осажденного медного покрытия [25]
Fig. 4. Thickness of the deposited copper coating [25]

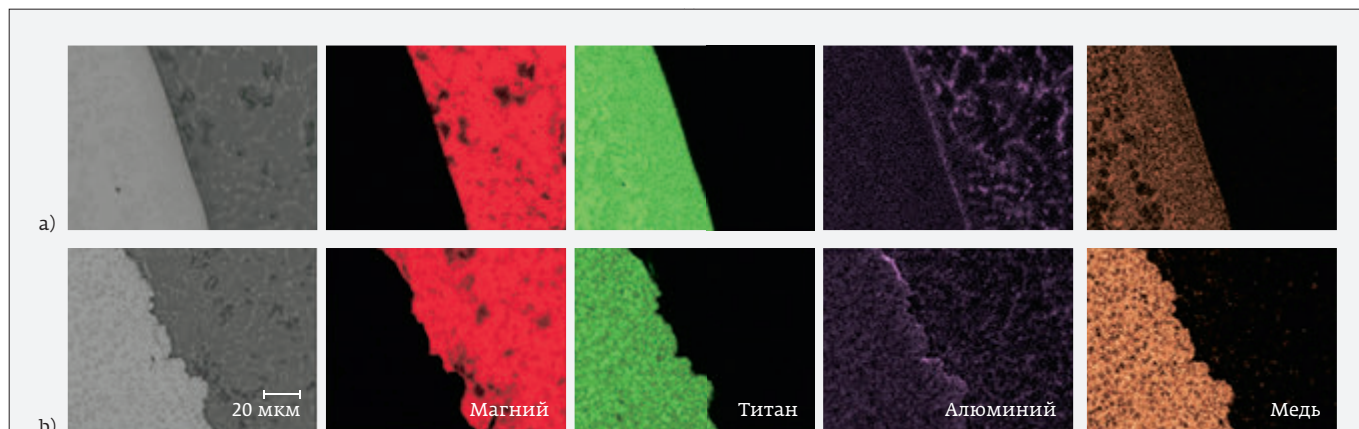


Рис. 5. Влияние толщины покрытия на распределение химических элементов и механизм взаимодействия металлов (а – металлургический, б – механический) [25]

Fig. 5. Influence of coating thickness on the distribution of chemical elements and the mechanism of interaction of metals (a – metallurgical, b – mechanical) [25]

видно из представленных данных, за счет большего количества меди (толщина покрытия 24,9 мкм), образуется большое количество фаз, приводящих к образованию микротрещин. Также существенно по фазовому составу отличается верхняя и нижняя части сварного шва с покрытием 24,9 мкм, за счет большего объема расплавленного металла в верхней части и соответственно меньших скоростей охлаждения. Фаза Ti_3Al имеет самую низкую энтальпию образования, поэтому данная фаза легко кристаллизуется в сравнении с фазами, содержащими медь ($AlCu_2Ti$, Ti_2Cu , Mg_2Cu). Оптимальная толщина покрытия (19,7 мкм) обеспечивает механические свойства сварного соединения на уровне 85% от механических свойства магниевых сплавов.

Other works on laser welding of aluminum and copper consider microwelding of electrical contacts [17-20], the effect of welding modes and filler material on the microstructure and mechanical properties [21-23], theoretical studies of the optimal offset of a heat source based on the phase diagram [24].

3. FEATURES OF LASER WELDING OF TITANIUM ALLOYS WITH MAGNESIUM ALLOYS

As mentioned in the first part of the review, according to the prevalence of laser welding for dissimilar metals, after welding aluminum and copper, there are such pairs as titanium and nickel, steel and tita-



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Программное обеспечение и автоматизация

Изготовление технологических устройств

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845



Izovac

Разработка и изготовление тонкопленочных изделий

Разработка технологий формирования тонких пленок

Оптические элементы

Напылительный сервис

Сложные и уникальные покрытия

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com

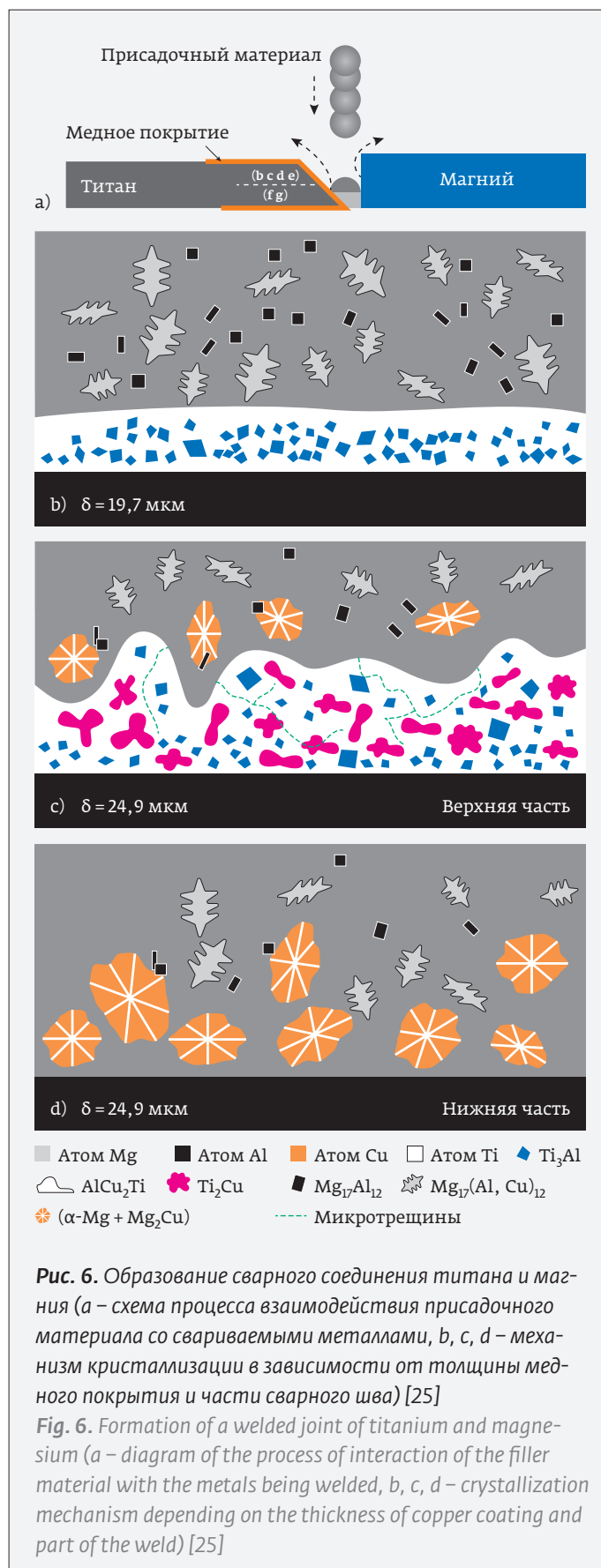
4. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ С МЕДЬЮ

Небольшое количество публикаций в последние годы посвящено лазерной сварке сталей с медью и сплавами на ее основе ввиду того, что данные металлы хорошо свариваются и основной проблемой при лазерной сварке является высокая степень отражения лазерного излучения от меди. Данная проблема решается несколькими способами: смещением луча на сталь и подготовке кромок при сварке малых толщин [33], воздействием лазерного луча на сталь под определенным углом при сварке толщин более 2 мм (рис. 7 а, б) [34], применении разделки кромок, изменяющей плоскость стыка при невозможности наклона лазерного луча [35], использованием расфокусированного луча или заходной пластины [36, 37].

Указанные выше способы лазерной сварки, позволяют получать сварные соединения, имеющие механические свойства на уровне чистой меди. Данные, полученные авторами [34], согласуются с экспериментальными результатами, полученными в работе [37]: при оптимальном смещении лазерного луча на сталь можно получить сварное соединение, которое при испытаниях на растяжение будет разрушаться по ЗТВ меди (рис. 7 с, d, e). За счет термического влияния в ЗТВ меди образуется крупнозернистая структура, которая имеет меньшие механические свойства, чем сварной шов, в котором медь упрочнена железом и легирующими элементами стали, например никелем и марганцем.

Из описанных результатов работ, проведенных отечественными и зарубежными исследователями можно сделать следующие выводы.

1. При сварке титана и алюминия встык более предпочтительной техникой является смещение лазерного луча на алюминий, тогда как при сварке внахлест лазерным лучом целесообразно воздействовать со стороны титана.
2. Лазерную сварку алюминия и меди лучше осуществлять с применением техники смещения луча на алюминий как при сварке встык, так и при сварке внахлест по причине большей степени отражения лазерного излучения и большей теплопроводности меди.
3. Сварку титана и магния необходимо производить с применением нанесения тонких слоев (10–50 мкм) меди или никеля на титан электролитическим осаждением,



что способствует минимизации образования интерметаллидных фаз, приводящих к распространению микротрещин. При нанесении покрытия оптимальных толщин и оптимальных режимах сварки обеспечиваются механические свойства сварного соединения на уровне 85% от механических свойств магниевого сплава.

REFERENCES

1. Lukin V. I. et al. Ocenka kachestva bimetallicheskih soedinenij VT6S-AMg3, poluchennyh teplopressovoj svarkoj. Svarochnoe proizvodstvo. 1981, 2: 41–42. [In Russ].
Лукин В. И. и др. Оценка качества биметаллических соединений VT6S-AMg3, полученных теплопрессовой сваркой. Сварочное производство. 1981, 2: 41–42.
2. Ryablov V. R., Rabkin D. M., Kurochko R. S., Strizhevskaya L. G. Svarka raznorodnyh metallov i splavov. – М.: Mashinostroenie. 1984. 239 p. [In Russ].
Ряблов В. Р., Рабкин Д. М., Курочко Р. С., Стрижевская Л. Г. Сварка разнородных металлов и сплавов. – М.: Машиностроение. 1984. 239 с.
3. Postshkin I. E., Malikov A. G., Orishich A. M., Karpov E. Influence of post-processing on the strength of heterogeneous materials produced by the laser welding. Journal of Physics Conference Series 2019. 1404: 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1404/1/012050.
4. Leo P., D'Ostuni S., Casalino G. Low temperature heat treatments of AA5754-Ti6Al4V dissimilar laser welds: Microstructure evolution and mechanical properties. Optics and Laser Technology. 2018; 100: 109–18. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.09.039.
5. Zhou X. F., Duan J. A., Zhang F., Zhong S. S. The Study on Mechanical Strength of Titanium-Aluminum Dissimilar Butt Joints by Laser Welding-Brazing Process. Materials. 2019; 12 (5). DOI: 10.3390/ma12050712.
6. Chen X., Lei Z. L., Chen Y. B., Han Y., Jiang M., Tian Z. et al. Effect of Laser Beam Oscillation on Laser Welding-Brazing of Ti / Al Dissimilar Metals. Materials. 2019; 12 (24). DOI: 10.3390/ma12244165.
7. Nikulina A. A., Smirnov A. I., Turichin G. A., Klimova-Korsmik O. G., Babkin K. D. Osobennosti stroeniya stykovykh svarnykh shvov, sformirovannykh lazernoj svarkoj raznorodnyh splavov na osnove titana i alyuminiya. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2017; 8 (746): 62–67. [In Russ].
Никулина А. А., Смирнов А. И., Туричин Г. А., Климова-Корсмик О. Г., Бабкин К. Д. Особенности строения стыковых сварных швов, сформированных лазерной сваркой разнородных сплавов на основе титана и алюминия. Металловедение и термическая обработка металлов. 2017; 8 (746): 62–67.
8. Xue X., Pereira A., Vincze G., Wu X. Y., Liao J. Interfacial Characteristics of Dissimilar Ti6Al4V / AA6060 Lap Joint by Pulsed Nd:YAG Laser Welding. Metals. 2019; 9 (1). DOI: 10.3390/met9010071.
9. Grigoryanc A. G. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki / A. G. Grigoryanc, I. N. Shiganov, A. I. Misyurov. Uchebn. posobie dlya VUZov. – М.: Izd-vo MGТУ im. N. E. Baumana. 2006. 664 p. [In Russ].
Григорянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. Учебн. пособие для ВУЗов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 664 с.
10. Kuryncsev S. V., SHiganov I. N., Morushkin A. E. Svarka raznorodnyh

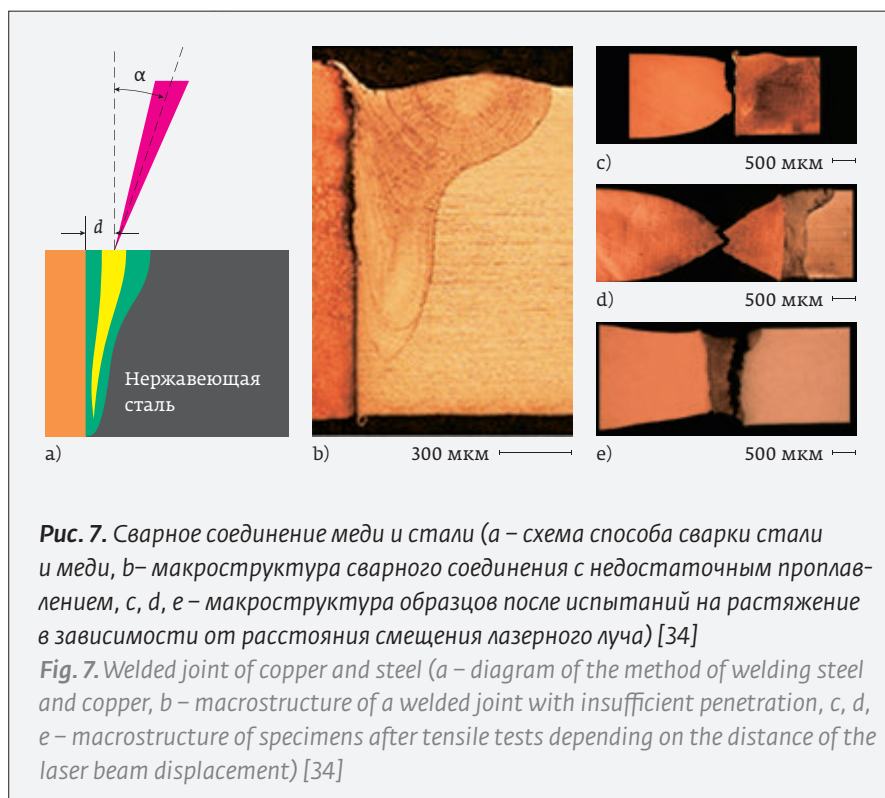


Рис. 7. Сварное соединение меди и стали (а – схема способа сварки стали и меди, б – макроструктура сварного соединения с недостаточным проплавлением, в, г, д, е – макроструктура образцов после испытаний на растяжение в зависимости от расстояния смещения лазерного луча) [34]

Fig. 7. Welded joint of copper and steel (a – diagram of the method of welding steel and copper, b – macrostructure of a welded joint with insufficient penetration, c, d, e – macrostructure of specimens after tensile tests depending on the distance of the laser beam displacement) [34]

niun, steel and nickel, magnesium and titanium, steel and copper. Of which, from the point of view of the promising application and high mechanical characteristics, one can single out titanium and magnesium, steel and copper pairs.

Methods and technologies for butt and overlap welding of titanium and magnesium are rather complicated; in most of the studies considered, the deposition of copper or nickel coatings by electrolytic deposition on titanium is used. The main technological parameter, in addition to the modes of welding and offset of the laser beam, is the thickness of the deposited coating (Fig. 4).

The paper [25] describes the effect of the thickness of the deposited copper coating (range 10.8–28.2 μm) on the microstructure and mechanical properties of the butt joint of titanium and magnesium alloys. The mechanism of joint formation, which depends on the thickness of the copper coating and the area of the weld (lower or upper part), is divided into metallurgical (Fig. 5 a) and mechanical (Fig. 5 b). From the presented data, it can be seen that, at a coating thickness of 19.7 μm , an even line of fusion and transition from titanium to the weld is observed, while at a coating thickness of 24.9 μm , the transition line is rough and uneven and, in addition to metallurgical contact, mechanical interaction of the titanium surface and filler material is observed.



- splavov na osnovе titana i aluminija lazernym izlucheniem. Svarochnoe proizvodstvo. 2019; 2: 16–21. [In Russ].
- Курынец С. В., Шиганов И. Н., Моружкин А. Е. Сварка разнородных сплавов на основе титана и алюминия лазерным излучением. Сварочное производство. 2019; 2: 16–21.
11. Kuryntsev S. V. Microstructure, mechanical and electrical properties of laser-welded overlap joint of CP Ti and AA2024. *Optics and Lasers in Engineering*. 2019; 112: 77–86. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.008.
 12. Kuryntsev S. V. Issledovanie raspredeleniya himicheskikh elementov v soedinenii titana i aluminija, poluchennykh lazernoj svarkoj. *Svarka i diagnostika*. 2019; 2: 28–31. [In Russ].
Курынец С. В. Исследование распределения химических элементов в соединении титана и алюминия, полученных лазерной сваркой. *Сварка и диагностика*. 2019; 2: 28–31.
 13. Schmalen P., Plapper P., Peral I., Titov I., Vallcorba O., Rius J. Composition and phases in laser welded Al-Cu joints by synchrotron x-ray microdiffraction. *10th Cirp Conference on Photonic Technologies* [Lane 2018]. 2018; 74: 27–32. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.006.
 14. Reisgen U., Olschok S., Jakobs S., Holtum N. Influence of the degree of dilution with laser beam vacuum-welded Cu-Al mixed joints on the electrical properties. *10th Cirp Conference on Photonic Technologies* [Lane 2018]. 2018; 74: 23–6. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.022.
 15. Jarwitz M., Fetzer F., Weber R., Graf T. Weld Seam Geometry and Electrical Resistance of Laser-Welded, Aluminum-Copper Dissimilar Joints Produced with Spatial Beam Oscillation. *Metals*. 2018; 8 (7). DOI: 10.3390/ma12244165.
 16. Schmalen P., Plapper P. ASME. Spectroscopic studies of dissimilar al-cu laser welding. *Proceedings of the ASME 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2018; 2. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.006.
 17. Shi W. Q., Huang J., Xie Y. P., Li Y. Q., An F. J. Laser micro-welding technology for Cu-Al dissimilar metals and mechanisms of weld defect formation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017; 93(9–12): 4197–201. DOI: 10.1007/s00170-017-0814-z.
 18. Dimatteo V., Ascari A., Fortunato A. Continuous laser welding with spatial beam oscillation of dissimilar thin sheet materials (Al-Cu and Cu-Al): Process optimization and characterization. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 44: 158–65. DOI: 10.3390/ma12244165.
 19. Lerra F., Ascari A., Fortunato A. The influence of laser pulse shape and separation distance on dissimilar welding of Al and Cu films. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 45: 331–9. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.07.015.
 20. Hollatz S., Heinen P., Limpert E., Olowinsky A., Gillner A. Overlap joining of aluminium and copper using laser micro welding with spatial power modulation. *Welding in the World*. 2020, 64 (3): 513–522. DOI: 10.1007/s40194-020-00848-9.
 21. Zhou L., Luo L. Y., Tan C. W., Li Z. Y., Song X. G., Zhao H. Y. et al. Effect of welding speed on microstructural evolution and mechanical properties of laser welded-brazed Al / brass dissimilar joints. *Optics and Laser Technology*. 2018; 98: 234–46. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.08.004.
 22. Yan S. H., Shi Y. Influence of laser power on microstructure and mechanical property of laser-welded Al / Cu dissimilar lap joints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 45: 312–21. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.07.009.
 23. Rasch M., Roider C., Kohl S., Strauss J., Maurer N., Nagulin K. Y. et al. Shaped laser beam profiles for heat conduction welding of aluminium-copper alloys. *Optics and Lasers in Engineering*. 2019; 115: 179–89. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.11.025.
 24. Shailesh N. Pandya, Jyoti Menghani. Optimum heat source position offset in welding of dissimilar Al-Cu metals using a theoretical approach. *Materials today proceedings*. 2018, 5 (13): 26974–26980. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.08.187.
 25. Jinge Liu, Caiwang Tan, Laijun Wu, Xiaoye Zhao, Zequn Zhang, Bo Chen, Xiaoguo Song, Jicai Feng. Butt laser welding brazing of AZ31Mg alloy to Cu coated Ti6Al4V with AZ92 Mg based filler. *Optics & Laser Technology*. 2019, 117: 200–214. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.04.024.
 26. Zhang K. P., Liu J. G., Tan C. W., Wang G., Song X. G., Chen B. et al. Dissimilar joining of AZ31B Mg alloy to Ni-coated Ti-6Al-4V by laser heat conduction welding process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018; 34: 148–57. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.05.037.
 27. Zhang Z. Q., Tan C. W., Zhao X. Y., Chen B., Song X. G., Zhao H. Y.

Also, the authors of this work have other publications [26–31] on welding titanium and magnesium, based on a similar approach to the organization of the experiment and research methods. In these works, the influence of the thickness of the electrodeposited coating, the coating material (copper, nickel, their combination), laser welding modes is considered, the method of laser conductive laser welding is studied [9, 32], which is a promising area of research due to the significant difference in the melting temperatures of titanium and magnesium.

Fig. 6a shows a diagram of the process of interaction of the filler material with the welded metals. Based on the analysis of the microstructure, the crystallization mechanism of the weld metal, at the interface between titanium coated with copper magnesium-based filler material, with a coating thickness of 19.7 μm is shown in Fig. 6b. A similar mechanism of crystallization and formation of various phases at a coating thickness of 24.9 μm is shown in Fig. 6 in (upper part of the seam) and Fig. 6 g (bottom of the seam). As can be seen from the data presented, due to the larger amount of copper (coating thickness 24.9 μm), a large number of phases are formed, leading to the formation of microcracks. Also, the phase composition of the upper and lower parts of the weld with a coating of 24.9 μm differs significantly, due to the larger volume of molten metal in the upper part and, accordingly, lower cooling rates. The Ti_3Al phase has the lowest enthalpy of formation; therefore, this phase is easily crystallized in comparison with the phases containing copper (AlCu_2Ti , Ti_2Cu , Mg_2Cu). The optimum coating thickness (19.7 μm) ensures the mechanical properties of the welded joint at the level of 85% of the mechanical properties of the magnesium alloy.

4. LASER WELDING OF STEELS WITH COPPER

A small number of publications in recent years have been devoted to laser welding of steels with copper and copper-based alloys, due to the fact that these metals weld well and the main problem in laser welding is the high degree of reflection of laser radiation from copper. This problem is solved in several ways: by offsetting the laser beam to steel and preparing the edges when welding small thicknesses [33], by exposing steel to a certain angle when welding thicknesses of more than 2 mm (Fig. 7 a, b) [34], the use of grooving that changes the plane of the joint when it is impossible to tilt the laser beam [35], the use of a defocused beam or lead-in plate [36, 37].



Стенд для контроля параметров оптических элементов и узлов в условиях, приближенных к открытому космосу

Создать условия разрежения и температуры, близкие к космическим в масштабах лаборатории – выполнимая техническая задача. В АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП») в течение последних трех лет все оптические детали и узлы, оптико-механические узлы и приборы из состава спутниковой бортовой аппаратуры проходят испытания на собственном стенде с термобарокамерой (ТБК).

АО «НПК «СПП» является разработчиком и поставщиком аэрокосмической индустрии уже более 35 лет, предлагая гражданским и военным заказчикам квантово-оптические и оптико-электронные системы и комплексы бортового и наземного базирования.

Стенд располагается на уровне – 6 м от уровня 1-го этажа здания.



Рис. 1
Стенд с ТБК для контроля параметров оптических элементов и узлов

ТБК имеет три оптических илюминатора: два высокоточных безабберационных для измерения параметров «оптики» и один функциональный для имитации солнечного потока. ТБК с измерительной аппаратурой располагаются на двух жесткосоединенных, разгруженных плитах размером: 2.5м x 1.5 м каждая. Это позволяет применять в процессе испытаний высокоточную «чувствительную» измерительную аппаратуру.

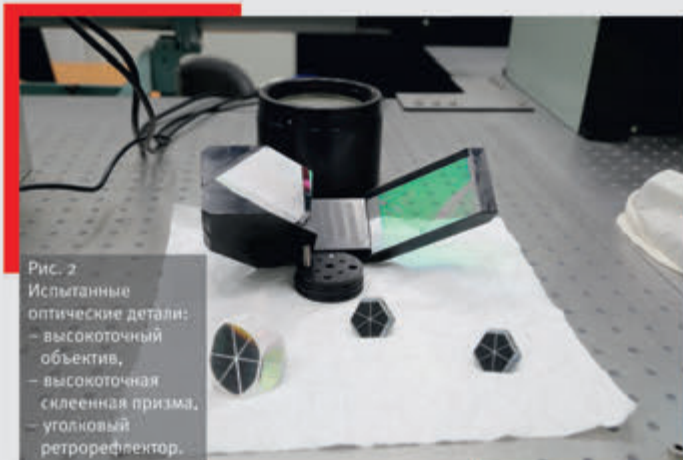


Рис. 2
Испытанные оптические детали:
– высокоточный объектив,
– высокоточная слюенная призма,
– угольный ретрорефлектор.

Параметры ТБК:

- рабочий объем камеры – 0.05 м³
- скорость нагрева – от 1 до 10 °С/мин;
- скорость охлаждения – от 1 до 10 °С/мин;
- температура в камере – от –170 °С до +150°С
- вакуум – до 5×10⁻⁷ мм рт. ст.;
- наибольший размер испытываемого изделия: диаметр (длина) – 0,4 м, высота – 0,4 м.

Параметры «искусственного Солнца»:

- спектральный диапазон излучения 250 ÷ 2 300 нм;
- световая нагрузка до 1800 лм/м²;
- диаметр светового потока до 300 мм.

Объект испытания имеет возможность разворачиваться в процессе испытания на угол ± 180° вокруг вертикальной оси.

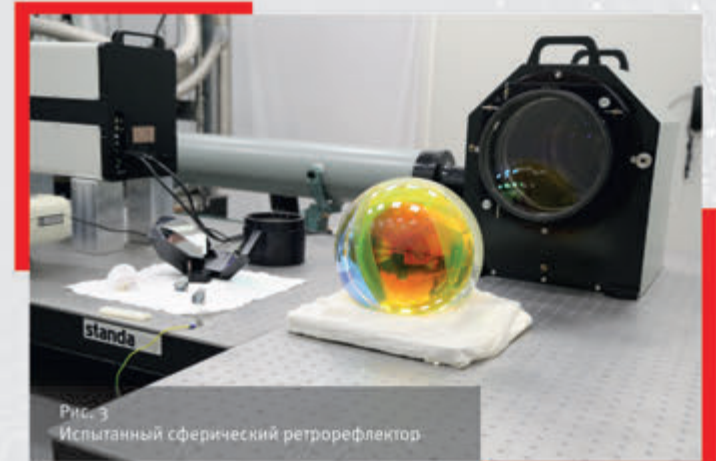


Рис. 3
Испытанный сферический ретрорефлектор

Применяемые приборы для измерения оптических параметров квантово-оптические и оптико-электронные систем:

- интерферометры ФТИ-100 (Россия, ЗАО «Дифракция») с длинами волн: $\lambda = 532$ нм и $\lambda = 632$ нм;
- автоколлиматоры ОПТРО – АК-015 (Россия, ООО «Оптротех»), с погрешностью измерения углов менее 0.1 угл. сек.



- Influence of Cu coating thickness on interfacial reactions in laser welding brazing of Mg to Ti. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018; 261: 61–73. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.009.
28. Auwal S. T., Ramesh S., Zhang Z. Q., Liu J. E., Tan C., Manladan S. M. et al. Influence of electrodeposited Cu-Ni layer on interfacial reaction and mechanical properties of laser welded-brazed Mg / Ti lap joints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 37: 251–65. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.11.029.
29. Tan C. W., Lu Q. S., Chen B., Song X. G., Li L. Q., Feng J. C. et al. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of laser welded-brazed Mg to Ni coated Ti alloys. *Optics and Laser Technology*. 2017; 89: 156–67. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.10.014.
30. Tan C. W., Zang C. W., Zhao X. Y., Xia H. B., Lu Q. S., Song X. G. et al. Influence of Ni-coating thickness on laser lap welding-brazing of Mg / Ti. *Optics and Laser Technology*. 2018; 108: 378–91. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.07.007.
31. Zang C. W., Liu J. G., Tan C. W., Zhang K. P., Song X. G., Chen B. et al. Laser conduction welding characteristics of dissimilar metals Mg / Ti with Al interlayer. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018; 32: 595–605. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.03.019.
32. Kuryntsev S. V., Shiganov I. N., Morushkin A. E., Gil'mutdinov A. H. Lazernaya svarka listovykh elementov konstruktsij s detaljami, poluchennymi additivnoy tekhnologiej vyrashchivaniya. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2018, 1: 10–14. [In Russ].
Курынцев С. В., Шиганов И. Н., Морущкин А. Е., Гильмутдинов А. Х. Лазерная сварка листовых элементов конструкций с деталями, полученными аддитивной технологией выращивания. *Сварочное производство*. 2018, 1: 10–14.
33. Gareev I. S., Pisarev M. S., Sobko S. A. Lazernaya svarka detalej raznoj tolshchiny iz raznorodnykh metallov. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2015, 8: 10–13. [In Russ].
Гареев И. С., Писарев М. С., Собко С. А. Лазерная сварка деталей разной толщины из разнородных металлов. *Сварочное производство*. 2015, 8: 10–13.
34. Chen S. H., Huang J. H., Xia J., Zhao X. K., Lin S. B. Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel / copper laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015; 222: 43–51. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.003.
35. Yao C. W., Xu B. S., Zhang X. C., Huang J., Fu J., Wu Y. X. Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper-steel dissimilar joint. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009; 47(7–8): 807–14. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.02.004.
36. Kuryntsev S. V., Morushkin A. E., Gilmutdinov A. K. Fiber laser welding of austenitic steel and commercially pure copper butt joint. *Optics and Lasers in Engineering*. 2017; 90: 101–9. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.09.001.
37. Kuryntsev S. V., Shiganov I. N. Svarka austenitnoj stali s med'yu rasfokusirovannym izlucheniem volokonnoho lazera. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2017, 4: 7–11. [In Russ].
Курынцев С. В., Шиганов И. Н. Сварка аустенитной стали с медью расфокусированным излучением волоконного лазера. *Сварочное производство*. 2017, 4: 7–11.

ВКЛАД АВТОРОВ

Курынцев С. В. – идея, перевод и анализ научных материалов, работа с графической частью, обработка результатов.
Шиганов И. Н. – обсуждение, предложения и замечания, анализ материала.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заверяют, что не имеют реального или потенциального конфликта интересов.

АВТОРЫ

Курынцев С. В., к. э. н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия.
Шиганов И. Н., д. т. н., проф., Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

The above laser welding methods make it possible to obtain welded joints with mechanical properties at the level of pure copper. The data obtained by the authors of [34] are consistent with the experimental results obtained in [37], with the optimal offset of the laser beam on the steel, it is possible to obtain a welded joint, which, in tensile tests, will fail along the HAZ of copper (Fig. 7 c, d, e). Due to the thermal effect, a coarse-grained structure is formed in the HAZ of copper, which has less mechanical properties than a weld, in which copper is strengthened by iron and alloying elements of steel, for example, nickel and manganese.

CONCLUSION

The following conclusions can be drawn from the described results of work carried out by domestic and foreign researchers.

1. When welding titanium and aluminum butt joint, the preferred technique is to offset the laser beam to the aluminum, while in overlapping welding, it is advisable to act with the laser beam from the titanium side.
2. Laser welding of aluminum and copper is best performed using the technique of offsetting the beam to aluminum, both in butt welding and in overlapping welding, due to the greater degree of reflection of laser radiation and the higher thermal conductivity of copper.
3. Welding of titanium and magnesium should be carried out using thin layers (10–50 microns) of copper or nickel on titanium by electrolytic deposition, which helps to minimize the formation of intermetallic phases leading to the propagation of microcracks. When applying a coating of optimal thicknesses and optimal welding conditions, the mechanical properties of the welded joint are provided at the level of 85% of the mechanical properties of the magnesium alloy.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

Kuryntsev S. V. – concept, translation and analysis of material, work with graphic part, results processing.
Shiganov I. N. – discussion, suggestions and comments, material analysis.

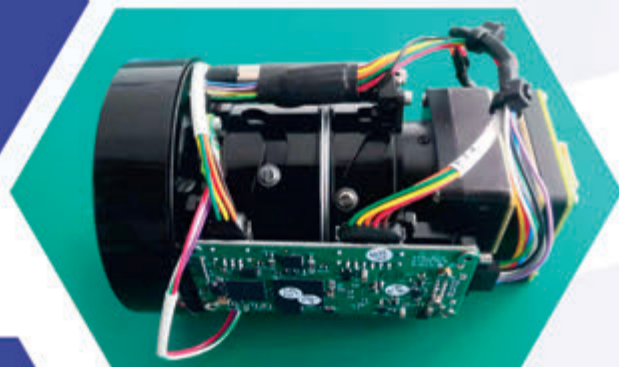
CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that they have no actual or potential conflict of interests.

AUTHORS

Kuryntsev S. V., Cand. of Sciences (Economics), A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI, Kazan, Russia.
Shiganov I. N., Dr. of Science (Engineering), Professor, N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Сверхлегкая, компактная с высокой разрешающей способностью камера ЭС15-75



ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

- 1) БПЛА
- 2) Тепловизионный прицел
- 3) Автоматические устройства для наблюдения

Камера ЭС15-75 обеспечивает:

- стабильное изображение
- высокую четкость и чистоту изображения в полном диапазоне масштабирования.
- точное распознавание, обнаружение и идентификации цели
- поддерживает резкость фокуса по всему оптическому диапазону масштабирования
- быструю интеграцию с интерфейсом и легкость в управлении

Приглашаем Вас на выставку
**«Фотоника.
Мир лазеров и оптики»**,
Павильон Форум, стенд EF095

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ

Модель	Камера ЭС15-75	
Разрешение	640x512 или 1024x768 пикселей	
Тип сенсора	Неохлаждаемый	
Фокусное расстояние (переменный фокус)	15-75 мм	
Спектральный диапазон	8-14 мкм	
Оптические характеристики		
	1024x768, 12 микрон	640x512, 17 мкм
Фокусное расстояние	75 мм	75 мм
Обнаружение (1.8 м x 0.5 м)	3,6 км	2,5 км
Распознавание (1.8 м x 0.5 м)	0,9 км	0,6 км
Обнаружение (2.3 м x 2.3 м)	7,1 км	5,0 км
Распознавание (2.3 м x 2.3 м)	2,1 км	1,5 км
Механические характеристики		
Размеры	Ø 75 мм x 106,3 мм	
Вес	390 гр.	



ООО «Электростекло»
zapros@elektrosteklo.ru
Тел.: +7 495 234 59 52
Факс: +7 (910) 485-67-82