

УДК 621.791.725

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ИЗ СТАЛИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

¹Гоц А.Н., ²Гусев Д.С., ¹Люхтер А.Б.¹ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), Владимир, e-mail: hotz@mail.ru;²ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, e-mail: gusev@laser33.ru

В статье рассмотрена методика экспериментальных исследований прочности составных контрольных образцов из стали и алюминиевых сплавов, которые соединены собой лазерной сваркой, что дает возможность прогнозировать надежность составных элементов составных панелей, широко применяемых в кузовах транспортных средств. Проведен анализ способов соединения листов из алюминиевых сплавов со стальным каркасом, которые условно разделены на сварку в твердой фазе (клеевые соединения, диффузионная, магнитно-импульсная, трением с перемешиванием, клинопрессовая, ультразвуковая) и сварку плавлением (точечно-контактная, дуговая, электронно-лучевая, лазерная и др.). На последний способ соединения меньше влияния оказывают климатические условия, в которых приходится эксплуатировать транспортное средство. Поскольку при лазерной сварке по сравнению с другими способами сварки выделяется наименьшее количество теплоты, то остаточные напряжения и деформации минимальные, а кроме того, уменьшаются размеры зоны разупрочнения. Исследование прочности составных элементов кузовов проводили на контрольных образцах, так как для испытаний реальной конструкции потребуется разработка специальных стенов и методов ускоренных испытаний. Контрольные сварные образцы представляют собой две полосы из стали Ст20 и две пластины из алюминиевого сплава АМг2М, соединенные четырьмя сварными швами, выполненные прямолинейными или кольцевыми замкнутыми непрерывными швами без сквозного проплавления листа алюминиевого сплава. Сварка проводилась на лазерном роботизированном комплексе ЛРК-С с мощностью лазерного излучения 2900 и 3000 Вт и скоростью сварки 18, 20 и 22 мм/с для выбора рациональных технологических режимов. Контрольные образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 6996-66 и подвергались растяжению на универсальной электромеханической испытательной машине с компьютерным управлением WDW-100E. По результатам экспериментальных исследований получены данные о пределах прочности составных контрольных образцов при растяжении, что позволило использовать полученные результаты в расчетах долговечности реальной конструкции.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, стальной каркас, лазерная сварка, контрольный образец, испытательная машина, прочность

EXPERIMENTAL STUDIES OF BOND STRENGTH OF THE CONSTITUENT ELEMENTS OF VEHICLE BODIES MADE OF STEEL AND ALUMINUM ALLOYS

¹Gots A.N., ²Gusev D.S., ¹Lyukhter A.B.¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VlSU), Vladimir, e-mail: hotz@mail.ru;²EC at VSU LLC, Vladimir, e-mail: gusev@laser33.ru

The article considers the methods of experimental studies of the strength of composite control samples with welded joints of steel and aluminum alloys, which will predict the reliability of the constituent elements of aluminum panels connected to the steel frame by laser welding, which are widely used in vehicle bodies. The analysis of methods of joining sheets of aluminum alloys with a steel frame, which are conditionally divided into welding in the solid phase (adhesive joints, diffusion, magnetic pulse, friction with mixing, clinopress, ultrasonic) and melting welding (point-contact, arc, electron beam, laser, etc.). The last method of connection less influence have climatic conditions, which have to operate a vehicle. It is shown that laser welding is characterized by the lowest heat input in comparison with other welding methods. Therefore, after laser welding residual stresses and strains are minimal, and in addition to togas, the size of the softening zone is reduced. The study of the strength of the constituent elements of the bodies was carried out on the control samples, since the test of the real design will require the development of special stands and methods of accelerated tests. Control welded samples are two strips of steel St3 and two plates of aluminum alloy АМg2М, connected by four welds, made of straight or circular closed continuous seams without through penetration of the aluminum alloy sheet. Welding was carried out on the laser robotic complex LRK-C with laser radiation power of 2900 and 3000 W and welding speed of 18, 20 and 22 mm/s for the choice of rational technological modes. Control samples were manufactured in accordance with GOST 6996-66 and subjected to stretching on a universal electromechanical testing machine with computer control WDW-100E. According to the results of experimental studies, data on the strength limits of composite control samples under tension were obtained, which allowed to use the results in the calculations of the durability of the real design.

Keywords: aluminum alloy, steel frame, laser welding, control sample, testing machine, strength

Для снижения массы транспортных средств (легковых автомобилей, автобусов) детали кузовов изготавливаются из алюминиевых сплавов, которые с помощью клеев

или сварки устанавливаются на каркасы из стального металлопроката. В конечном итоге это снижает не только массу транспортного средства, но и стоимость транспорт-

ных расходов за счет снижения расходов топлива, стоимость изготовления за счет уменьшения времени на механическую обработку, а также повышает сопротивление коррозии кузовов в эксплуатации. По данным зарубежных маркетинговых исследований доля деталей из алюминиевых сплавов в конструкциях кузовов легковых автомобилей ежегодно возрастает на 5...7%.

Для соединения облицовочных листов из алюминиевых сплавов со стальным каркасом используются различные виды сварки, которые условно можно разделить на две категории: сварка в твердой фазе (клеевые соединения, диффузионная [1], магнитно-импульсная [2], трением с перемешиванием [3], клинопрессовая [4, 5], ультразвуковая [6]); сварка плавлением (точечно-контактная, дуговая, электронно-лучевая, лазерная; технология Cold Metal Transfer (CMT), паяные соединения) [7–9].

Наземные транспортные средства работают в нестационарных климатических условиях, характеризующихся перепадами температуры и влажности. Диапазон температур эксплуатации транспортного средства в условиях умеренного климата от минус 45 °С до плюс 45 °С, диапазон уровня относительной влажности – от 75 до 100%. Поэтому при соединении составных кузовов сваркой в твердой фазе климатические условия эксплуатации влияют на прочностные характеристики конструктивных элементов [10].

На соединения сваркой плавлением климатические условия эксплуатации оказывают меньшее влияние. Однако в процессе сварки плавлением образуется зона термического влияния (ЗТВ) – часть основного металла, прилегающая к сварочному шву, которая не расплавлялась, но ее структура и свойства меняются под влиянием нагрева при сварке. Поскольку при лазерной сварке, как и в электронно-лучевой, в небольшом объеме материала концентрируется большое количество энергии, то в результате этого ширина ЗТВ по размерам [11].

Во время нагрева расплавленный металл расширяется, что приводит к сжатию околошовной зоны. При удалении от сварного шва источника тепла сварной шов охлаждается и твердеет, при этом «восстанавливаются» механические свойства, одновременно происходит сокращение объема, «усадка» расплавленного металла. Поэтому после сварки возникают остаточные напряжения, которые также влияют на прочность конструкции.

Использование оптимальных режимов лазерной сварки алюминиевых сплавов позволяет существенно уменьшить сокращение объема расплавленного металла, что

приводит к уменьшению деформации околошовной зоны, а значит, и к уменьшению остаточных напряжений. В исследованиях [11] показано, что при лазерной сварке величина поперечной деформации сварного шва в 5–6 раз меньше, чем при автоматической аргоно-дуговой сварке.

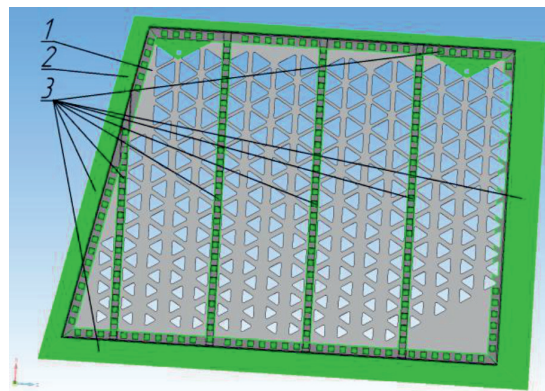


Рис. 1. Крышка смотрового люка над отсеком силовой установки электробуса:

1 – перфорированная пластина из алюминиевого сплава АМГ2М; 2 – стальные полосы (стали 20); 3 – места сварки для соединения листов из стали и алюминиевого сплава

Объектом исследования является крышка смотрового люка, которая закрывает отсек силовой установки электробуса марки Волгабас 5270Е (рис. 1). Несущий каркас крышки изготовлен из стальных пустотелых профилей прямоугольного сечения в виде рамы. На раме путем лазерной сварки по технологии, изложенной в [12], установлены пластины из тонкой листовой стали (материал сталь 20), к которым прямолинейными и кольцевыми швами присоединена перфорированная пластина из алюминиевого сплава марки АМГ2М. Поскольку перфорированная панель из алюминиевого сплава имеет треугольные прорези разной величины, то при действии сил инерции это вызывает неравномерное распределение нагрузки по площади панели. Виды сварных швов – прямолинейных и кольцевых и способ соединения листов стального и из алюминиевого сплава показаны на рис. 2. Полная масса крышки составляет 27,62 кг при массе алюминиевой панели 10,28 кг.

Перед сваркой контактируемые поверхности соединяемых листов обрабатываются лазерной чисткой. Затем листы плотно прижимают. Лазерный луч с постоянной скоростью перемещается вдоль линии сварки под углом 90° относительно соединения (рис. 2). После проплавления листа стали по диаметру лазерного луча расплавленный

стержень внедряется в лист из алюминиевых сплавов (рис. 2), а после остывания обеспечивает плотное соединение двух листов. Защита расплава производится газовой смесью аргона и гелия.

Во время лазерной сварки в шве после расплава происходит перемешивание алюминия Al и железа Fe, но химический состав в таком сварном шве в разных точках состоит не только из Al и Fe, но и Fe_3Al , Fe_2Al_5 , $FeAl_2$ [13]. В связи с этим возникает проблема расчета на прочность и долговечность таких составных соединений, установленных на транспортные средства на действие эксплуатационных нагрузок [14].

Для расчета на прочность и долговечность такой конструкции (рис. 1) требуются данные о механических характеристиках такой составной конструкции. Испытать подобные конструкции можно только на специальных стендах с использованием методов ускоренных испытаний. Задача значительно упрощается, если вместо испытания реальной конструкции провести испытание контрольных образцов.

Поэтому исследование прочности составных элементов из алюминиевого сплава и стального каркаса проводилось на кон-

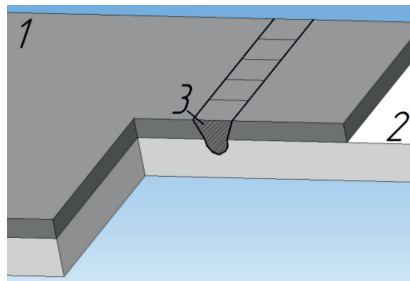
трольных образцах, соединенных лазерной сваркой [12].

Цель исследования: анализ прочности составных конструкций из стального каркаса (сталь 20) и листов из алюминиевого сплава АМГ2М при различных режимах лазерной сварки, что позволит прогнозировать надежность корпусных элементов транспортных средств в эксплуатации.

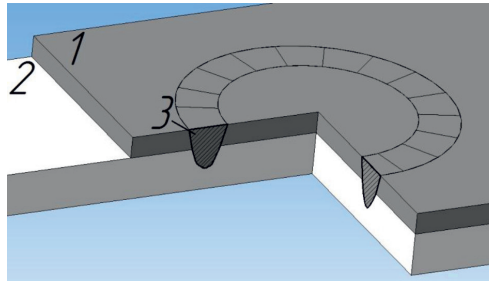
Материалы и методы исследования

Объектом исследования является характеристика механической прочности сварных составных контрольных сварных образцов из стали и алюминиевых сплавов, полученных на основании растяжения контрольных сварных образцов. Полученные результаты использованы для расчета прочности и долговечности опытной крышки смотрового люка отсека силовой установки электробуса Волгабас 5270Е [14].

Контрольные сварные образцы представляют собой две пластины из стали 20 и две пластины из алюминиевого сплава АМГ2М, соединенные четырьмя сварными швами, выполненные прямолинейными или кольцевыми замкнутыми непрерывными швами без сквозного проплавления листа алюминиевого сплава (рис. 3). Длина расчетной части образца $l_0 = 120$ мм, ширина ее $- h_{cb} = 30 \pm 0,5$ мм (в соответствии с ГОСТ 6996-66). Толщина листа из стали Ст3 – 1,5 мм, толщина листа из алюминиевого сплава АМГ2М – 3 мм.

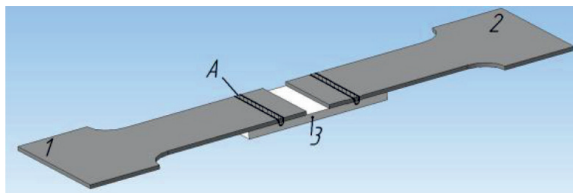


а)

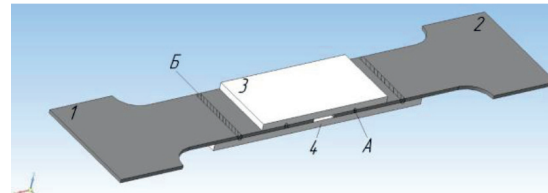


б)

Рис. 2. Виды сварных швов в поперечном сечении: а – прямолинейный, б – кольцевой замкнутый; 1 – стальной лист, 2 – лист алюминиевого сплава; 3 – сварной шов в поперечном сечении



а)



б)

Рис. 3. Контрольные сварные образцы: а – соединение листов 1 и 2 из стали 20 с листом 3 из сплава АМГ2М; б – соединение листов 1 и 2 из стали 20 с листом 4 из сплава АМГ2М; А и Б – места сварных соединений (на примере прямолинейного шва)

Такого вида соединение выбрано, чтобы при испытаниях на растяжение не возникал продольный изгиб – средняя линия концевых выступов 1 и 2 (рис. 3, а) должна располагаться на одной линии. Использование нескольких сварных соединений на одном образце аналогично их использованию в реальных конструкциях (рис. 3, б) позволяет также учесть их взаимное влияние друг на друга.

При испытаниях концевые выступы 1 и 2 (рис. 3) устанавливаются в захваты испытательной машины и подвергаются растяжению под действием плавно возрастающего усилия до разрушения. Вектор нагрузки при таком нагружении совпадает с основной осью испытываемого образца.

Лазерная сварка проводилась при различных режимах: мощность лазерного излучения принималась 2900 и 3000 Вт; скорость сварки – 18, 20 и 22 мм/с; глубина проплавления алюминиевого сплава (глубина сварочной ванны) изменялась от 0,74 до 1,72 мм. Это позволило выбрать рациональные режимы для сварки реальной конструкции.

В качестве оценочных показателей при испытаниях выбирают наибольшее усилие $P_{\max}$, при котором происходит разрушение образца или нарушение целостности соединения. Разрушение образца при растяжении может произойти, например, путем отрыва либо по линии сварного шва, в поперечном сечении алюминиевого сплава или в сечении ЗТВ. Может также произойти срез части материала стального каркаса – шипа (рис. 2), который внедрился в пластину алюминиевого сплава, как заклепка. И, наконец, возможен вариант нарушения соединения после смятия боковой стенки алюминиевого сплава в сечении, куда внедрен стальной расплав (рис. 2). После этого целостность соединения нарушается.

Если разрушение при растяжении происходит путем отрыва, то прочность оценивается пределом прочности $\sigma_v = P_{\max}/F$, где F – площадь поперечного сечения образца по линии разрушения.

Если разрушение происходит в результате среза, внедренного в лист алюминиевого сплава расплавленного металла стального каркаса, то касательное напряжение оценивается также пределом прочности на сдвиг $\tau_v = P_{\max}/F_v$, где F_v – площадь поперечного сечения по линии сдвига.

При продольном растяжении контрольных сварных образцов может произойти смятие стенки алюминиевого сплава в результате давления ее на внедренный стальной стержень. Закон распределения таких давлений неизвестен, так как он во многом зависит от неправильности формы внедренного стержня и структуры материала в сварочном шве. Поэтому расчет напряжений смятия в данном случае производится условно – полагаем, что неравномерное давление, передающееся на поверхность листа алюминиевого сплава АМг2М от внедренного стального стержня, распределяется равномерно по диаметральной плоскости сечения. Тогда в случае смятия листа из алюминиевого сплава условное напряжение смятия может быть определено по формуле

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{P_{\max}}{t_w d}, \quad (1)$$

где t_w – длина сварного шва; d – глубина внедрения после сварки стального шипа в алюминиевый сплав.

Прочность сварного соединения оценивается по коэффициенту ослабления, равному отношению на-

пряжения $\sigma_{\text{sv.soed}}$ в зависимости от вида разрушения (отрыв, сдвиг, смятие) к соответствующему напряжению основного материала $\sigma_{\text{осн}}$ (в данном случае алюминиевого сплава АМг2М), взятому из справочных данных:

$$k = \frac{\sigma_{\text{sv.soed}}}{\sigma_{\text{осн}}}. \quad (2)$$

Лазерная варка осуществлялась на лазерном роботизированном комплексе ЛРК-С в лаборатории лазерной сварки научно-образовательного центра ВлГУ, в составе: шестиосевой робот Fanuc M710iC-50, сварочная головка IPG FLW D50, иттербиевый волоконный лазер ЛС-3 мощностью 3 кВт, модульная защитная кабина с системой аварийного отключения лазерного излучения.

Испытания контрольных сварных образцов при статическом растяжении проводились на универсальной электромеханической испытательной машине с компьютерным управлением WDW-100E.

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении испытаний на растяжение было выявлено два типа разрушения: от нормальных напряжений в зоне термического влияния стального листа (отрыв по поперечному сечению) и нарушение целостности соединения в результате смятия боковых стенок алюминиевого сплава стального стержня (рис. 4).

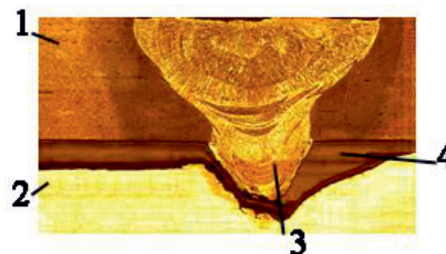


Рис. 4. Смятие боковых стенок отверстия в пластине алюминиевого сплава в результате действия на контрольный сварной образец продольной растягивающей силы:
1 – лист стали 20; 2 – лист алюминиевого сплава; 3 – проплавленный стержень; 4 – зазор между стержнем 3 и боковой стенкой алюминиевого сплава

В первом случае происходило хрупкое разрушение в зоне термического влияния из-за изменения структуры стали и высокой концентрации напряжений в данной области.

Характер нарушения целостности соединения полос стальной и алюминиевого сплава показано на рис. 4. После нагрева и проплавления листа стали 1 по диаметру лазерного луча расплавленный стержень

жень 3 внедряется в лист из алюминиевых сплавов 2. После приложении продольной растягивающей силы происходит нажатие стержня 3 на боковые стенки отверстия в пластине алюминиевого сплава 2, в результате чего происходит его смятие. Так как между стержнем 3 и листом алюминиевого сплава 2 появляется зазор 4, то стальной стержень уже не удерживает прочное соединение листов 1 и 2 и происходит разрушение соединения.

Результаты механических испытаний контрольных сварных образцов с прямолинейным сварным швом (рис. 2, а), выполненным при разных технологических режимах: 1 – мощность лазерного излучения $P_1 = 2900$ Вт; скорость перемещения сварочной головки $v_1 = 18$ мм/с; 2 – $P_2 = 2900$ Вт, $v_2 = 20$ мм/с; 3 – $P_3 = 3000$ Вт, $v_3 = 18$ мм/с; 4 – $P_4 = 3000$ Вт, $v_4 = 20$ мм/с, а образцов с кольцевым швом (рис. 2, б), выполненных при режимах лазерной сварки: 1 – мощность лазерного излучения $P_1 = 2900$ Вт; скорость перемещения сварочной головки – $v_1 = 20$ мм/с; 2 – $P_2 = 2900$ Вт, $v_2 = 22$ мм/с; 3 – $P_3 = 3000$ Вт, $v_3 = 20$ мм/с; 4 – $P_4 = 3000$ Вт, $v_4 = 22$ мм/с приведены в таблице (столбцы 2 и 3).

По результатам испытаний при растяжении максимальное усилие (после расчета разрушающих напряжений) выдержали контрольные образцы (таблица, столбец 4 и рис. 4): для прямолинейных швов, выполненных при режимах лазерной сварки $P = 3000$ Вт, $v = 18$ мм/с – $P_{\max} = 8,03$ кН,

а для кольцевых швов – $P = 3000$ Вт, $v = 20$ мм/с – $P_{\max} = 12,05$ кН. Нарушение целостности соединения произошло в результате смятия стенок листа алюминиевого сплава.

После обработки результатов испытаний для серии образцов в таблице приведены значения предела прочности при растяжении, а также путем расчета по формуле (1) определено предельное напряжение при смятии, при котором происходит нарушение целостности соединения. Для этих же величин определены доверительные интервалы для математического ожидания этих величин с уровнем доверительной вероятности 0,95 (таблица, столбец 6). В столбце 7 приведен коэффициент ослабления сварного соединения, вычисленный по формуле (2). Для определения рассеяния экспериментальных данных использовали критерий Н.В. Смирнова. Отклонений от нормы по этому критерию не обнаружено.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований контрольных образцов, которые представляли собой соединенные лазерной сваркой с прямолинейными и кольцевыми швами пластины из стали 20 и алюминиевого сплава АМг2М, определены режимы сварки, при использовании которых прочность соединения будет максимальной. Для прямолинейных швов это режимы: $P = 3000$ Вт, $v = 18$ мм/с, а для кольцевых – $P = 3000$ Вт, $v = 20$ мм/с.

Результаты механических испытаний контрольных сварных образцов

Тип сварного шва	Режимы лазерной сварки		Результаты экспериментальных исследований			
	Выходная мощность лазера P , Вт	Скорость перемещения лазерной головки v , мм/с	Максимальное усилие $P_{\max, \text{ср}}$, кН	Площадь сечения при разрушении или сечение в диаметральной плоскости смятия F_0 , мм ²	Доверительные интервалы предельного напряжения $\overline{\sigma_b} - \varepsilon \leq \sigma_b \leq \overline{\sigma_b} + \varepsilon$, МПа	Коэффициент ослабления k
1	2	3	4	5	6	7
Разрушение в ЗТВ стального листа путем отрыва от нормальных напряжений						
Прямолинейный	2900	18	8,10	45,00	$163,79 \leq \sigma_b \leq 196,29$	0,43
	2900	20	7,56	45,00	$162,11 \leq \sigma_b \leq 173,63$	0,40
Кольцевой	2900	20	8,99	45,00	$190,37 \leq \sigma_b \leq 209,33$	0,48
	2900	22	8,09	45,00	$174,28 \leq \sigma_b \leq 185,36$	0,43
Нарушение целостности соединения в результате смятия						
Прямолинейный	3000	18	8,03	22,20	$332,35 \leq \sigma_b \leq 390,89$	0,90
	3000	20	8,12	25,20	$308,32 \leq \sigma_b \leq 336,12$	0,81
Кольцевой	3000	20	12,05	32,17	$363,83 \leq \sigma_b \leq 385,31$	0,94
	3000	22	10,03	43,23	$228,23 \leq \sigma_b \leq 235,81$	0,58

Для них доверительные интервалы предельных напряжений при уровне доверительной вероятности равной 0,95 составляют $332,35 \leq \sigma_b \leq 380,89$ и $363,83 \leq \sigma_b \leq 385,31$ соответственно, а коэффициент ослабления прочности сварного соединения относительно напряжений основного материала (взятого из справочных данных в данном случае алюминиевого сплава АМг2М), составляет 0,90 и 0,94 соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0158 от 28 ноября 2014 г. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57714X0158.

Список литературы

1. Akca E., Gursel A. The importance of interlayers in diffusion welding. Periodicals of engineering and natural sciences. 2015. Vol. 3. № 2. P. 12–16.
2. Казеев М.Н. Исследование магнитно-импульсной сварки в плоской геометрии // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 6. С. 38–44.
3. Sahin M. Joining of stainless-steel and aluminum materials by friction welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 41. P. 487–497.
4. Calabrese L. Durability of hybrid clinch-bonded steel/aluminum joints in salt spray environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 87. P. 3137–3147.
5. Mucha J., Kašák E., Spišák L. Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements. Archives of civil and mechanical engineering. 2011. № 1. Vol. 11. P. 135–148.
6. Tsujino K. Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens. Ultrasonics. 2002. Vol. 40. № 1–8. P. 371–374.
7. Рябов В.Р. Сварка плавлением алюминия со сталью. Киев: Наукова думка, 1969. 232 с.
8. Reisgen U., Otten C., Schönberger J. Investigations about the influence of the time-temperature curve on the formation of intermetallic phases during electron beam welding of steel-aluminum material combinations. Welding in the World. 2014. № 58. P. 443–454.
9. Nishimoto K., Fujii H., Katayama S. Laser pressure welding of aluminum alloy and low carbon steel. Quarterly journal of the japan welding society. 2004. № 4. Vol. 22. P. 572–579.
10. Шакиров А.А. Повышение долговечности каркасно-панельных кузовов транспортных средств с макрогеометрическими отклонениями при помощи клеємеханических соединений с управляемой жесткостью: дис... канд. техн. наук. Челябинск, 2016. 165 с.
11. Шиганов И., Холопов А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 6–10.
12. Шлегель А.Н., Люхтер А.Б., Кононов В.А., Валуйских В.П., Гусев Д.С. Способ лазерной сварки внахлест листов конструкционной стали и сплавов алюминия. Патент РФ № 2638267. Патентообладатель ФГБОУВО ВлГУ. 2017. Бюл. № 35.
13. Sierra G., Peyre P., Deschaux-Beaumec F., Stuart D., Fras G. Steel to aluminum key-hole laser welding. Materials Science and Engineering A. 2007. Vol. 447. P. 197–208.
14. Гоц А.Н., Гусев Д.С., Гуськов В.Ф., Люхтер А.Б. Расчет на прочность элементов кузовов автобусов от действия инерционных нагрузок // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 39–44.