

УДК 621.791.725
DOI: 10.12737/18077

А.В. Богданов, к.т.н.,
Б.В. Букеткин, старший преподаватель,
А.В. Пересторонин, аспирант,
Ф. Адамини, стажер
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)
E-mail: mtbmstu@mail.ru

Влияние условий импульсной лазерной сварки на прочность нахлесточных сварных соединений

Приведены результаты исследования влияния зазора между свариваемыми деталями на геометрию и прочностные свойства нахлесточных сварных соединений при импульсной лазерной сварке тонколистовой аустенитной стали. Показано, что закрытие зазора происходит преимущественно за счет депланации верхней заготовки, при увеличении зазора размеры и прочность соединений снижаются, а также возникает наклеп металла шва.

Ключевые слова: дуговая сварка; лазерная сварка; импульсная сварка; механические свойства; зазор.

A.V. Bogdanov, Can.Eng.,
B.V. Buketkin, Senior Lecturer,
A.V. Perestoronin, Post Graduate Student,
F. Adamini, Probationer
(Bauman State Technical University of Moscow)

Effect of pulse laser bonding conditions on lap weld joint strength

The research results of a gap influence between welding parts upon geometry and strength properties of lap weld joints at pulse laser bonding of thin-sheet austenitic steel are cited. It is shown that gap covering takes place mainly at the expense of upper billet deplanation at the gap increase the dimensions and strength of joints drop, and also cold-hardening of a metal joint arises.

Keywords: laser bonding; impulse welding; stress-strain properties; gap.

При изготовлении различных изделий в машиностроении и приборостроении необходимо выполнять сварные швы в тонкостенных конструкциях. Наиболее часто такая операция требуется при производстве медицинских приспособлений, изделий для химической промышленности, деталей двигателей, сильфонов, электроприборов.

Для выполнения таких швов можно использовать дуговую сварку неплавящимся электродом или контактную сварку, однако, эти методы имеют свои недостатки. Главными

из них являются значительные размеры шва и зоны термического влияния, большая температурная деформация и существенное изменение всего комплекса свойств металла в результате его длительного пребывания в высоких температурах.

В частности, при дуговой сварке нержавеющих сталей может возникать охрупчивание, снижение коррозионной стойкости и неблагоприятное изменение химического состава металла [1].

Добиться существенно меньшего изменения свойств свариваемого металла можно за счет минимизации теплового воздействия на металл в процессе сварки, что может быть достигнуто путем применения высококонцентрированного теплового источника, такого, как лазерный луч.

При лазерной сварке наименьшее тепловложение обеспечивается при импульсном воздействии. Такой процесс наилучшим образом подходит для выполнения соединений в тонкостенных конструкциях.

Технологии импульсной лазерной сварки достаточно сложно оптимизировать, поскольку схожих результатов можно добиться при различных сочетаниях значений характеристик режима сварки. Однако на сегодняшний день они достаточно хорошо изучены, существуют методики расчета тепловых полей и определения параметров режима сварки [2], исследованы влияние параметров режима на геометрию шва, его структуру и свойства [3, 4], эффективность процесса [5, 6], сварка разнородных металлов [8] и многие другие важные аспекты применения рассматриваемого способа сварки.

Процесс нахлесточной лазерной сварки ввиду более редкого его использования менее изучен. В частности, в литературе отсутствуют данные о влиянии зазора между свариваемыми заготовками на свойства сварных соединений. В то же время, как известно, при сварке тонкостенных конструкций, особенно больших габаритов, наличие зазора неизбежно. Это связано как с неточностями изготовления заготовок, так и с их деформациями под действием механического и теплового воздействия.

В данной статье изложены результаты исследования влияния зазора на свойства нахлесточных сварных соединений, выполненных импульсной лазерной сваркой.

Для проведения экспериментов была выбрана широко распространенная хромоникелевая аустенитная коррозионно-стойкая сталь AISI 304. Как известно, стали системы легирования X18H9 являются наиболее востребованными нержавеющей стали в производ-

стве в наши дни. Химический состав металла использованных образцов, полученный методом спектрального анализа, представлен в табл. 1.

Для проведения экспериментов использовались листовые образцы толщиной 0,5 мм со шлифованной поверхностью.

Лазерная сварка осуществлялась на технологической установке LRS-150A производства ОКБ «Булат» на основе твердотельного лазера с активным элементом YAG:Nd³⁺. Она позволяет реализовывать лазерную сварку с пиковой мощностью в импульсе до 6 кВт, максимально возможная длительность импульса – до 20 мс.

На первом этапе было произведено определение оптимальных режимов сварки, обеспечивающих формирование шва с существенным проплавлением нижнего образца и высокими механическими свойствами. В дальнейшем эти режимы использовались для сварки образцов с зазором.

На основе данных, известных из литературы и предварительных исследований, были определены не варьируемые параметры сварки: частота следования импульсов – 8 Гц; диаметр пятна – 0,65 мм; шаг между точками – 0,2 мм.

Пиковая мощность лазерного излучения варьировалась в пределах от 1000 до 1500 Вт, длительность импульса – в пределах от 14 до 17 мс.

Результаты измерения геометрических размеров полученных швов представлены на рис. 1.

При выборе режимов для дальнейших исследований руководствовались тем, что повышению прочности шва на срез способствует увеличение его ширины в зоне соприкосновения свариваемых пластин (рис. 1, б). При этом во многих случаях, например, в изделиях, работающих в агрессивных средах, полное проплавление нежелательно (рис.1, в), поскольку металл шва в зоне термического влияния может иметь пониженную коррозионную стойкость. Поэтому для изучения механических свойств выбраны режимы, параметры которых приведены в табл. 2.

1. Химический состав исследуемых образцов

Химический элемент	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Cu
Содержание, %	основа	18,90	9,40	1,00	0,68	0,18

2. Параметры режимов сварки образцов для механических испытаний

Номер режима	Пиковая мощность излучения, Вт	Длительность импульса, мс	Частота следования импульсов, Гц	Диаметр пятна, мм	Шаг между точками, мм
1	1 400	16	8,0	0,65	0,2
2	1 400	17			
3	1 500	15			

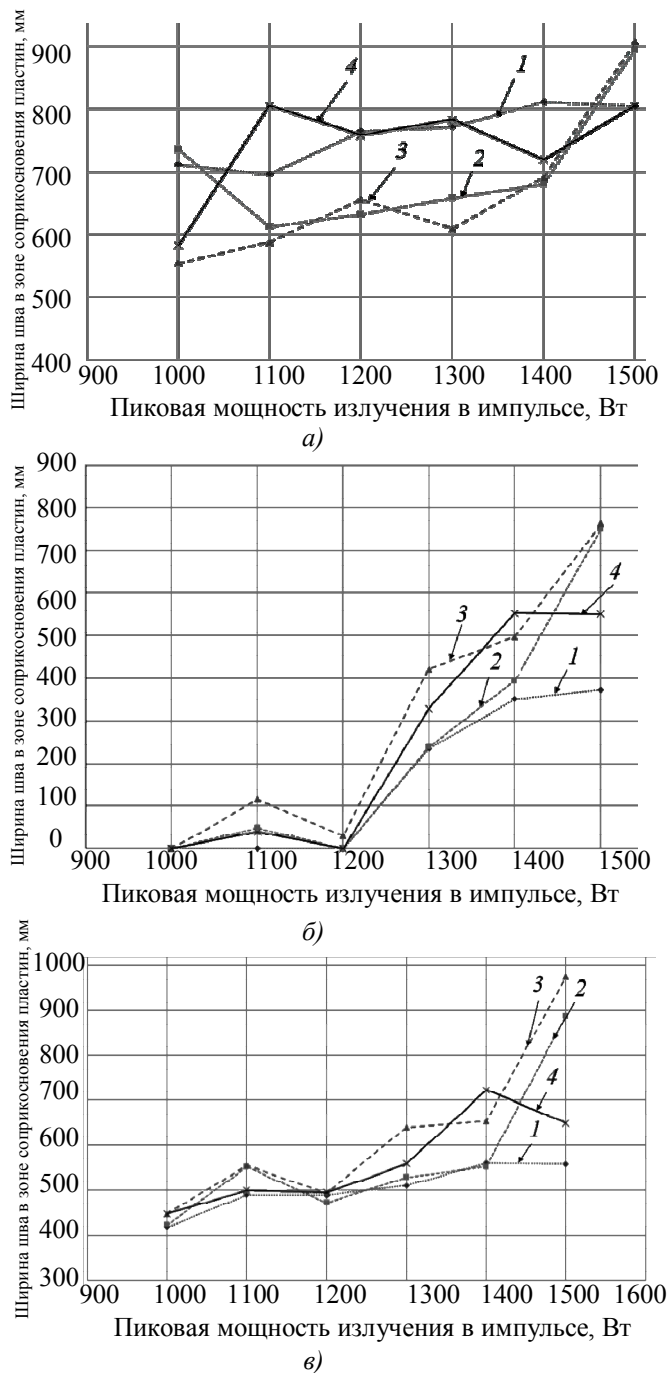


Рис. 1. Зависимость геометрических размеров швов от пиковой мощности излучения при различных длительностях импульса τ :

1 – $\tau = 14$ мс; 2 – $\tau = 15$ мс; 3 – $\tau = 16$ мс; 4 – $\tau = 17$ мс;
 а – ширина шва сверху; б – ширина шва в области соприкосновения пластин; в – глубина проплавления

Для определения прочностных свойств использовались образцы, полученные сваркой двух пластин длиной 100 мм, шириной 20 мм и толщиной 0,5 мм. Сварка производилась с перехлестом образцов вдоль короткой грани без заходных планок.

Касательные напряжения рассчитывались как отношение усилия к площади сечения шва, полученного при данных параметрах сварки. Длина швов составляла 20 мм, ширина определялась металлографическим исследованием.

Механические испытания проводились на установке Quasar 50 производства Cesare Galbani S.P.A. (Италия), позволяющей получить диаграмму растяжения образцов. В рассматриваемом случае из-за малой толщины образцов точное измерение пластических свойств представляется затруднительным, однако, возможно определить усилие начала текучести и усилие разрыва образца.

Внешний вид образца в испытательной машине и типичная форма получаемой диаграммы растяжения на примере образца, полученного сваркой на режиме 3 (см. табл. 2), представлено на рис. 2.

Результаты механических испытаний (рис. 3) показали, что наилучшими свойствами обладают соединения, полученные при сварке на режиме № 3. Также следует отметить, что, если ширина шва в зоне соприкосновения образцов выше толщины основного металла, разрушение происходит в зоне термического влияния, т.е. именно её свойства определяют прочность рассматриваемого типа сварных соединений.

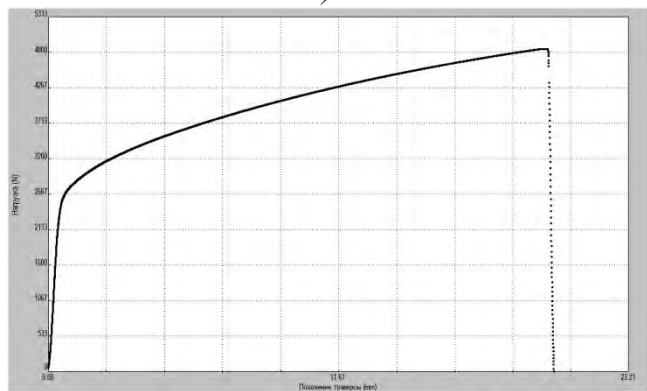
Для исследования влияния зазора на механические свойства использовались образцы, швы в которых получены при параметрах сварки по режиму 3 (см. табл. 2). Верхняя и нижняя пластины механически прижимались друг к другу. В зоне крепления между ними создавался зазор путем установки подкладок различных заданных толщин.

Предварительные швы выполнялись с варьированием зазора от 0 до 100 мкм с шагом

20 мкм и от 100 до 130 мкм с шагом 10 мкм. На первом этапе было установлено, что при зазорах до 100 мкм стабильно удается получить сплошное сварное соединение. В то же время при повышении зазора до 110 мкм нарушается непрерывность шва в области между образцами, что в большинстве случаев недопустимо. При значениях зазора 120 мкм и выше сварное соединение не формируется, при этом на нижней пластине следов оплавления выявлено не было.



а)



б)

Рис. 2. Механические испытания нахлесточных сварных соединений на срез:

а – закрепление образцов в испытательной машине;
б – типичный вид диаграммы растяжения испытываемых образцов

В связи с этим, для дальнейших исследований швы выполнялись с зазорами от 0 до 100 мкм с шагом 20 мкм.

После сварки были подготовлены поперечные шлифы швов, снимки которых представлены на рис. 4. На их основе проведено определение геометрических параметров швов, результаты которого показаны на рис. 5.

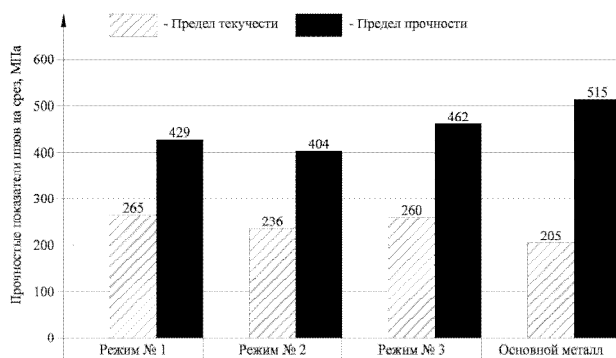


Рис. 3. Результаты испытаний механических свойств образцов, полученных с использованием, представленных в табл. 3, режимов сварки

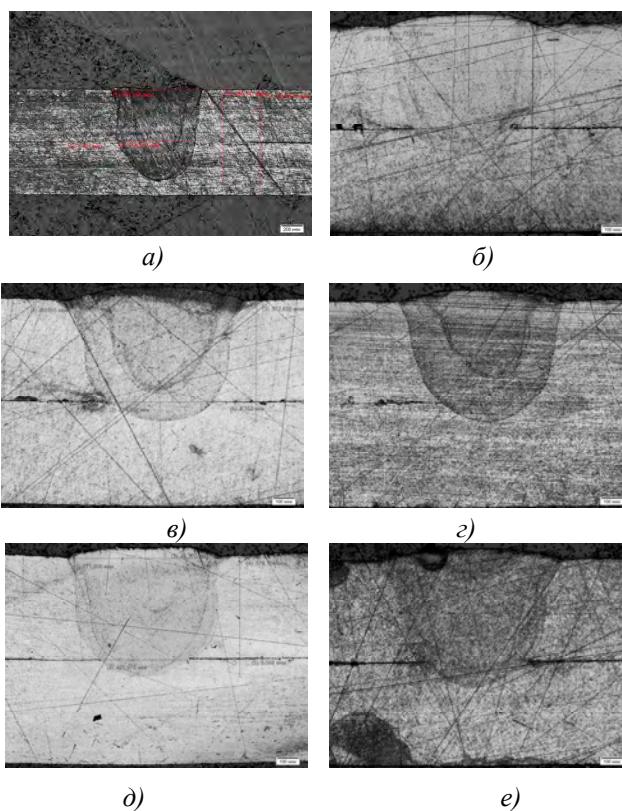


Рис. 4. Поперечные сечения сварных швов (а, ×50); (б – е, ×100) полученных с различными зазорами: а – 0 мкм; б – 20 мкм; в – 40 мкм; г – 60 мкм; д – 80 мкм; е – 100 мкм

Из изображений шлифов и рис. 5 видно, что размеры швов с увеличением зазора плавно уменьшаются. В частности, особенно заметно уменьшение ширины шва в области между пластинами, которая, как указано ранее, определяет его прочностные свойства.

Однако, несмотря на существенные значения зазоров, вблизи шва они не заметны на макрошлифах и обнаруживаются по краям исследованных образцов. Этот факт, а также то,

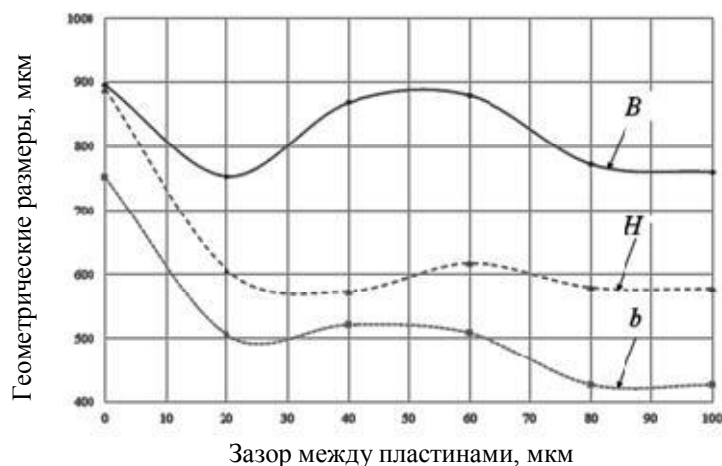


Рис. 5. Зависимость размеров сварного соединения от величины зазора между пластинами:
B – ширина шва на верхней поверхности; *b* – ширина шва в области между образцами; *H* – глубина проплавления

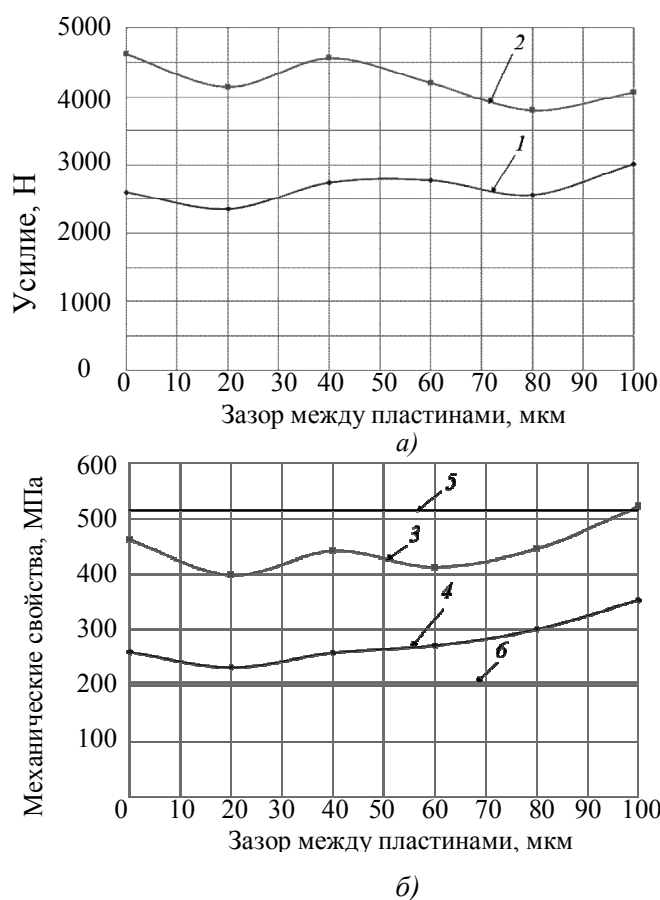


Рис. 6. Зависимость прочностных свойств сварных соединений от зазора между пластинами:
 а – разрушающая сила при испытании на срез: 1 – разрывное усилие; 2 – усилие начала текучести; б – максимальные касательные напряжения: 3 – предел прочности; 4 – предел текучести; 5 – предел прочности основного металла; 6 – предел текучести основного металла

что возможность получения соединения резко пропадает при переходе от значения зазора 100 мкм к 120 мкм, говорит о том, что сварка возможна в случае, если зазор может быть перекрыт деформацией верхней пластины. Поскольку закрепление образцов под сварку было жестким, следует иметь в виду, что закрытость зазора лимитируется тепловой де-

планацией верхнего образца. При этом форма шва показывает, что затекание металла в область между образцами играет второстепенную роль в закрытии зазора.

Для оценки влияния зазора на прочность швов были проведены механические испытания, результаты которых представлены на рис. 6.

Из анализа графиков видно, что разрывная сила с ростом зазора падает, в то время как прочностные свойства швов растут. Особенно заметен рост предела текучести, при этом предел прочности возрастает немонотонно и незначительно. Этот факт можно объяснить, учитывая напряженно-деформированное состояние металла шва, возникшее в результате тепловой деформации верхнего образца при закрытии зазора. Деформирование, как правило, вызывает снижение пластических свойств металла, что сказывается на росте предела текучести, т.е. возникает наклеп [9]. Для определения природы повышения прочностных свойств металла шва с ростом зазора необходимо исследование изменения его структуры, а также определение распределения остаточных напряжений.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- прочностные свойства сварных соединений исследуемого типа определяются свойствами зоны термического влияния при обеспечении толщины шва в зоне между образцами большей, чем толщина образцов;
- при импульсной лазерной сварке внахлест увеличение зазора вызывает некоторое снижение размеров сварного соединения в опасном сечении;
- пороговое значение зазора прежде всего определяется возможностью теплового деформирования верхнего образца и в меньшей степени связано с затеканием металла в зазор между заготовками;
- с ростом зазора разрывное усилие уменьшается, в то время как прочность металла шва несколько возрастает, что, возможно, связано с распределением остаточных напряжений в зоне сварного соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Каховский Н.И.** Сварка высоколегированных сталей. Киев: «Техніка», 1975. 376 с.
2. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.** Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 664 с.: ил.
3. **Богданов А.В.** Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров // *Технология машиностроения*. 2011. № 11. С. 34–36.
4. **Lapsanska N., Chmelickova N., Hrabovsky M.** Effect of Beam Energy on Weld Geometric Characteristics in Nd:YAG Laser Overlapping Spot Welding of Thin AISI 304 Stainless Steel Sheets // *Metallurgical and Materials Translations B*, vol. 41B, October, 2010, pp. 110–1115.

5. **Dworak J.** The effect of laser beam pulse shape on the process of pulsed YAG laser welding // *Welding International*, vol. 28, no. 7, pp. 501–509

6. **Sebestova N., Havelkova M., Chmelickova N.** Energy Losses Estimation During Pulsed-Laser Seam Weldin. // *Metallurgical and Materials Translations B*, vol. 45B, June, 2014, pp. 1116–1121.

7. **Tadamallea A.P., Reddy Y.P., RamjeeE., Vijayakumar Reddyb.** Evaluation of Nd: YAG Laser Welding Efficiencies for 304L Stainless Steel // *Procedia Materials Science*, vol. 6, 2014, pp. 1731–1739.

8. **Meco S., Pardal G., Ganguly S., Miranda R.M., Quintino L., Williams S.** Overlap conduction laser welding of aluminium to steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, 2013, pp. 64–654.

9. **Материаловедение: учебник для вузов / Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др.** 8-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 646 с.

REFERENCES

1. **Kakhovsky, N.I.,** *High-alloy Steel Welding*. Kiev, “Technics”, 1975. pp. 376.

2. **Grigoriants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I.** *Technological Processes of Laser Working: Text-book for colleges / under the Editorship of A.G. Grigoriants*. 2-nd Edition, stereotyped. M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2008. pp. 664.: il.

3. **Bogdanov, A.V.,** Peculiarities in technological potentiality estimation of industrial laser // *Engineering Techniques*. 2011. № 11. pp. 34–36.

4. **Lapsanska N., Chmelickova N., Hrabovsky M.** Effect of Beam Energy on Weld Geometric Characteristics in Nd:YAG Laser Overlapping Spot Welding of Thin AISI 304 Stainless Steel Sheets // *Metallurgical and Materials Translations B*, vol. 41B, October, 2010, pp. 110–1115.

5. **Dworak J.** The effect of laser beam pulse shape on the process of pulsed YAG laser welding // *Welding International*, vol. 28, no. 7, pp. 501–509.

6. **Sebestova N., Havelkova M., Chmelickova N.** Energy Losses Estimation During Pulsed-Laser Seam Weldin. // *Metallurgical and Materials Translations B*, vol. 45B, June, 2014, pp. 1116–1121.

7. **Tadamallea A.P., Reddy Y.P., RamjeeE., Vijayakumar Reddyb.** Evaluation of Nd: YAG Laser Welding Efficiencies for 304L Stainless Steel // *Procedia Materials Science*, vol. 6, 2014, pp. 1731–1739.

8. **Meco S., Pardal G., Ganguly S., Miranda R.M., Quintino L., Williams S.** Overlap conduction laser welding of aluminium to steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, 2013, pp. 64–654.

9. **Materials Science: Text-book for Colleges / Arзамасов B.N., Макарова V.I., Mukhin G.G. et al.** 8-th Edition. M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2008. pp 646.

Рецензент д.т.н. А.Г. Григорьянц