

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №2 (176). С. 13-23.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №2 (176). P. 13-23.

Научная статья  
УДК 621.791.72:621.375.826  
doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-13-23

### Особенности лазерной сварки стыковых соединений листов алюминиевых сплавов системы Al – Mg

Виктор Васильевич Овчинников<sup>1</sup>, д.т.н.

Павел Андреевич Панас<sup>2</sup>, инженер

<sup>1, 2</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>1</sup> vikov1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2948-2202>

<sup>2</sup> Panaspaul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Рассмотрена проблема влияния параметров режима лазерной сварки на пористость швов сплавов 1530 и 1550. Установлены зависимости общей площади дефектов и количества дефектов в сварном соединении от скорости сварки. При лазерной сварке исследуемых алюминиевых сплавов в виде листов толщиной 5 мм минимальная пористость сварных швов наблюдается при скорости сварки в диапазоне 50...70 мм/с. По полученным данным были построены гистограммы распределения пор по размерам. Для оценки распределения диаметр пор брался с шагом 0,1 мм. Представленные гистограммы распределения не дают четкой информации о виде распределения описанных величин. Установлены режимы просвечивания сварных соединений алюминиевых сплавов системы Al – Mg, выполненных лазерной сваркой, для наилучшей идентификации дефектов. Микроструктура сварных соединений представлена мелкодисперсной дендритной структурой. При этом её можно разделить на несколько зон: центральная зона – характеризуется наличием мелкодисперсных разориентированных кристаллитов, и зона перехода к основному металлу, ограничивающая центральную зону с двух сторон. Формирование структуры переходной зоны связано с высоким градиентом температур в процессе сварки. Структура этой зоны отлична от структуры центральной зоны сварного соединения, и характеризуется наличием вытянутых дендритов первого порядка, с направлением роста от линии сплавления к центру сварного шва. Отсутствие дендритов второго порядка объясняется высокой скоростью охлаждения, достаточно высокой, чтобы дендриты второго порядка не успели сформироваться. Зона термического влияния (ЗТВ) при лазерной сварке не велика и зависит от объема зоны расплавления. Замеры ЗТВ показали, что для сварных соединений системы Al – Mg, выполненных лазерной сваркой, размер ЗТВ лежит в диапазоне 20...30 мкм. Твёрдость сварного шва выше, чем твёрдость основного металла, что можно объяснить образованием в сварном шве мелкодисперсной дендритной структуры. При этом от центра шва к основному металлу твёрдость снижается, вследствие вытягивания дендритов по направлению наибольшего теплоотвода. С повышением скорости сварки для обоих исследуемых сплавов 1550 и 1530 наблюдается повышение значений микротвёрдости металла шва. При лазерной сварке исследуемых сплавов обеспечивается прочность сварного соединения на уровне 0,82...0,87 от прочности основного металла. Разрушение образцов при испытаниях на статическое растяжение происходило по зоне сплавления для обоих исследуемых сплавов.

**Ключевые слова:** сплавы системы Al – Mg, лазерная сварка, мощность излучения, скорость сварки, пористость, диаметр пор, твердость, механические свойства

**Благодарности:** экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Научноёмкие технологии в машиностроении» Московского политехнического университета.

**Для цитирования:** Овчинников В.В., Панас П.А. Особенности лазерной сварки стыковых соединений листов алюминиевых сплавов системы Al – Mg // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 2 (176). С. 13–23. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-13-23

## Laser welding special features for butt-welded joints of aluminum alloy sheets in Al–Mg system

Viktor V. Ovchinnikov<sup>1</sup>, D. Eng.

Pavel A. Panas<sup>2</sup>, Engineer

<sup>1,2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> vikov1956@mail.ru

<sup>2</sup> Panaspaul@gmail.com

**Abstract.** The influence of laser welding parameters on the porosity of welds in 1530 and 1550 alloys is considered. The dependences of the total defect area and the number of defects in a welded joint on the welding speed are established. During laser welding of the studied aluminum alloys in the form of 5 mm thick sheets, the minimum porosity of welds is observed at a welding speed in the range of 50...70 mm/s. Based on the obtained data, histograms of pore size distribution were constructed. To evaluate the distribution, the pore diameter was taken with a step of 0.1 mm. The presented distribution histograms do not provide clear information on the type of distribution of the described quantities. X-ray inspection modes of welded joints of aluminum alloys of the Al – Mg system, produced by laser welding, are established for the best identification of defects. The microstructure of the welded joints is represented by a finely dispersed dendritic structure. It can be divided into several zones: the central zone, characterized by the presence of finely dispersed, misoriented crystallites, and the transition zone to the base metal, which borders the central zone on both sides. The formation of the transition zone structure is associated with a high temperature gradient during welding. The structure of this zone differs from that of the central zone of the welded joint and is characterized by the presence of elongated first-order dendrites, with the growth direction from the fusion line to the center of the weld. The absence of second-order dendrites is explained by the high cooling rate, high enough to prevent second-order dendrites from forming. The heat-affected zone (HAZ) in laser welding is small and depends on the volume of the fusion zone. HAZ measurements have shown that for laser-welded Al-Mg joints, the HAZ size lies in the range of 20...30  $\mu\text{m}$ . The weld hardness is higher than that of the base metal, which can be explained by the formation of a finely dispersed dendritic structure in the weld. However, the hardness decreases from the weld center to the base metal due to the elongation of the dendrites in the direction of greatest heat dissipation. With increasing welding speed, an increase in the weld metal microhardness is observed for both 1550 and 1530 alloys. Laser welding of the alloys under study provides a weld joint strength of 0,82...0,87 times the base metal strength. Specimens failed in static tensile testing in the fusion zone for both alloys under study.

**Keywords:** alloys of the Al – Mg system, laser welding, radiation power, welding speed, porosity, pore diameter, hardness, mechanical properties

**Acknowledgments:** The experimental studies were conducted using the equipment of the shared use center “science intensive technologies in mechanical engineering” of the Moscow Polytechnic University.

**For citation:** Ovchinnikov V.V., Panas P.A. Laser welding special features for butt-welded joints of aluminum alloy sheets in Al – Mg system / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 2 (176). P. 13–23. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-13-23

### Введение

В последние годы лазерные технологии совершили настоящий прорыв в промышленности, и особенно заметно их влияние в сфере соединения материалов. Разнообразные методы лазерной сварки стали незаменимым инструментом для работы с деталями самых разных толщин. [1, 2]: лазерная сварка в среде защитного газа (базовая технология); лазерная сварка с колебаниями лазерного луча; лазерная сварка с холодной (горячей) подачей присадочной проволоки; гибридная и комбинированная лазерно-дуговая сварка; лазерная сварка в вакууме (общем или местном) и др.

Лазерный луч можно сфокусировать в невероятно маленькое пятно, размером всего от 30 до 500 мкм. В этом пятне

концентрируется огромная энергия, плотность которой достигает от 1 млн до 1 млрд Ватт на квадратный сантиметр.

Благодаря такой высокой концентрации энергии, лазерная сварка становится невероятно гибкой. Можно точно контролировать, сколько металла расплавится, и создавать сварные швы самых разных форм. Этот широкий диапазон энергетических параметров позволяет гибко регулировать объем ванны расплава и получать сварные швы с различной геометрией: от узкого и глубокого «кинжального» проплава до широкого с небольшой глубиной проникновения. При этом скорость сварки может варьироваться от 0,3 до 30 м/мин [3].

Лазерная сварка отличается высокой скоростью физических процессов, поэтому она в основном реализуется с помощью

автоматизированных систем перемещения оптической головки с ЧПУ: порталных или консольных станков или роботизированных комплексов [4]. Такое оборудование позволяет серийно, по заданной программе выполнять сварку как небольших, так и крупногабаритных изделий с протяженными швами. Оно обеспечивает точное наведение сфокусированного лазерного луча на стык и его движение на заданной скорости вдоль свариваемых кромок.

Целью данного исследования было выявление взаимосвязи между параметрами

режима лазерной сварки пластин алюминиевых сплавов системы Al – Mg и качеством сварных стыковых соединений.

### **Материалы и методы исследований**

Объектом исследований служили пластины из алюминиевых сплавов системы Al – Mg (1530 и 1550) толщиной 5 мм. Химический состав и механические свойства пластин, исследуемых термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, представлены в табл. 1 и 2.

## **1. Химический состав алюминиевых сплавов 1530 и 1550**

### **1. Chemical composition of aluminum alloys 1530 and 1550**

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, % масс.								
	Al	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Cu	Ti	Cr
1530	Основа	3,2...3,8	0,5...0,8	0,3...0,6	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,05
1550	Основа	4,8...5,8	≤ 0,5	0,3...0,8	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,1	0,02...0,1	–

## **2. Механические свойства листов сплавов 1530 и 1550**

### **2. Mechanical properties of alloy sheets 1530 and 1550**

Марка сплава	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
1530	190	80	12
1550	300	150	20

Образцы сваривались на автоматическом технологическом лазерном комплексе «СВАРОГ-2», мощностью 6 кВт. В качестве источника излучения использовался непрерывный иттербиевый волоконный лазер киловаттного диапазона IPG v4e1. Фокусное расстояние 250 мм. Длина волны лазерного излучения 1,06...1,3 мкм. Сварка проводилась в среде

защитного газа Ar с чистотой 99,999 % и расходом 24 л/мин при поперечных колебаниях фокального пятна лазера.

Перед сваркой, с целью удаления оксидной пленки, образцы подвергались химическому травлению в водно-щелочном растворе.

Режимы лазерной сварки исследуемых образцов приведены в табл. 3.

## **3. Параметры режима лазерной сварки образцов исследуемых сплавов**

### **3. Parameters of the laser welding mode of the tested alloy samples**

Номер режима сварки	Марка сплава	Мощность лазера, кВт	Расстояние от линзы до поверхности детали, мм	Скорость сварки, мм/с	Расход защитного газа, л/мин
1	1530	4	202	40	24
2	1550			100	
3	1550			60	
4	1530			60	

Первичное исследование образцов сварных соединений проводилось методами рентгенографического контроля и рентгеновской компьютерной томографии (РКТ).

Метод РКТ реализовался при помощи промышленной установки для рентгенографии и компьютерной томографии (КТ) – XTN 450 LC. Для последующей обработки данных,

полученных при РКТ, использовалось программное обеспечение (ПО) VGStudio Max.

Рентгенографический метод контроля проводился с использованием стационарного рентгеновского аппарата Экстравольт-160. В качестве записывающего устройства использовался плоскопанельный детектор, с последующим выводом изображения на экран компьютера, при помощи ПО «СОВА».

При рентгенографическом методе контроля непосредственно на образцы устанавливались проволоочные эталоны чувствительности № 21 и направлением проволок перпендикулярно оси сварного соединения, с установкой на лицевой стороне шва, обращённой к источнику излучения. Чувствительность оценивалась по 1-й проволоке для всех образцов. Оценка качества сварных швов проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 13919-2017 для уровня качества В (высокий). Химический анализ образцов проводился на оптико-эмиссионном спектрометре FOUNDRY-MASTER UVR. Вырезка образцов для исследований проводилась с использованием отрезного станка TR 100 Evolution мощностью 3 кВт и скоростью вращения 2800 об/мин.

Подготовка образцов для металлографических исследований осуществлялось в соответствии с ГОСТ Р 57180-2016. Шлифование и полирование образцов проводилось на шлифовальной машине ДАТ 25 С3, со скоростью вращения круга – 600 об/мин и водоохлаждением. Для травления микрошлифов использовался реактив Келлера (2 мл плавиковой кислоты HF (48 %), 3 мл соляной кислоты HCL, 5 мл воды).

Для изучения макроструктуры сварных соединений при небольших увеличениях использовался инверсионный микроскоп Zeiss AxioVert A1. Исследование микроструктуры проводилось на микроскопе Zeiss Axio Zoom.V16, в различных зонах сварного соединения и основного металла. Твёрдость образцов измерялась на цифровом микротвердомере DM8, с шагом 1,00 мм, обеспечивая по пять измерений в каждой зоне сварного соединения.

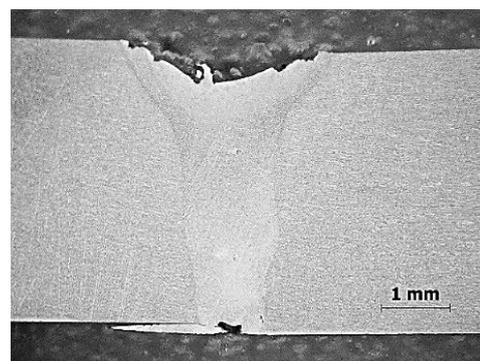
## Результаты экспериментов и их обсуждение

При выборе мощности лазерного излучения необходимо учитывать их высокую отражательную способность поверхности по отношению к лазерному излучению. В силу указанного обстоятельства для лазерной сварки алюминиевых сплавов необходимо применять

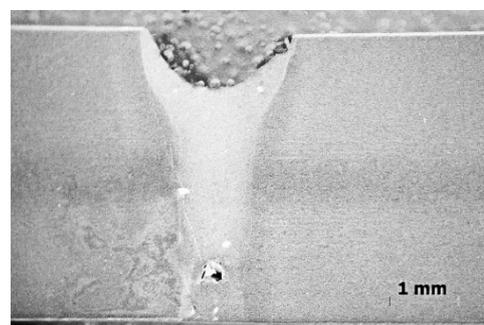
излучение мощностью более 2 кВт, при которой наблюдается переход от поверхностного к объёмному тепловложению [5].

Внешний осмотр лицевой поверхности соединений не выявил дефектов типа трещин, выходящих на лицевую поверхность шва, в тоже время, присутствуют такие дефекты, как «превышение выпуклости» (режим 2) и «занижение шва» с лицевой поверхности (режим 3). Образование указанных выше дефектов в сварных соединениях сплава 1550, предположительно связано с недостаточно корректным выбором параметров режима сварки (слишком высокая скорость сварки, в случае режима 2 и недостаточная при сварке на режиме 3). На всех образцах наблюдается чешуйчатость, которая связана с нестационарными процессами в сварочной ванне и прерывистостью процесса её кристаллизации [6].

Анализ макроструктуры сварных соединений (рис. 1) показал наличие непроваров в корневой части шва, а также пор. Зона сплавления характеризуется малой шириной и колеблется в диапазоне 1 мм.



а)



б)

Рис. 1. Макроструктура сварных соединений алюминиевого сплава 1530, выполненных лазерной сваркой на режимах 1 (а) и 4 (б)

Fig. 1. Weld macrostructure for aluminum alloy 1530 made by laser welding in modes 1 (a) and 4 (b)

Химический состав металла шва образцов сварных соединений проводился после сварки. Результаты химического анализа показали отсутствие отклонений по химическому

составу металла шва от основного металла для исследуемых сплавов, в соответствии с ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые» (табл. 4).

#### 4. Результаты анализа химического состава металла шва исследуемых сплавов

#### 4. The results of the analysis of the chemical composition of the weld metal of the tested alloys

Номер режима	Сплав	Содержание элементов, % масс.					
		Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Al
1	1530	0,62	3,3	0,5	0,06	0,3	Остальное
2	1550	0,15	5,3	0,6	0,02	0,2	
3	1550	0,16	5,5	0,6	0,03	0,3	
4	1530	0,61	3,6	0,5	0,05	0,3	

Томограммы образцов сварных соединений алюминиевых сплавов 1530 и 1550, выполненных лазерной сваркой, в 3-х проекциях, а также с 3D-моделью образцов показали наличие в металле шва развитой пористости (рис. 2).

Анализ томограмм показал наличие множества пор по всей длине сварного шва. С целью идентификации дефекта типа «цепочка пор», были произведены расчёты диаметров пор и расстояния между ними. «Цепочкой пор»

является ряд газовых полостей, удовлетворяющих условию

$$l < 3d, \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние между соседними порами;  $d$  – диаметр наибольшей из пор.

Для оценки параметров дефектов выбиралось сечение образца, параллельное лицевой поверхности шва и наибольшим содержанием дефектов.

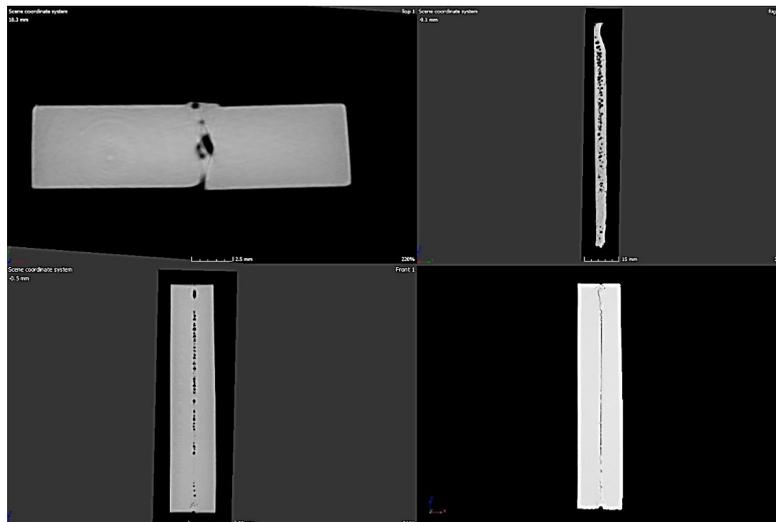


Рис. 2. Общий вид томограмм исследуемых образцов сплава 1550, сваренных на режиме 2

Fig. 2. General view of the tomograms of the tested alloy 1550 samples welded on mode 2

Дальнейшая оценка пористости производилась отдельно по одиночным порам, и по цепочкам пор. Впоследствии рассчитывалась общая площадь  $f$  дефектов, путём

суммирования общей площади одиночных пор и площади цепочек приходящихся на 100 мм длины шва. Результаты анализа пористости в сварных швах представлены в табл. 5.

5. Параметры дефектов в исследуемых образцах, выявленных методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ)

5. Parameters of defects in the studied samples detected by X-ray computed tomography (X-ray CT)

Номер режима	Сплав	Тип дефекта	$n$ , шт	$d_{\min}$ ( $l \cdot h$ ), мм	$d_{\max}$ ( $l \cdot h$ ), мм	$f_{\min}$ , мм <sup>2</sup>	$f_{\max}$ , мм <sup>2</sup>	$f_{\text{общ}}$ , мм <sup>2</sup>	$f$ , мм <sup>2</sup>
1	1530	Пора	16	0,60	1,80	0,28	2,54	15,67	40,55
		Цепочка пор	7	0,90·1,20	9,30·2,00	1,80	11,16	24,88	
2	1550	Пора	18	0,30	1,40	0,07	1,54	9,25	37,43
		Цепочка пор	11	1,70·0,60	5,10·1,60	1,02	4,73	28,18	
3	1550	Пора	13	0,40	1,80	0,13	2,54	8,87	31,09
		Цепочка пор	11	1,40·0,60	4,20·1,30	0,84	4,20	22,22	
4	1530	Пора	17	0,50	1,60	0,20	2,01	14,88	29,97
		Цепочка пор	7	1,00·0,50	4,10·1,30	0,65	3,69	15,09	

Общая площадь дефектов сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных лазерной сваркой, должна быть  $< 2\%$  от  $S$ , где  $S$  – площадь сварного шва, рассчитываемая по уравнению (2):

$$S = L \cdot t, \quad (2)$$

где  $L$  – длина шва (100 мм);  $t$  – толщина свариваемых деталей (5,0 мм).

Исходя из вышесказанного, общая площадь дефектов в сварном шве алюминиевых сплавов, выполненных лазерной сваркой и оцениваемых по уровню качества – В, по ГОСТ 13919-2-2017, должна быть  $< 2\%$ , т.е. 10 мм<sup>2</sup>.

Как видно из табл. 5, общая площадь дефектов в образцах в 3 – 4 раза превышает допустимые значения.

Наличие такого количества пор связано с высокими скоростями сварки. С учётом больших размеров выявленных пор, их можно отнести к так называемым технологическим порам, образующимся при высоких скоростях сварки, вследствие нестабильности процесса расплавления и затвердевания расплава, а также наличия на свариваемых кромках загрязнений и влаги [7].

Зависимости общей площади дефектов от скорости сварки приведена на рис. 3.

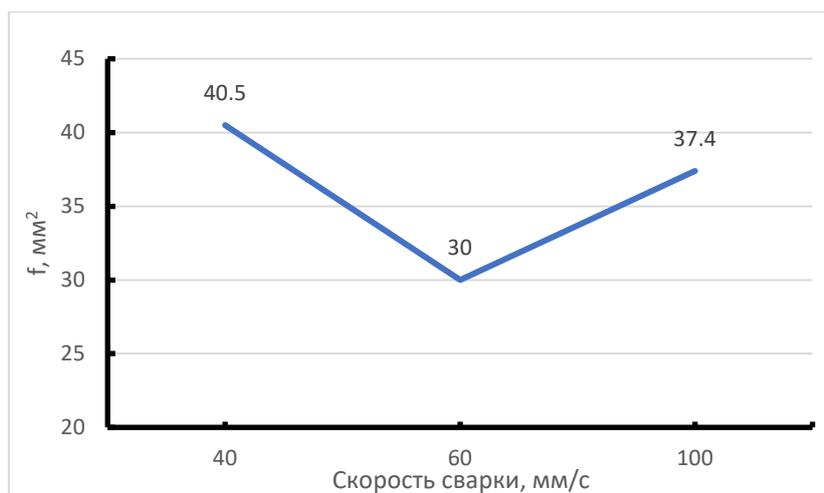


Рис. 3. Зависимость суммарной площади пор на 100 мм шва при сварке сплава 1550 в зависимости от скорости сварки

Fig. 3. Dependence of the total pore area per 100 mm of the weld under welding of alloy 1550 depending on the welding speed

Из представленной зависимости следует, что общая площадь дефектов увеличивается как при низких скоростях сварки, так и при слишком высоких, поэтому оптимальная скорость сварки для данных сплавов, предположительно, будет лежать в диапазоне от 50 до 70 мм/с.

При условии, что цепочка пор в процессе разрушения сварного соединения работает как один дефект, выведена зависимость количества дефектов от скорости сварки (рис. 4).

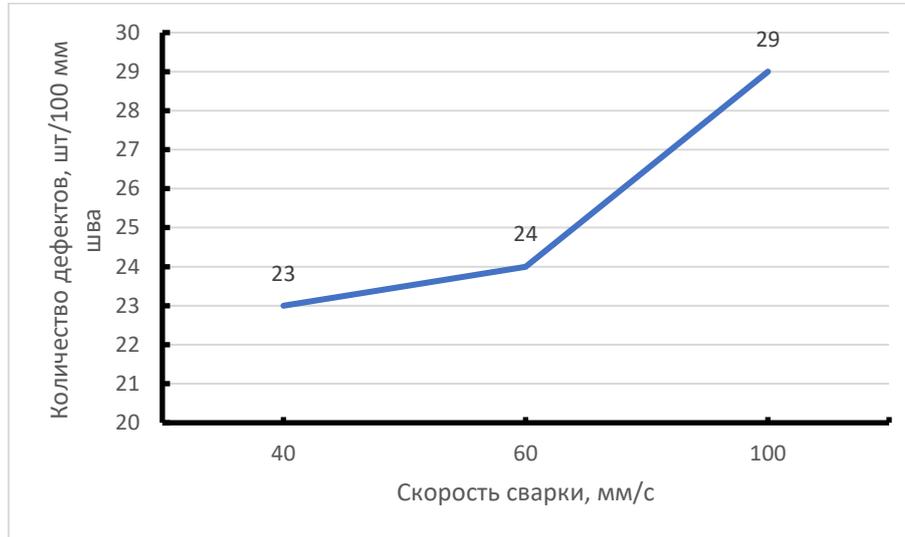


Рис. 4. Зависимость количества дефектов в шве сплава 1550 от скорости сварки

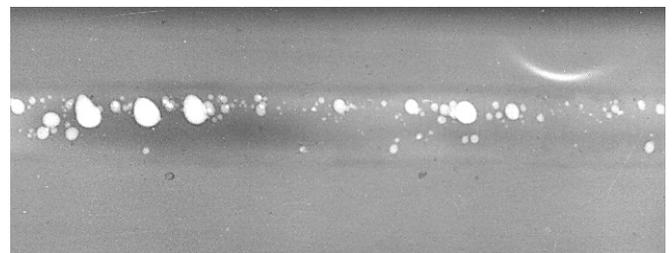
Fig. 4. Dependence of the number of defects in the weld of alloy 1550 on the welding speed

С увеличением скорости сварки количество дефектов в образце увеличивается, что связано с ухудшением условий дегазации расплава в сварочной ванне.

Первичной целью проведения рентгенографического контроля был подбор режимов просвечивания для сварных соединений алюминиевых сплавов системы Al – Mg, выполненных лазерной сваркой. Просвечивание осуществлялось при силе тока – 1 мА, при этом напряжение варьировалось от 50 до 100 кВ. В результате экспериментов, был установлен следующие параметры режима просвечивания для сварных соединений сплавов 1530 и 1550, толщиной 5,0 мм: напряжение 80 кВ, сила тока 1 мА.

Рентгенограммы образцов сварных соединений алюминиевых сплавов 1530 и 1550 представлены на рис. 5.

На полученных рентгенограммах были проведены замеры диаметра всех выявленных пор. Результаты измерений представлены в табл. 6.



а)



б)

Рис. 5. Рентгенограммы сварных соединений исследуемых сплавов:  
а – режим 1; б – режим 3

Fig. 5. X-ray images of welds in the tested alloys:  
а – mode 1; б – mode 3

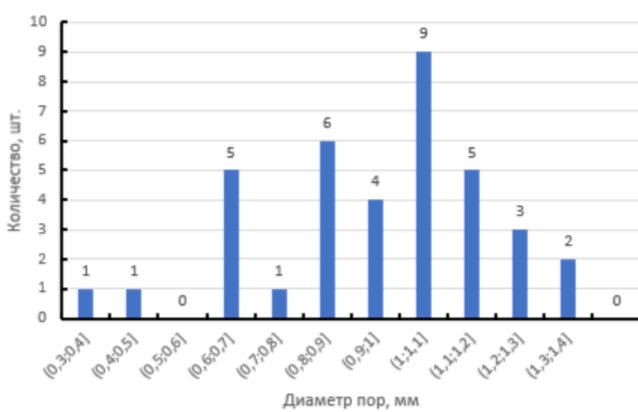
6. Результаты измерения диаметров выявленных пор на рентгенограммах образцов сварных швов исследуемых алюминиевых сплавов

6. The results of measuring the diameters of the identified pores on the X-ray images of the weld samples in the tested aluminum alloys

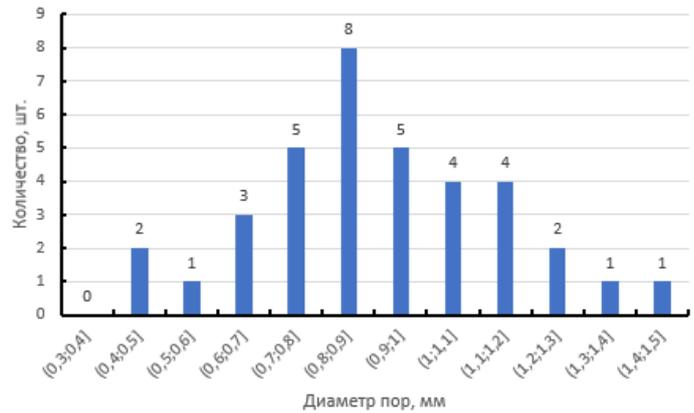
Номер режима	Сплав	Количество выявленных дефектов, шт.	Минимальный диаметр, мм	Максимальный диаметр, мм	Средний диаметр, мм
1	1530	36	0,39	1,40	0,97
2	1550	42	0,41	1,51	0,92
3	1550	38	0,36	1,55	0,80
4	1530	37	0,39	1,97	1,00

По полученным данным были построены гистограммы распределения пор по размерам. Для оценки распределения диаметр пор берся с шагом 0,1 мм. (рис. 6).

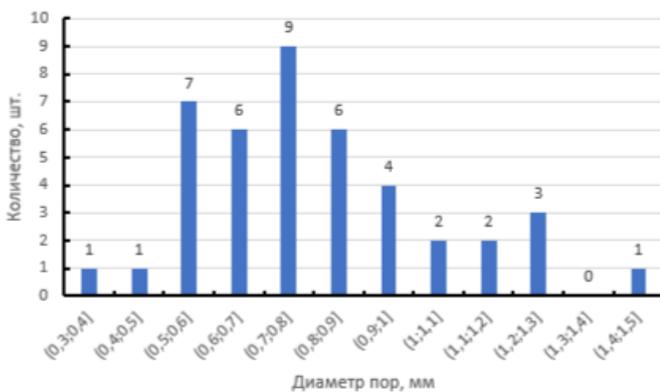
Представленные гистограммы распределения не дают чёткой информации о виде распределения описанных величин.



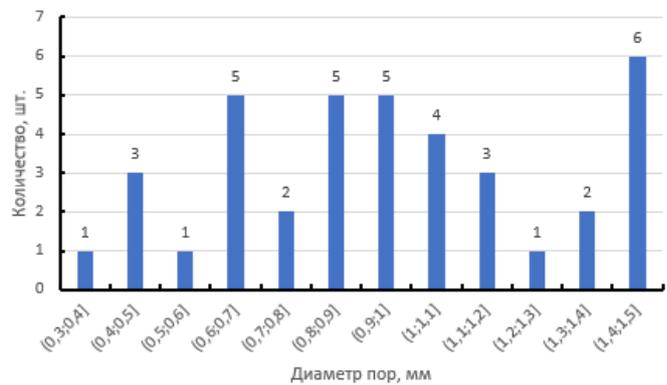
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Распределение выявленных пор по диаметрам: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4

Fig. 6. The distribution of the identified pores by diameter: а – mode 1; б – mode 2; в – mode 3; г – mode 4

Микроструктура сварных соединений представлена мелкодисперсной дендритной структурой (рис. 7, а). При этом её можно разделить на несколько зон: центральная зона – характеризуется наличием мелкодисперсных разориентированных кристаллитов, и зона перехода к основному металлу, ограничивающая центральную зону с двух сторон. Формирование структуры переходной зоны (рис. 7, б) связано с высоким градиентом температур в процессе сварки [4]. Структура этой зоны отлична от структуры центральной зоны сварного соединения, и характеризуется наличием вытянутых дендритов первого порядка, с направлением роста от линии сплавления к центру сварного шва. Отсутствие дендритов второго порядка объясняется высокой скоростью охлаждения, достаточно высокой, чтобы дендриты второго порядка не успели сформироваться [8].

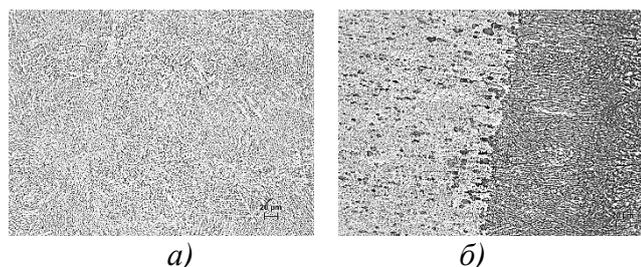


Рис. 7. Дендритная структура в центральной зоне шва (режим 2) (а) и структура переходной зоны сварного соединения (б) сплава 1550

Fig. 7. Dendritic structure in the central weld area (mode 2) (a) and the structure of the transition zone of the weld (b) for alloy 1550

Зона термического влияния (ЗТВ) при лазерной сварке не велика и зависит от объема зоны расплавления, который у алюминия

больше, чем у сталей, вследствие необходимой для сварки гораздо более высокой плотности мощности ( $5 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) [9]. Замеры ЗТВ показали, что для сварных соединений системы Al – Mg, выполненных лазерной сваркой, размер ЗТВ лежит в диапазоне 20...30 мкм.

Сплавы системы Al – Mg, к которой относятся сплавы 1530 и 1550, характеризуются повышенной склонностью к образованию пор в металле шва, так как магний повышает растворимость водорода в алюминии [10 – 12].

Водородные поры имеют меньший размер, по сравнению с технологическими и образуются в результате растворения водорода в алюминии при температуре плавления последнего. Для защиты от такого вида дефектов, сварка проводилась в среде инертного газа Ar. Несмотря на это, в микроструктуре некоторых образцов были выявлены водородные поры (рис. 8), с размером  $\approx 40...50$  мкм.

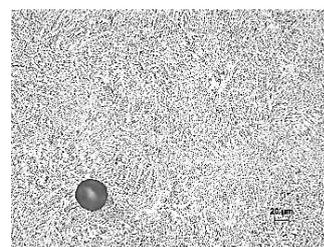


Рис. 8. Водородная пора в сварном соединении сплава 1550 (режим 3)

Fig. 8. Hydrogen pore in the weld of alloy 1550 (mode 3)

Данные измерений микротвердости в различных структурных зонах сварного соединения представлены в табл. 7.

## 7. Результаты измерения микротвёрдости сварных соединений сплава 1530 и 1550

### 7. The results of measuring the microhardness of welds for alloy 1530 and 1550

Номер режима	Марка сплава	Микротвёрдость HV <sub>50</sub>		
		Шов	Зона сплавления	Основной металл
1	1530	<u>74,5...91,4</u> 82,95	<u>74,1...84,8</u> 79,4	<u>56,4...65,2</u> 60,6
2	1550	<u>123,1...128,3</u> 125,6	<u>93,5...101,1</u> 97,05	<u>88,3...91,2</u> 89,75
3	1550	<u>95,6...121,8</u> 108,7	<u>91,2...105,9</u> 98,55	<u>88,3...95,7</u> 92,1
4	1530	<u>82,4...110,9</u> 96,65	<u>75,4...98,7</u> 86,85	<u>64,5...75,8</u> 70,15

Измерения показали, что твёрдость сварного шва выше, чем твёрдость основного металла, что можно объяснить образованием в сварном шве мелкодисперсной дендритной структуры. При этом от центра шва к основному металлу твёрдость снижается, вследствие вытягивания дендритов по направлению наибольшего теплоотвода.

Также можно отметить, что с повышением скорости сварки для обоих исследуемых

сплавов 1550 и 1530 наблюдается повышение значений микротвёрдости металла шва.

Для определения механических свойств сварных соединений исследуемых сплавов были сварены лазерной сваркой образцы с присадочной проволокой на скорости сварки 60 мм/с. Для образцов из сплава 1530 применялась скальпированная проволока СвАМг3 диаметром 1,2 мм, а для сплава 1550 – проволока марки СвАМг61. Результаты механических испытаний приведены в табл. 8.

## 8. Механические свойства сварных соединений листов сплавов 1530 и 1550, выполненных лазерной сваркой

### 8. Mechanical properties of welds for alloy sheets 1530 and 1550 made by laser welding

Состояние образца	Сплав 1530			Сплав 1550		
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$K$	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$K$
Основной металл	190	12	1	300	18	1
Сварное соединение	165	3,5	0,87	246	6,4	0,82

Анализ данных, приведенных в табл. 8 показывает, что при лазерной сварке исследуемых сплавов обеспечивается прочность сварного соединения на уровне 0,82...0,87 от прочности основного металла. Разрушение образцов при испытаниях на статическое растяжение происходило по зоне сплавления для обоих исследуемых сплавов.

### Выводы

1. Установлено, что при лазерной сварке алюминиевых сплавов 1530 и 1550 в виде листов толщиной 5 мм минимальная пористость сварных швов наблюдается при скорости сварки в диапазоне 50...70 мм/с.

2. Идентифицированы режимы рентгеновского просвечивания сварных соединений алюминиевых сплавов 1530 и 1550 системы Al – Mg, выполненных лазерной сваркой, для наилучшей выявляемости дефектов.

3. Показано, что микроструктура металла шва исследуемых сплавов характеризуется наличием дендритов первого и второго порядков. Формирование микроструктуры зоны сплавления связано с высоким градиентом температур в процессе сварки. Структура этой зоны отлична от структуры центральной зоны сварного соединения, и характеризуется

наличием вытянутых дендритов первого порядка, с направлением роста от линии сплавления к центру сварного шва.

4. Установлено наличия упрочнения металла сварного шва при лазерной сварке алюминиевых сплавов 1530 и 1550, по сравнению с основным металлом, проявляющееся в больших значениях микротвёрдости.

5. При лазерной сварке исследуемых сплавов 1530 и 1550 обеспечивается прочность сварного соединения на уровне 0,82...0,87 от прочности основного металла. Разрушение образцов при испытаниях на статическое растяжение происходило по зоне сплавления для обоих исследуемых сплавов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Катояма С. Справочник по лазерной сварке М: Техносфера. 2015. 319 с.

2. Грезев Н. В., Шамов Е. М., Маркушов Ю. В. Сварка волоконными лазерами // Ритм машиностроения. 2016. № 7. С. 34–40.

3. Suder W. J. Investigation of the effects of basic laser material interaction parameters in laser welding / W. J. Suder, S. W. Williams // Journal of Laser Applications. 2012. Vol. 24, No. 3. P. 032009-1-032009-8. DOI: 10.2351/1.4728136

4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Оборудование для лазерной обработки // М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2022. 458 с.

5. Tsukamoto S. Laser welding // Welding Intern. 2003, 17, № 10 P. 767–774.

6. Шелягин В.Д. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерной-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов. Шелягин В.Д., Оришич А.М., Хаскин В.Ю., Маликов А.Г., Чайка А.А. // Автоматическая сварка. 2014. № 5. С. 35–41.

7. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Издательство «Руда и металлы», 2020. 474 с.

8. Блинков В.В. Лазерные технологии в авиационной промышленности // ЛазерИнформ. 2009. № 23 (422). С. 5–9.

9. Hügел Н. Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren / Н. Hügел, Т. Graf. 2 Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009. 404 p.

10. Рабкин Д. М. Metallurgy of fusion welding of aluminum and its alloys. Киев: Наук. думка, 1986. 256 с.

11. Кархин В.А. Моделирование тепловых и кристаллизационных процессов при лазерной сварке алюминиевых сплавов. // Автоматическая сварка. 2002. № 8. С. 11–16.

12. Шиганов И.Н. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения / И.Н. Шиганов, С.В. Шахов, А.А. Холопов // Вестник МВТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2012. № 5. С. 34–50.

## REFERENCES

1. Katoyama S. Handbook of laser welding technology. Moscow: Technosphere. 2015, 319 p.

2. Grezev N. V., Shamov E. M., Markushov Yu. V. Fiber laser welding // Rhythm of Mechanical Engineering. 2016, no. 7, pp. 34–40

3. Suder W. J. Investigation of the effects of basic laser material interaction parameters in laser welding / W. J. Suder, S. W. Williams // Journal of Laser Applications. 2012. Vol. 24, No. 3. P. 032009 1 032009 8. DOI: 10.2351/1.4728136

4. Grigoryants A.G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. Equipment for LBM// Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 2022, 458 p.

5. Tsukamoto S. Laser welding // Welding Intern. 2003, 17, № 10. P. 767–774.

6. Shelyagin V.D. Microplasma and hybrid laser-microplasma. Welding of aluminium alloys. Shelyagin V.D., Orishich A.M., Haskin V.Yu., Malikov A.G., Chaika A.A. // Automatic welding. 2014. no. 5. Pp. 35–41.

7. Drits A.M., Ovchinnikov V.V. Welding of aluminum alloys. Moscow: Ore & Metals Publishing House. 2020, 474 p.

8. Blinkov V.V. Laser technologies in the aviation industry // LaserInform. 2009. no. 23 (422). Pp. 5–9.

9. Hügел Н. Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren // Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009. 404 p.

10. Rabkin D.M. Metallurgy of fusion welding of aluminum and its alloys. Kiev: Nauk. Dumka. 1986. 256 p.

11. Karkhin V.A. Modeling of thermal and crystallization processes in laser welding of aluminum alloys. / V.A. Karkhin, V.V. Ploshikhin, H.V. Bergman // Automatic welding. 2002. no. 8. Pp. 11–16.

12. Shiganov I.N. Laser welding of aluminum alloys of aviation purposes // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The Mechanical Engineering series. 2012, no. 5. Pp. 34–50.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.07.2025; одобрена после рецензирования 17.08.2025; принята к публикации 30.08.2025.

The article was submitted 06.07.2025; approved after reviewing 17.08.2025; accepted for publication 30.08.2025.