

УДК 621.791.927.5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

Оригинальное исследование



Влияние стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании деталей из алюминиевого сплава ER5356

К.С. Насоновский, А.А. Воропаев, Д.В. Волосевич, Н.Д. Роцин, Р.С. Корсмик

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время алюминиевые сплавы нашли свое применение во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, судостроительная, химическая, машиностроительная и пр. Внедрение технологии электродугового выращивания в производственный цикл изделий из алюминиевых сплавов позволяет значительно снизить временные и материальные издержки. Серьезной проблемой при использовании аддитивных технологий является анизотропия свойств. Как правило, в направлении наплавки слоев (вдоль оси X) свойства на растяжение выше, чем в направлении выращивания (вдоль оси Z). Одним из способов снижения уровня анизотропии является использование альтернативных стратегий выращивания. Данное исследование направлено на установление зависимости свойств материала от стратегии наплавки слоя.

Цель — исследование влияния стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании из алюминиевого сплава ER5356.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели были изготовлены образцы со следующими стратегиями наплавки: линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания, линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания, эллиптические колебания вдоль направления выращивания, а также змейка перпендикулярно направлению выращивания. В работе исследовались структура и механические свойства образцов, полученных электродуговым выращиванием с различной стратегией заполнения.

Результаты. С точки зрения формирования стратегии с линейными колебаниями под углом 45 градусов относительно направления выращивания (стратегия 2) и эллиптическими колебаниями вдоль направления выращивания (стратегия 3) в местах начала/завершения процесса имели нестабильности. Качество боковой поверхности у образцов 2, 3 и 4 находится на одном уровне, у образца 1 — чешуйчатость более выраженная. Минимальный уровень анизотропии равный 4 % был достигнут при использовании первой стратегии. Для трех остальных стратегии этот показатель находился в диапазоне от 10,2 до 14,2 %. Пористость образцов при всех четырех стратегиях не превышала 1 % по площади сечения. Снижение уровня механических свойств в направлении оси Z связано с наличием хрупких фаз на границах между слоями (стратегии 2 и 3) и несплавлением слоев между собой (стратегия 4).

Выводы. Полученные результаты показали, что стабильное формирование обеспечивают только стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания и со змейкой. В двух других наблюдаются нестабильные участки на края образца. При этом качество боковой поверхности близко на всех четырех образцах. Также стоит отметить, что необходимый уровень механических свойств с малой анизотропией был достигнут только при использовании стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания.

Ключевые слова: электродуговое выращивание; стратегия наплавки; алюминиевый сплав ER5356; механические испытания; металлографические исследования.

Как цитировать

Насоновский К.С., Воропаев А.А., Волосевич Д.В., Роцин Н.Д., Корсмик Р.С. Влияние стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании деталей из алюминиевого сплава ER5356 // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 123–132. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

Original study article

The effect of the layer deposition technique on production, structure, and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing of parts from aluminum alloy ER5356

Konstantin S. Nasonovskiy, Artem A. Voropaev, Darya V. Volosevich,
Nikita D. Roschin, Rudolf S. Korsmik

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Today, aluminum alloys are applied in many industries, including aerospace, shipbuilding, chemical, mechanical engineering, etc. Wire and arc manufacturing used to produce aluminum alloy products saves much time and cost. A big problem related to additive technologies is the anisotropy of properties. Tensile properties are usually higher along the deposition path (X axis) than the manufacturing path (Z axis). One way to reduce the anisotropy is to use alternative growth strategies. This study aims to establish the dependence of material properties on the layer deposition strategy.

AIM: The article investigates the effect of the layer deposition technique on production, structure and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing from aluminum alloy ER5356.

MATERIALS AND METHODS: For this purpose, samples were manufactured with the following deposition techniques: linear oscillations normal to the manufacturing path; linear oscillations at a 45-degree angle to the manufacturing path; elliptical oscillations along the manufacturing path, and a zigzag normal to the manufacturing path. The article explores the structure and mechanical properties of samples made by wire and arc additive manufacturing with different filling techniques.

RESULTS: For developing a strategy with linear oscillations at a 45-degree angle to the manufacturing path (Strategy 2) and elliptical oscillations along the manufacturing path (Strategy 3), there were unstable areas at the start/end points of the process. The lateral surface quality of samples 2, 3 and 4 is the same; whereas sample 1 has more pronounced ripples. The least anisotropy of 4% was achieved using the first strategy. For the other three strategies, this value varied from 10.2 to 14.2%. Porosity of the samples for all four strategies did not exceed 1% of the cross-sectional area. Deteriorated mechanical properties along the Z axis are associated with brittle phases at the layer boundaries (strategies 2 and 3) and the incomplete fusion of layers (strategy 4).

CONCLUSIONS: The results show that a stable structure is produced only by techniques with linear oscillations normal to the manufacturing path and with a zigzag motion. In the other two cases, unstable areas at the edges of the sample are observed. Moreover, the quality of the side surface is similar in all four samples. In addition, it is worth noting that a required level of mechanical properties with low anisotropy was achieved only with the strategy providing for linear oscillations normal to the manufacturing path.

Keywords: wire and arc additive manufacturing; metal adding techniques; ER5356 aluminum alloy; mechanical tests; metallographic study.

To cite this article

Nasonovskiy KS, Voropaev AA, Volosevich DV, Roschin ND, Korsmik RS. The effect of the layer deposition technique on production, structure, and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing of parts from aluminum alloy ER5356. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):123–132. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

Received: 10.01.2025

Accepted: 10.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Текущие тенденции развития техники указывают на увеличение спроса на алюминий и его сплавы. Основными потребителями данной группы сплавов являются авиа- и ракетостроение, что обусловлено высокой удельной прочностью, низким весом и высокой коррозионной стойкостью алюминия. Помимо этого, за счет особенностей физических и эксплуатационных свойств алюминиевые сплавы активно используются в машиностроительной, химической, судостроительной и прочих отраслях промышленности [1–3].

Кроме традиционных технологий получения заготовок, в последнее десятилетие набирают популярность аддитивные технологии. Одной из таких технологий является электродуговое выращивание. В данной технологии в качестве источника энергии для плавления присадочного материала используется электрическая дуга. При этом материал в зону обработки поступает в виде проволоки. За счет этого обеспечиваются высокие коэффициент использования материала и производительность. Так, например, в рамках исследования [4] представлены результаты применения различных методов WAAM для производства компонентов авиакосмической отрасли. Показано существенное снижение временных затрат на производство некоторых деталей, а также существенная экономия материала, что приводит к уменьшению себестоимости изделий.

К недостаткам данной технологии можно отнести низкое качество поверхности, а также анизотропию механических свойств. Для решения данных проблем можно прибегнуть к использованию различных стратегий заполнения слоя. В настоящее время количество статей от авторских коллективов из разных стран, направленных на изучение влияния стратегии заполнения на формирование, структуру и свойства, значительно растет,

что указывает на актуальность данного направления исследований. В частности, разносторонний обзор данного вопроса представлен в статье [5]. Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что использование различных стратегий наплавки слоя может приводить к улучшению механических свойств [6, 7], снижению количества дефектов [8–10], повышению стабильности процесса [11, 12] и точности изготавливаемых деталей [13, 14].

Данное исследование направлено на получение практических результатов, свидетельствующих о влиянии стратегии наплавки на структуру и свойства при электродуговом выращивании.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методика, оборудование и материалы

Методика проведения эксперимента

В рамках исследования были рассмотрены четыре стратегии наплавки слоя: линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания, линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания, эллиптические колебания вдоль направления выращивания, а также змейка. Схемы представлены на рис. 1.

Сварочный ток во всех четырех случаях был взят равным 90 А. При этом первые четыре слоя были выполнены на сварочном токе 120 А. Это необходимо для прогрева подложки до рабочих температур и обеспечения полного сплавления присадочного материала с материалом подложки. Данные слои в дальнейшем были отрезаны и не использовались при механических и металлографических исследованиях.

Стратегии с линейными и эллиптическими колебаниями были реализованы с помощью встроенных функций сварочного робота-манипулятора. В данном случае

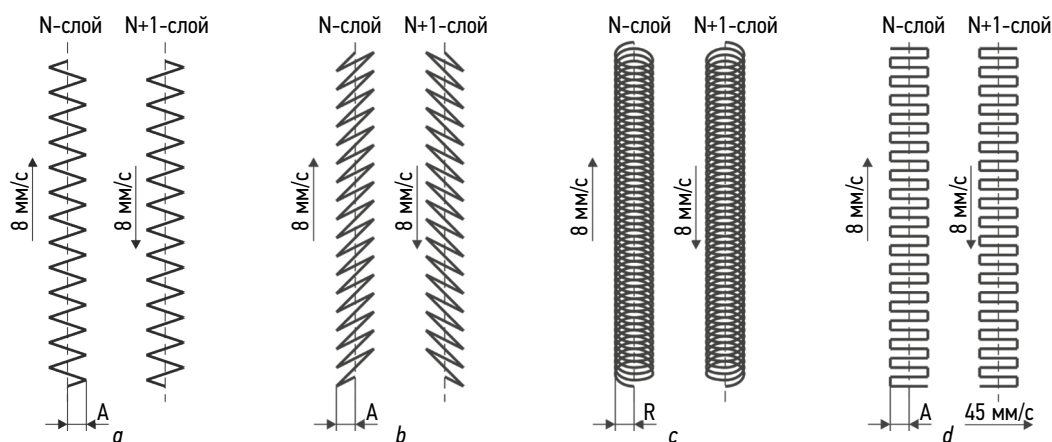


Рис. 1. Схема наплавки слоев: *a* — линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания; *b* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания; *c* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания; *d* — змейка.

Fig. 1. Layer deposition pattern: *a*, linear oscillations normal to the manufacturing path; *b*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path; *c*, elliptical oscillations along the manufacturing path; *d*, zigzag.

при написании программы была задана одна прямая, при перемещении вдоль которой происходило поперечное колебание рабочего инструмента с заданной амплитудой (A) / радиусом (R) и частотой. Амплитуда, радиус и частота были выбраны такими, чтобы обеспечить ширину первого слоя на рабочем режиме, равную 15 мм. Скорость перемещения при этом задавалась вдоль направления выращивания и равнялась 8 мм/с.

В случае стратегии «змейка» задание скорости осуществлялось вдоль траектории. Значение этого параметра было выбрано таким, чтобы обеспечить скорость вдоль направления выращивания такой же, как и при других

рассмотренных стратегиях заполнения слоя. На основании предварительных экспериментов скорость движения инструмента вдоль траектории была выбрана равной 45 мм/с.

Параметры процесса для всех стратегий представлены в табл. 1.

Используемое оборудование

Для изготовления экспериментальных образцов был использован стенд электродугового выращивания. Составные части стенда, а также его принципиальная схема представлены в табл. 2 и на рис. 2 соответственно.

Таблица 1. Параметры процесса для исследуемых стратегий

Table 1. Process parameters for studied techniques

Траектория	Сварочный ток, А	Скорость, мм/с	Амплитуда/ радиус, мм	Частота, Гц
Линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания	90	8	6	2
Линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания		8	8,5	2
Эллиптические колебания вдоль направления выращивания		8	6	4
Змейка		8 (45)	5	–

Таблица 2. Составные части стенда электродугового выращивания

Table 2. WAAM jig components

№ п.п.	Наименование	Значение
1	Комплект дугowego оборудования	
1.1	Источник сварочный	Fronius TPS 500i
1.2	Устройство подающее	Fronius WF 25i + Fronius WF 60i Robacta
1.3	Горелка сварочная	Fronius MHP 500i
2	Система позиционирования инструмента и заготовки	
2.1	Робот-манипулятор + контроллер	Yaskawa AR2010 + Yaskawa YRC1000
2.2	Стол сварочный	Стол сварочный 1500×1000 мм

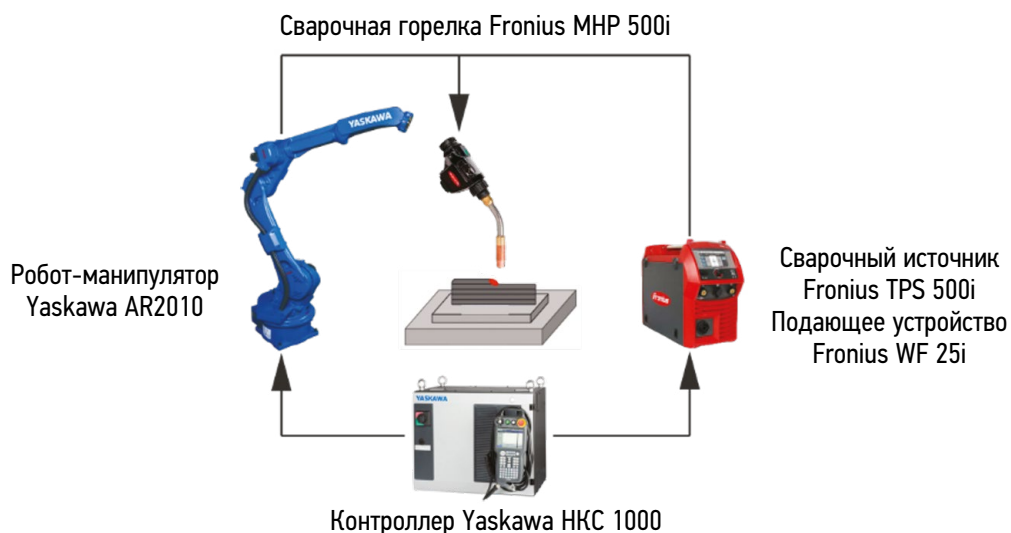


Рис. 2. Принципиальная схема стенда электродугового выращивания.

Fig. 2. Layout of the WAAM jig.

Таблица 3. Химический состав используемой проволоки

Table 3. Chemical composition of the wire used

Химический элемент	Al	Mg	Mn	Ti	Cr
Содержание, масс. %	94,73	4,94	0,11	0,11	0,11

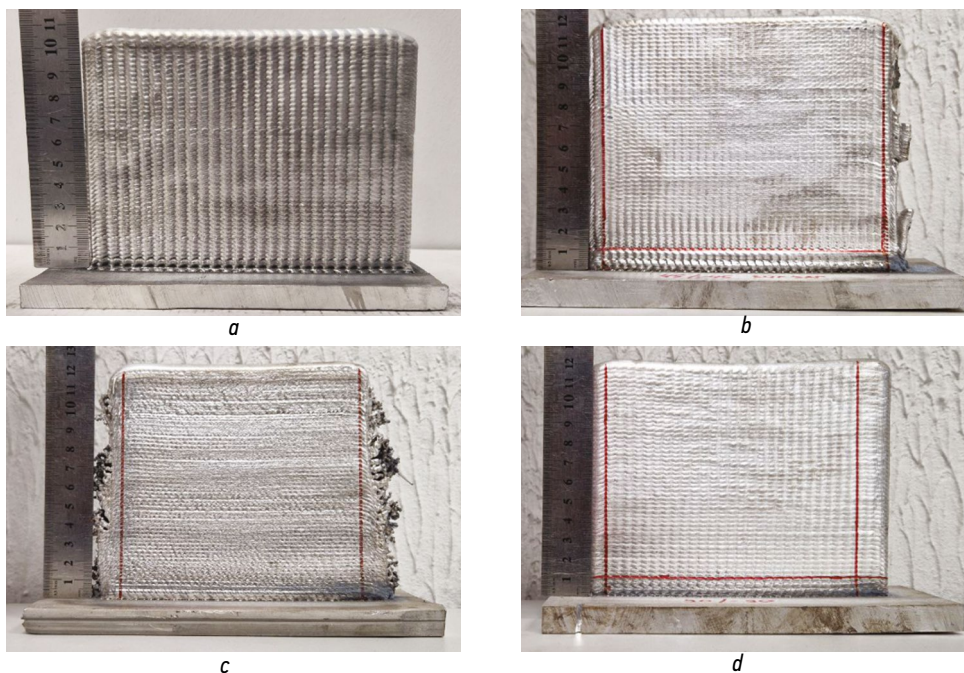


Рис. 3. Внешний вид полученных образцов: *a* — линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания; *b* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания; *c* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания; *d* — змейка.

Fig. 3. View of manufactured samples: *a*, linear oscillations normal to the manufacturing path; *b*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path; *c*, elliptical oscillations along the manufacturing path; *d*, zigzag.

Используемые материалы

В качестве присадочного материала для изготовления экспериментальных образцов была использована сварочная проволока ER5356 (аналог АМг5) производства компании EWC диаметром 1,2 мм. Химический состав используемой проволоки согласно сертификату качества приведен в табл. 3.

Для обеспечения защиты сварочной ванны использовался аргон высокой чистоты по ГОСТ 10157-79.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стабильность формирования

Внешний вид полученных образцов представлен на рис. 3.

Наиболее стабильный процесс с точки зрения формирования был обеспечен при использовании стратегий со змейкой и с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания. В двух других стратегиях наблюдалось нестабильное формирование в начале и конце слоя, что в итоге привело к существенному уменьшению длины участка образца, пригодного для проведения последующих исследований (рис. 4). Так, образцы с линейными колебаниями под углом 45 градусов относительно

направления выращивания и с эллиптическими колебаниями имели длину стабильного участка порядка 135 мм вместо записанных изначально в управляющей программе 150 мм.

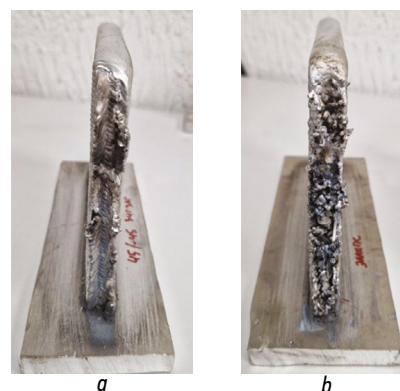


Рис. 4. Внешний вид участка начала/завершения процесса: *a* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания; *b* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания.

Fig. 4. View of the area of process start/end: *a*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path; *b*, elliptical oscillations along the manufacturing path.

При визуальной оценке можно сказать, что качество боковой поверхности на всех образцах практически не отличается. Более выраженный рельеф поверхности имеется на первом образце. При этом припуск на механическую обработку не превышает 1 мм. Наплывов и брызг обнаружено не было.

Металлографические исследования

Из выращенных образцов были вырезаны образцы для металлографических исследований. Макрошлифы представлены на рис. 5.

Во всех четырех образцах были обнаружены поры. Пористость — один из основных дефектов при работе с алюминиевыми сплавами. Большинство исследователей склоняется к тому, что основной причиной этого является растворенный водород. За счет большой разницы в растворимости водорода в жидкой и твердой фазах при кристаллизации происходит выделение большого объема газа. Из-за высокой скорости затвердевания не весь водород успевает выйти из сварочной ванны, в результате чего происходит его запечатывание внутри материала в виде сферических пор. Средний процент пористости по сечению для всех образцов не превышает 1 %.

Механические испытания

Из полученных образцов были изготовлены цилиндры для проведения механических испытаний. Результаты механических испытаний представлены в табл. 4.

Как видно из результатов механических испытаний, наилучшие свойства на растяжение показывает стратегия с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания. Предел прочности и относительное удлинение находятся в пределах стандартных значений для листового проката из сплава АМг5 или превышают их. Однако предел текучести на 4,7–5,7 % ниже эталонных значений. При этом анизотропия по пределу прочности не превышает 4 %.

Также стандартные значения свойств были достигнуты в направлении оси X при стратегии с линейными колебаниями под углом 45 градусов относительно направления выращивания. На одном из образцов, испытанных в направлении оси Z, после испытаний был обнаружен крупный дефект, что существенно снизило значения свойств (рис. 6). Поэтому данный образец был убран из рассмотрения.

На втором образце в направлении оси Z наблюдается просадка на 10,2 % по пределу прочности и на 7,5 %

Таблица 4. Результаты механических испытаний
Table 4. Mechanical test results

Стратегия	Направление	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания	X	105±1	268±2	29,9±2,7
	Z	104±1	258±1	21,6±0,8
Линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания	X	110±2	263±1	19,7±0,7
	Z	107±1	229±1	11,1±0,3
Эллиптические колебания вдоль направления выращивания	X	112±1	239±1	11,6±0,4
	Z	110±1	205±4	8,2±0,9
Змейка	X	104±1	249±9	30,3±0,1
	Z	107±2	168±1	5,3±0,4
Значение по ГОСТ 17232-99	—	110–120	255–265	12–13

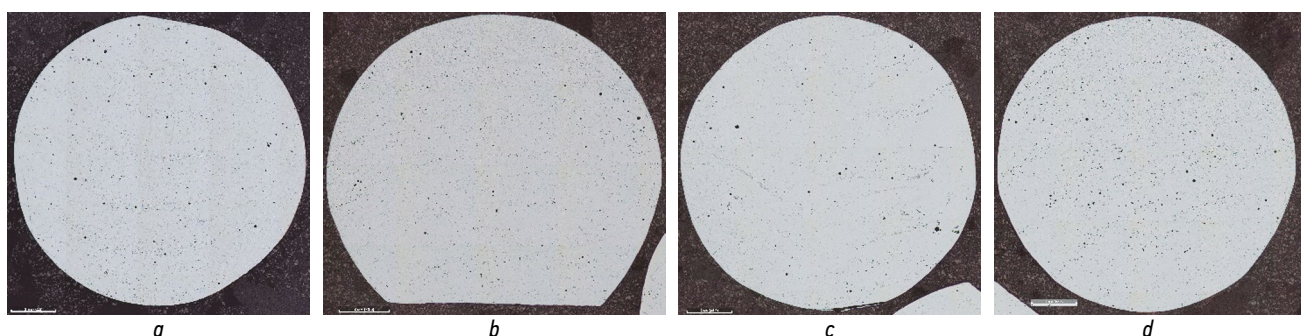


Рис. 5. Макрошлифы: *a* — линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания (пористость 0,93 %); *b* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания (пористость 0,98 %); *c* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания (пористость 0,88 %); *d* — змейка (пористость 0,90 %).

Fig. 5. Large sections: *a*, linear oscillations normal to the manufacturing path (porosity 0,93%); *b*, elliptical oscillations along the manufacturing path (porosity 0,98%); *c*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path (porosity 0,88%); *d*, zigzag (porosity 0,90%).

по относительному удлинению в сравнении со значением по ГОСТ. Также наблюдается значительный уровень анизотропии по прочности — до 13 %. Анализ изломов показал, что разрушение образцов происходило по вязкому механизму. В обоих направлениях на изломах наблюдаются поры, в направлении оси Z наблюдаются области, обогащенные оксидом, за счет чего происходит охрупчивание материала и более раннее разрушение образца (рис. 7).

В случае эллиптических колебаний предел прочности и относительное удлинение в направлении X ниже требуемых на 6,3 и 3,3 % соответственно, в направлении оси Z — на 19,6 и 31,7 % соответственно. Анизотропия

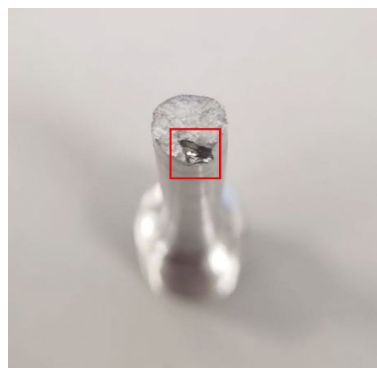


Рис. 6. Дефект на изломе после механических испытаний.
Fig. 6. Fracture face after mechanical tests.

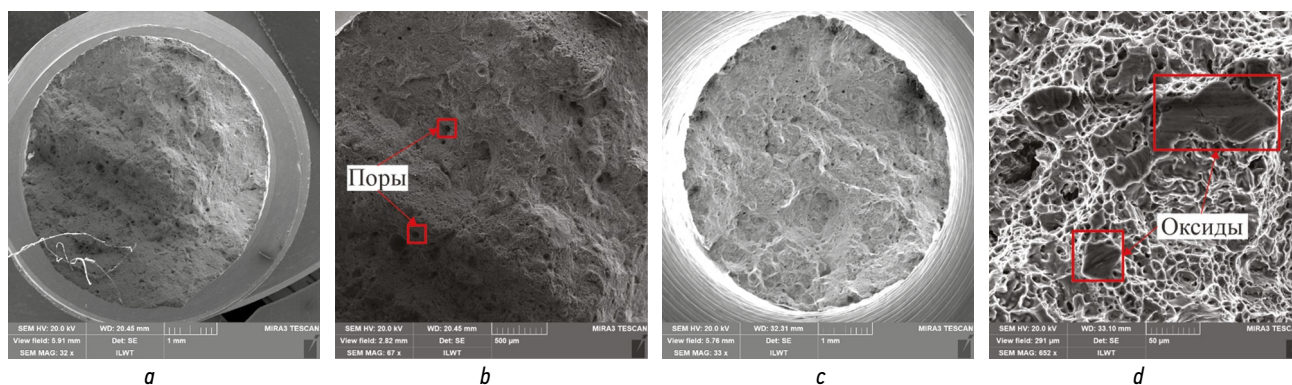


Рис. 7. Внешний вид изломов: *a* — общий вид, направление X; *b* — поры, направление X; *c* — общий вид, направление Z; *d* — участки, обогащенные оксидом, направление Z.
Fig. 7. Fractures view: *a*, general view, axis X; *b*, pores, axis X; *c*, general view, axis Z; *d*, oxide-rich areas, axis Z.

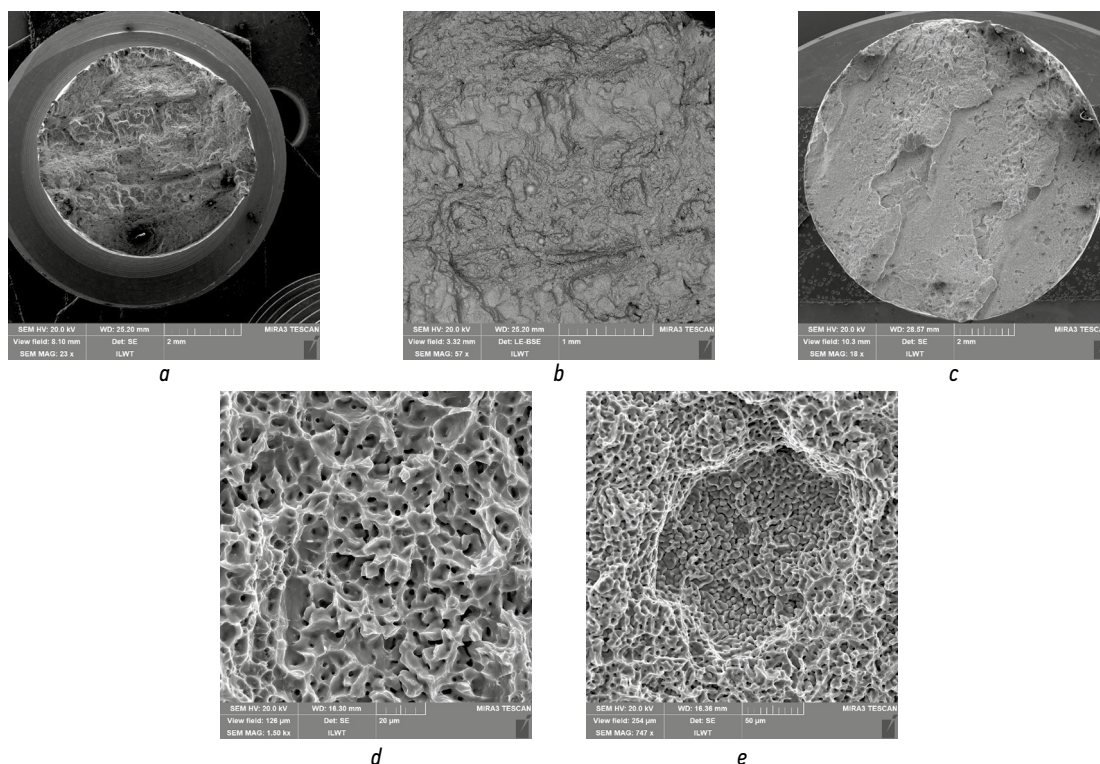


Рис. 8. Внешний вид изломов: *a* — общий вид, направление X; *b* — увеличение, направление X; *c* — общий вид, направление Z; *d* — участок с вязким характером разрушения, направление Z; *e* — участок с хрупким характером разрушения, направление Z.
Fig. 8. Fractures view: *a*, general view, axis X; *b*, magnification, axis X; *c*, general view, axis Z; *d*, ductile fracture area, axis Z; *e*, brittle fracture area, axis Z.

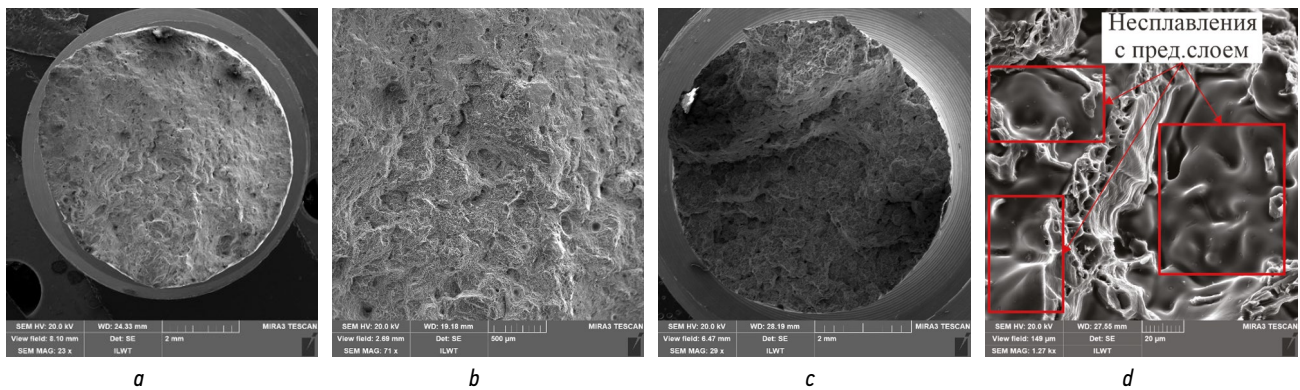


Рис. 9. Внешний вид изломов: *a* — общий вид, направление X; *b* — увеличение, направление X; *c* — общий вид, направление Z; *d* — область с несплавлениями между слоями, направление Z.

Fig. 9. Fractures view: *a*, general view, axis X; *b*, magnification, axis X; *c*, general view, axis Z; *d*, disbands between layers, axis Z.

свойств по прочности составила 14,2 %. Анализ изломов показал, что разрушение в направлении оси X происходило по вязкому механизму, а в направлении оси Z — по вязко-хрупкому (рис. 8).

При использовании стратегии «змейка» наблюдается существенная просадка свойств в направлении оси Z. В направлении оси X свойства ниже приведенных в ГОСТ на 2,4 %. Анализ изломов показал, что разрушение образца в вертикальном направлении происходило по хрупкому механизму. Также были обнаружены участки, в которых не происходило сплавление слоев друг с другом, что также привело к снижению свойств в этом направлении. Вдоль оси X наблюдался вязкий характер разрушения (рис. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы представлены результаты исследования влияния стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства алюминиевого сплава ER5356. Были рассмотрены четыре стратегии: линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания, линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания, эллиптические колебания вдоль направления выращивания, а также змейка перпендикулярно направлению выращивания.

Исследование показало, что наилучшее формирование было достигнуто при линейных колебаниях перпендикулярно направлению выращивания и змейке. В двух других случаях на участках начала/завершения процесса наблюдалось нестабильное поведение дуги, что привело к плохому формированию. С точки зрения боковой поверхности существенной разницы между стратегиями обнаружено не было.

Макроструктура наплавленного материала во всех случаях была одинаковой. Во всех образцах были обнаружены поры (не превышает 1 % по площади сечения), а на образце с линейными колебаниями под углом

45 градусов относительно направления выращивания также были обнаружены трещины, распространяющиеся по границам валиков.

Механические свойства на уровне стандартных значений (предел прочности 255–265 МПа) для проката были достигнуты только при использовании стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания. При линейных колебаниях под углом 45 градусов свойства в направлении оси X были также на уровне проката, однако в вертикальном направлении наблюдалась просадка до 229 МПа. В двух других стратегиях свойства были значительно ниже стандартных. Снижения уровня анизотропии удалось достичь также только при использовании стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания.

Анализ изломов показал, что в стратегиях с линейными колебаниями в обоих направлениях характер разрушения был вязким. В двух других стратегиях в направлении оси Z наблюдался хрупкий характер разрушения, что и привело к снижению свойств в данном направлении.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: К.С. Насоновский — анализ результатов, написание текста статьи; А.А. Воронин — выполнение экспериментальной части исследования; Д.В. Волосевич — выполнение металлографических исследований; Н.Д. Рощин — выполнение экспериментальной части исследования; Р.С. Корсмик — руководство, редактирование текста статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: K.S. Nasonovskiy, analyzing the results, writing the text of the article; A.A. Voropaev,

experimental part of the study; D.V. Volosevich, metallographic research; N.D. Roschin, experimental part of the study; R.S. Korsmik, management, editing of the text of the article.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // *Mater Des.* 2014. Vol. 56. P. 862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Georgantzi E., Gkantou M., Kamaris G.S. Aluminium alloys as structural material: A review of research // *Eng Struct.* 2021. Vol. 227. ID 111372. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111372
3. Starke E.A., Staley J.T. Application of modern aluminum alloys to aircraft // *Prog Aerosp Sci.* 1996. Vol. 32, N 2-3. P. 131–172. doi: 10.1016/0376-0421(95)00004-6
4. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., et al. Wire + Arc Additive Manufacturing // *Mater Sci Technol.* 2016. Vol. 32, N 7. P. 641–647. doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073
5. Mohd Mansor M.S., Raja S., Yusof F., et al. Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies // *J Mater Res Technol.* 2024. Vol. 30. P. 2478–2499. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.03.170
6. Ayarkwa K.F., Pintera Z., Eimer E., et al. Effect of the deposition strategy on Al-Cu alloy Wire + Arc Additive Manufacture // *Mater Sci Eng Technol.* 2021. Vol. 1.
7. Rodrigues T.A., Cipriano Farias F.W., Zhang K., et al. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel / Inconel 625 functionally graded material: development and characterization // *J Mater Res Technol.* 2022. Vol. 21. P. 237–251. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.169
8. Wei Y., Liu F., Liu F., et al. Effect of arc oscillation on porosity and mechanical properties of 2319 aluminum alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing // *J Mater Res Technol.* 2023. Vol. 24. P. 3477–3490. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.203
9. Venturini G., Montevecchi F., Scippa A., Campatelli G. Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features // *Procedia CIRP.* 2016. Vol. 55. P. 95–100. doi: 10.1016/j.procir.2016.08.043
10. Aldalur E., Veiga F., Suárez A., et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties // *J Manuf Process.* 2020. Vol. 58. P. 615–626. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.060
11. Chakkravarthy V., Jerome S. Printability of multiwalled SS 316L by wire arc additive manufacturing route with tunable texture // *Mater Lett.* 2020. Vol. 260. ID 126981. doi: 10.1016/j.matlet.2019.126981
12. Xu X., Ding J., Ganguly S., et al. Preliminary investigation of building strategies of maraging steel bulk material using Wire + Arc Additive Manufacture // *J Mater Eng Perform.* 2018. Vol. 28. P. 594–600. doi: 10.1007/s11665-018-3521-5
13. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing // *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. Vol. 73. P. 173–183. doi: 10.1007/s00170-014-5808-5
14. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) // *Robot Comput-Integr Manuf.* 2015. Vol. 31. P. 101–110. doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008

REFERENCES

1. Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Mater Des.* 2014;56:862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Georgantzi E, Gkantou M, Kamaris GS. Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Eng Struct.* 2021;227:111372. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111372
3. Starke EA, Staley JT. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Prog Aerosp Sci.* 1996;32(2-3):131–172. doi: 10.1016/0376-0421(95)00004-6
4. Williams SW, Martina F, Addison AC, et al. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Mater Sci Technol.* 2016;32(7):641–647. doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073
5. Mohd Mansor MS, Raja S, Yusof F, et al. Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies. *J Mater Res Technol.* 2024;30:2478–2499. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.03.170
6. Ayarkwa KF, Pintera Z, Eimer E, et al. Effect of the deposition strategy on Al-Cu alloy Wire + Arc Additive Manufacture. *Mater Sci Eng Technol.* 2021. Vol. 1.
7. Rodrigues TA, Cipriano Farias FW, Zhang K, et al. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel / Inconel 625 functionally graded material: development and characterization. *J Mater Res Technol.* 2022;21:237–251. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.169

8. Wei Y, Liu F, Liu F, et al. Effect of arc oscillation on porosity and mechanical properties of 2319 aluminum alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing. *J Mater Res Technol.* 2023;24:3477–3490. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.203
9. Venturini G, Montevecchi F, Scippa A, Campatelli G. Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features. *Procedia CIRP.* 2016;55:95–100. doi: 10.1016/j.procir.2016.08.043
10. Aldalur E, Veiga F, Suárez A, et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. *J Manuf Process.* 2020;58:615–626. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.060
11. Chakkravarthy V, Jerome S. Printability of multiwalled SS 316L by wire arc additive manufacturing route with tunable texture. *Mater Lett.* 2020;260:126981. doi: 10.1016/j.matlet.2019.126981

12. Xu X, Ding J, Ganguly S, et al. Preliminary investigation of building strategies of maraging steel bulk material using Wire + Arc Additive Manufacture. *J Mater Eng Perform.* 2018;28:594–600. doi: 10.1007/s11665-018-3521-5
13. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014;73:173–183. doi: 10.1007/s00170-014-5808-5
14. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robot Comput-Integr Manuf.* 2015;31:101–110. doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008

ОБ АВТОРАХ

***Константин Сергеевич Насоновский**, магистр;
адрес: 198262, Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, д. 38Б;
ORCID: 0000-0002-0069-2698; eLibrary SPIN: 3236-9603;
e-mail: nasonovskiy.konstantin@gmail.com

Артем Александрович Воропаев, аспирант;
ORCID: 0000-0002-1400-012X;
e-mail: t-voropaev94@mail.ru

Дарья Владимировна Волосевич, магистр;
ORCID: 0000-0002-2288-2935;
e-mail: dasha.volosevich@mail.ru

Никита Дмитриевич Рошин, бакалавр;
e-mail: n.d.roschin@gmail.com

Рудольф Сергеевич Корсмик, канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0003-1591-1942; eLibrary SPIN: 6726-2629;
e-mail: rudak27@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Konstantin S. Nasonovskiy**, Master's Degree student;
address: 38B ave Marshal Zhukov, Saint Petersburg, 198262,
Russia; ORCID: 0000-0002-0069-2698; eLibrary SPIN: 3236-9603;
e-mail: nasonovskiy.konstantin@gmail.com

Artem A. Voropaev, postgraduate student;
ORCID: 0000-0002-1400-012X;
e-mail: t-voropaev94@mail.ru

Darya V. Volosevich, Master's Degree student;
ORCID: 0000-0002-2288-2935;
e-mail: dasha.volosevich@mail.ru

Nikita D. Roschin, Bachelor's degree;
e-mail: n.d.roschin@gmail.com

Rudolf S. Korsmik, Cand. Sci. (Engineering);
ORCID: 0000-0003-1591-1942; eLibrary SPIN: 6726-2629;
e-mail: rudak27@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author