

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.791.92
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-159-168



ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТВОДОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ 08X18H10T

Злобин Е.П.¹, Балякин А.В.¹, Хаймович А.И.¹, Котов К. А.², Кретов К.С.¹, Платонов М.С.¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Традиционно отводы для систем технологических трубопроводов на атомных электростанциях изготавливаются штамповкой. Однако при использовании данного метода возникает серьёзная проблема – высокий процент брака из-за неравномерного распределения материала по изделию. Это приводит к снижению качества продукции и увеличению затрат на производство. В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных методов изготовления. Одним из перспективных направлений является использование аддитивных технологий, а именно технологии прямого лазерного выращивания. Целью данной работы является изучение возможности применения прямого лазерного выращивания в качестве новой технологии для производства отводов. В рамках исследования была изготовлена опытная партия изделий и образцы для испытаний. Был проведен контроль точности геометрических параметров выращенных отводов, а также оценка физико-механических свойств и качества поверхностного слоя. Результаты исследования показали, что химический состав материала образцов соответствует требованиям, предъявляемым к марке стали 08X18H10T. Однако механические испытания выявили некоторые несоответствия в области предела текучести. Образцы обладают высокой стойкостью к межкристаллитной коррозии, а также низкую степень загрязнённости неметаллическими включениями, содержание ферритной фазы не превышает 5%. Проведённый контроль геометрических параметров отводов показал, что все размеры соответствуют конструкторским требованиям, а на поверхности отсутствуют недопустимые дефекты. На основе полученных данных были даны рекомендации по возможной корректировке технологии для обеспечения соответствия всем требованиям ГОСТ по механическим свойствам. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для оптимизации производственных процессов и повышения качества продукции в сфере атомной промышленности.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, отводы, металлопорошковая композиция, сталь 08X18H10T, металлография, механические свойства, геометрическая точность, качество поверхностного слоя, галтовка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00765 <https://rscf.ru/project/24-19-00765/>.

© Злобин Е.П., Балякин А.В., Котов К. А., Хаймович А.И., Кретов К.С., Платонов М.С., 2025

Для цитирования

Изготовление отводов для атомной промышленности методом прямого лазерного выращивания из металлопорошковой композиции 08X18H10T / Злобин Е.П., Балякин А.В., Котов К. А., Хаймович А.И., Кретов К.С., Платонов М.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 159-168. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-159-168>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MANUFACTURING OF BRANCH TUBES FOR NUCLEAR INDUSTRY BY DIRECT ENERGY DEPOSITION MADE OF METAL POWDER COMPOSITION 08Cr18Ni10T

Zlobin E.P.¹, Balyakin A.V.¹, Khaimovich A.I.¹, Kotov K. A.², Kretov K.S.¹, Platonov M.S.¹

¹Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Traditionally, branch tubes for process pipeline systems at nuclear power plants are made by stamping. However, when using this method, a serious problem arises such as a high percentage of defects due to the uneven distribution of material over the product. This leads to a decrease in product quality and an increase in production costs. In this regard, there is a need to search for alternative manufacturing methods. One of the promising areas is the use of additive technologies, namely direct energy deposition. The purpose of this work is to study the possibility of using direct energy deposition as a new technology for the production of branch tubes. As part of the research, a pilot batch of parts and test samples were produced. The accuracy of the geometric parameters of the obtained branch tubes was monitored, as well as the assessment of the physical and mechanical properties and quality of the surface layer. The results of the study showed that the chemical composition of the sample material meets the requirements for the 08Cr18Ni10T steel grade. However, mechanical tests revealed some inconsistencies in the field of yield strength. The samples have high resistance to intercrystalline corrosion, as well as a low degree of contamination with non-metallic inclusions, the content of the ferrite phase does not exceed 5%. The control of the geometric parameters of the branch tubes showed that all dimensions meet the design requirements, and there are no unacceptable defects on the surface. Based on the data obtained, recommendations were made on possible adjustments to the technology to ensure compliance with all GOST requirements for mechanical properties. The practical significance of the research lies in the possibility of using the results obtained to optimize production processes and improve product quality in the nuclear industry.

Keywords: direct energy deposition, branch tubes, metal powder composition, 08Cr18Ni10T steel, metallography, mechanical properties, geometric precision, surface layer quality, tumbling

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No.24-19-00765 <https://rscf.ru/project/24-19-00765/>.

For citation

Zlobin E.P., Balyakin A.V., Khaimovich A.I., Kotov K.A., Kretov K.S., Platonov M.S. Manufacturing OF Branch Tubes for Nuclear Industry by Direct Energy Deposition Made of Metal Powder Composition 08Cr18Ni10T. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 159-168. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-159-168>

Введение

Отводы применяются в конструкциях систем технологических трубопроводов, располагающихся в зданиях и сооружениях АЭС, находящихся в контакте с радиоактивными носителями, растворами химических реагентов, а также системах, предъявляющих повышенные требования к коррозионной стойкости конструктивных элементов. Традиционно изделия изготавливаются методом штамповки из трубы 45×3,5 мм. Однако этот метод имеет ряд недостатков, главный из них – местное утолщение стенки до 4,2 мм, возникающее вследствие осадки металла при формоизменении, что недопустимо согласно рабочей конструкторской документации (РКД) [1]. В процессе доработки толщины стенки (зачистка шлифовальной машинкой) высока вероятность перевода детали в брак ввиду неравномерного снятия металла абразивным инструментом. В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных методов изготовле-

ния отводов, которые позволят снизить процент брака и повысить качество продукции.

В условиях современного промышленного развития, когда предприятия стремятся сократить себестоимость производства и одновременно повысить качество выпускаемой продукции, всё более актуальными становятся передовые технологии [2]. Одной из таких является прямое лазерное выращивание (ПЛВ) — метод аддитивного производства, который существенно меняет подход к созданию сложных деталей [3, 4]. Этот метод основан на послойной наплавке материала, а за счет применения шестиосевого робота-манипулятора можно эффективно воспроизводить элементы со сложной геометрией без использования поддерживающих структур [5]. Прямое лазерное выращивание обеспечивает высокую производительность в сочетании с достаточной точностью и позволяет минимизировать отходы материалов и быстро изготавливать изделия без дополнительных затрат на оснастку [6].

Целью данной работы является изучение возможности применения технологии прямого лазерного выращивания в качестве альтернативы традиционным методам производства отводов. Для этого требовалось изготовить опытную партию деталей и провести исследования, направленные на оценку качества и точности их изготовления. Также необходимо вырастить образцы-свидетели для контроля физико-механических свойств и химического состава изделий, полученных в процессе выращивания. Результаты исследования направлены на определение перспектив использования ПЛВ для производства отводов и разработку рекомендации по оптимизации технологического процесса.

Материалы и методы исследования

Для изготовления отводов и необходимых трубных заготовок использовалась отечественная установка ИЛИСТ L, разработанная институтом лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ. Данное оборудование предназначено для изготовления металлических крупногабаритных изделий с максимальным диаметром 900 мм и высотой 600 мм при массовой производительности до 1,2 кг/ч в случае применения порошковых материалов из никелевых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей. Установка ПЛВ оснащена промышленным шестиосевым роботом и позиционером грузоподъемностью до 400 кг. Также в ее состав входит волоконный иттербиевый лазер с максимальной выходной мощностью 2 кВт, чиллер для охлаждения лазера и технологический инструмент. В качестве технологического инструмента выступает лазерная оптическая система с четырехструйным соплом для фокусировки газопорошковых струй.

Перед началом выращивания был проведен входной контроль металлопорошковой композиции (МПК) 08X18H10T от производителя ОЗ «Микрон» на соответствие его заявленным характеристикам [7]. По химическому составу порошок 08X18H10T соответствовал требованиям ГОСТ 5632-2014 к нержавеющей стали марки 08X18H10T (табл. 1).

Гранулометрический состав определялся методом сухого рассева порошка 08X18H10T на виброситах. Массовая доля фракции 40-200 мкм составила 93,5%, что является оптимальным значением для процесса ПЛВ. Насыпная плотность порошка определялась с помощью анализатора BeDensi T1. Среднее арифметическое значение измерений насыпной плотности составило 4,95 г/см³.

Текучесть порошка определялась с помощью анализатора HFlow-1 методом воронки Холла с диаметром отверстия 2,5 мм. Среднее значение текучести по результатам замеров времени истечения 50 г порошка через воронку составило 12,2 с.

Форма частиц порошка определялась с помощью анализатора размера микроструктуры твердых тел по ГОСТ 25849-83. Исследование микроструктуры порошка проводилось на электронно-растровом микроскопе TESCAN VEGA. Фактор формы частиц рассчитывался как отношение максимального линейного размера проекции частицы к минимальному размеру, измерение размеров производилось вручную при помощи программного обеспечения анализатора. Полученный на сканирующем электронном микроскопе внешний вид частиц порошка показан на рис. 1.

По результатам расчетов фактора формы частиц порошка количество частиц сферической формы в анализируемой выборке составило 99,5%.

Таблица 1. Химический состав металлопорошковой композиции 08X18H10T

Table 1. Chemical composition of metal powder composition 08Cr18Ni10T

Химический элемент												
Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Cu	V	Mo	C	P	S	
Фактическая масса, %												
71,18	17,64	9,28	0,913	0,375	0,262	0,075	0,09	0,023	0,056	-	-	
Норма по ГОСТ 5632, %												
Основа	17-19	9-11	≤2,0	≤0,8	≤0,7	≤0,3	-	-	≤0,08	≤0,035	≤0,02	

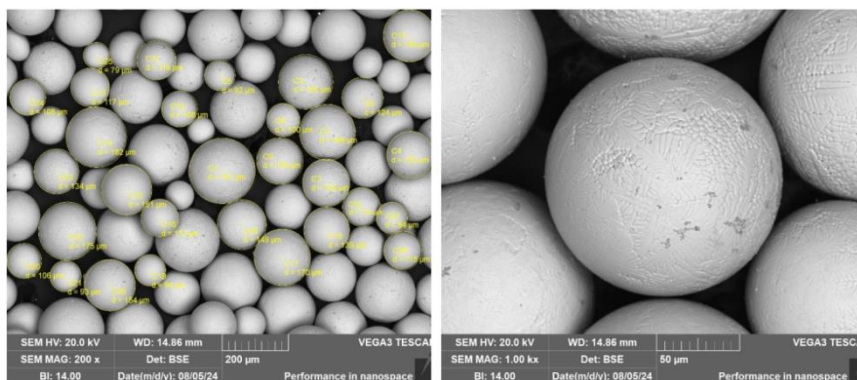


Рис. 1. Форма частиц порошка

Fig. 1. The shape of the powder particles

С целью повышения качества синтезированного материала была проведена отработка технологических параметров ПЛВ [8]. Для этого были изготовлены технологические пробы на разных режимах сплавления, для которых варьировалась мощность лазерного излучения от 1000 до 1800 Вт. Далее проводился микроструктурный анализ полученных образцов и выбирался оптимальный режим для выращивания.

Подобранный оптимальный режим ПЛВ имеет следующие технологические параметры:

- ширина валика 2 мм;
- высота слоя 0,6 мм;
- смещение между валиками 1,33 мм;
- мощность лазерного излучения 1200 Вт;
- рабочая скорость наплавки 20 мм/с;
- линейные скорости холостых перемещений 50 мм/с;
- расход защитного газа 15 л/мин;
- расход транспортного газа 4 л/мин.

Микрошлиф, полученный на оптимальных режимах, показан на **рис. 2**.

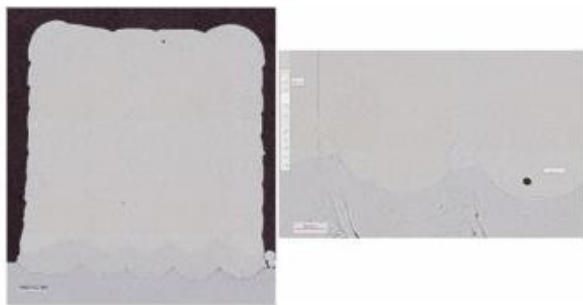


Рис. 2. Вид микрошлифа, полученного на оптимальном режиме

Fig. 2. The type of microsection obtained in the optimal mode

Для выращивания отводов была добавлена технологическая прибыль толщиной 15 мм от подложки. Это обеспечивает исключение попадания перемешанного слоя материала подложки и порошка в состав детали, а также компенсирует неровности подложки и снижает их влияние на формирование геометрии. Оптимизированная трёхмерная модель отвода для выращивания представлена на **рис. 3**.

Для изготовления отводов использовалась стратегия наплавки, при которой слой формировался в два валика с постепенным наклоном инструмента и его наплавкой последних слоев под углом 90°. Это позволило минимизировать деформации, связанные с короблением, и обеспечить необходимую толщину готового изделия. Трубные заготовки были выполнены на тех же режимах, с той же толщиной для того, чтобы конечное изделие по эксплуатационным свойствам максимально соответствовало опытным деталям.

Процесс выращивания отводов и заготовок осуществлялся в камере, заполненной аргоном и был

разделён на два этапа. На первом этапе изготавливались четыре отвода и трубы для проведения испытаний. На втором этапе были выращены ещё четыре отвода и образцы, которые использовались для контроля ферритной фазы. Процесс изготовления показан на **рис. 4**.

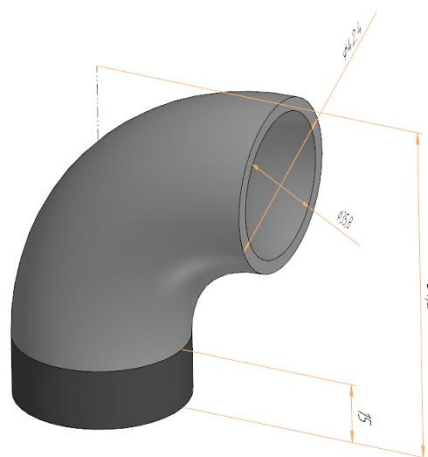


Рис. 3. 3D-модель отвода для выращивания
Fig. 3. 3D model of the branch tubes for the DED process

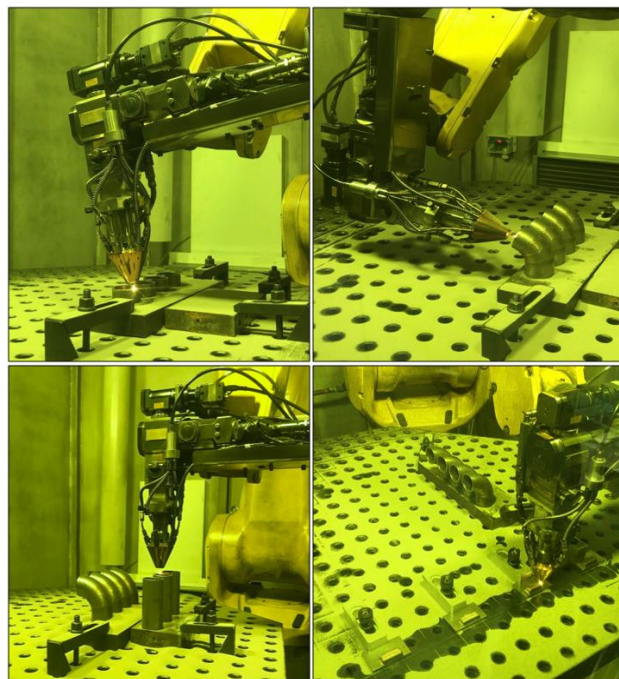


Рис. 4. Процесс выращивания отводов и образцов для испытания

Fig. 4. The process of manufacturing branch tubes and test samples

Для повышения качества поверхности и снижения шероховатости деталей применялась технология галтовки, состоящая из двух последовательных этапов – черного и чистового [9, 10]. Обработка производилась с использованием турбогалтовки ротор-

ного типа Avalon TE10 W (рис. 5). Турбогалтовки, в отличие от вибрационных машин, используют ротационное движение для создания однородного потока абразивных материалов, что является более эффективным процессом и позволяет убрать дефектный слой с поверхности изделия за более короткий промежуток времени.



Рис. 5. Внешний вид турбогалтовки Avalon TE10 W
Fig. 5. The appearance of the Avalon TE10 W rotary tumbling machine

В процессе обработки для каждого этапа использовались пластиковые абразивные тела конусной и пирамидальной формы с различной степенью абразивности. Черновая обработка длилась два часа при скорости вращения ротора 350 об/мин. На черновом этапе удалялись основные дефекты, такие как неровности сформированного слоя и налипшие частицы порошка. Чистовой этап длительностью один час проводился в галтовочных телах меньшей абразивно-

сти и при частоте оборотов 200 об/мин. Чистовой этап был направлен на сглаживание пиков шероховатости и придание поверхности блеска.

Полученные результаты и их обсуждение

Для контроля получившихся характеристик изделия было необходимо проведение следующих испытаний по ГОСТ Р 70731.2-2023:

- Контроль химического состава.
- Испытания на растяжение при комнатной температуре.
- Испытания на растяжение при повышенной температуре 350°C.
- Контроль содержания неметаллических включений.
- Контроль содержания ферритной фазы.
- Испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии.
- Контроль диаметра, толщины стенки отвода.
- Контроль состояния поверхности отвода.

Контроль химического состава заготовок.

Определение химического состава металла заготовок проводилось по ГОСТ 54153-2010 на оптико-эмиссионном анализаторе ДФС-500. Результаты определения химического состава металла приведены в табл. 2.

По результатам исследования металла заготовок установлено, что химический состав металла соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 5632-2014 к марке стали 08X18H10T, и требованиям нормативно-технической документации.

Испытание на растяжение при комнатной температуре. Определение механических свойств металла заготовок осуществлялось по ГОСТ 10006-80 с использованием машины испытательной универсальной ТРМ Tochline. Результаты испытания представлены в табл. 3. Следует отметить, что испытание металла по ГОСТ 10006-80 не предусматривает определение относительного сужения образцов.

Таблица 2. Химический состав металла

Table 2. Chemical composition of metal

Образец	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Cu	Mo
1	0,05	0,45	1,11	0,015	0,008	17,75	9,26	0,28	0,09	0,07
2	0,04	0,49	1,08	0,020	0,005	17,08	9,26	0,31	0,09	0,09
Требования ГОСТ 5632-2014										
08X18H10T	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 2,00	≤ 0,040	≤ 0,020	17,00-19,00	9,00-11,00	≤ 0,70	≤ 0,30	-

Таблица 3. Результаты определения механических характеристик

Table 3. Results of mechanical properties determination

Образец	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	597	344	41,0
2	639	375	53,0
Среднее	618	359	45,0
Требования НТД	510-730	215-340	Не менее 35

По результатам проведенных испытаний установлено, что механические свойства металла заготовок не соответствуют требованиям нормативно-технической документации в части предела текучести (превышение не более 6%). Это является характерным явлением для прямого лазерного выращивания, так как в процессе наплавки происходит направленная кристаллизация, которая обеспечивает формирование мелкозернистой структуры, что приводит к упрочнению материала и повышению его предела текучести по сравнению с традиционными методами производства [11].

Испытание на растяжение при повышенной температуре. Определение механических свойств металла заготовок осуществлялось по ГОСТ 19040-81 с использованием испытательной машины Shimadzu AGS-X. Результаты испытания представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты определения механических характеристик при повышенных температурах

Table 4. Results of mechanical properties determination at elevated temperatures

Образец	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	414	235	33,5
2	425	223	44,8
3	420	212	34,6
4	419	210	29,4
Среднее	419	220	36
Требования НТД	Не менее 412	177-290	Не менее 26

По результатам проведенных испытаний установлено, что механические свойства металла при повышенной температуре 350°C заготовок соответ-

ствуют требованиям нормативно-технической документации.

Контроль содержания неметаллических включений. По результатам микроструктурного анализа установлено, что металл заготовок незначительно загрязнен неметаллическими включениями: оксидами точечными 0,5 балла, силикатами недеформирующимися 0,5 балла, нитридами точечными 0,5 балла по ГОСТ 1778-2022. Степень загрязненности неметаллическими включениями соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Контроль содержания ферритной фазы. Была проведена детальная оценка ферритной составляющей, измеренной по пяти снимкам микрошлифов, сделанным на различных участках образца (рис. 6). Результаты анализа показали, что ферритная фаза составляет 5%, что соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Контроль геометрических параметров. После процесса галтовки был проведен контроль геометрических параметров и оценка отклонения формы. Для оценки изделия «Отвод» применялись комбинированные методы измерения, включающие в себя сканирование с использованием ручного сканера и измерения с помощью традиционных контрольно-измерительных инструментов – штангенциркуля и кронциркуля [12].

Для контроля геометрических параметров изделия «Отвод» использовался ручной сканер Scanform L5 с установленным разрешением сканирования 0,3 мм. Сканирование проводилось с одного торца изделия, что дало возможность получить достаточное представление о его форме и размерах. Для анализа полученных данных была использована программа Geomagic Control X. В ней было произведено совмещение 3D-модели со сканом формата stl. Результаты совмещения представлены на рис. 7.

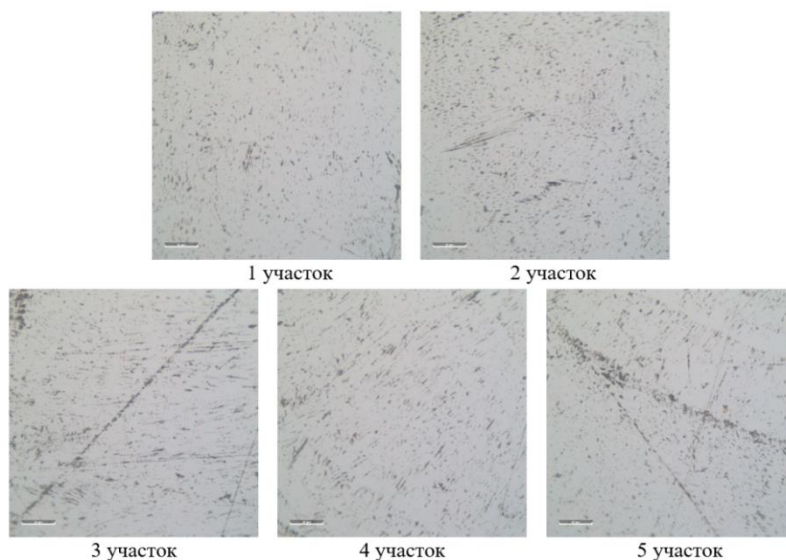


Рис. 6. Микрошлифы образца на разных участках для контроля ферритной фазы

Fig. 6. Metallographic specimen at different sites for monitoring the ferritic phase

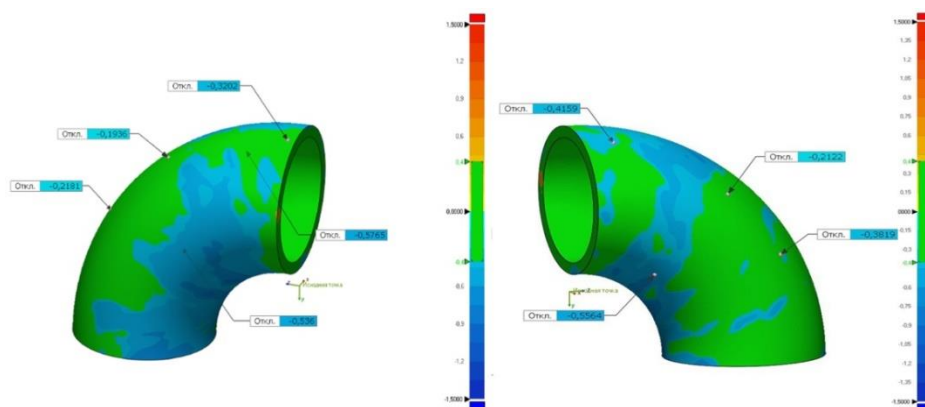


Рис. 7. Отклонение формы изготовленного отвода
Fig. 7. Shape deviation of the manufactured branch tube

Результаты сканирования показали, что максимальное отклонение от заданной геометрии составляет 0,6 мм, а минимальное -0,9 мм. Среднее значение отклонения размеров -0,3 мм. Эти данные необходимо учесть при дальнейшем анализе и корректировке технологического процесса. Чтобы минимизировать отклонения, можно использовать предкоррекцию геометрии, это позволит компенсировать потенциальные отклонения и повысить точность соответствия изделий заданным параметрам.

В табл. 5 представлены результаты измерений наружного и внутреннего диаметров отвода в четырех сечениях, которые были получены в ходе измерения с помощью штангенциркуля ШЦ-1-125 с точностью 0,1 мм. Также приведены результаты измерений толщины стенки отвода, выполненные в двух точках на его краях с помощью кронциркуля Mitutoyo 209-406 с точностью 0,01 мм.

После проведенного измерения ручным контрольно-измерительным инструментом все основные размеры находятся в допуске и соответствуют конструкторским требованиям.

Контроль состояния поверхности. После процесса выращивания на внутренних и внешних поверхностях отвода, сформированных методом послойного наложения валиков, наблюдается характерная для технологии ПЛВ волнистость, а также при-

липшие частицы МПК (рис. 8). Эти факторы способствуют формированию шероховатости по R_a до 15 мкм [13]. Характерный бронзовый оттенок отвода, наблюдаемый после выращивания, обусловлен резкими колебаниями температуры, возникающими в результате нагрева и последующего скоротечного охлаждения.

После проведенной постобработки поверхность отвода более равномерная с заметно сниженной волнистостью. На внутренней и внешней поверхностях отсутствуют дефекты в виде сколов, трещин, пленов, пор, несплавлений, а также инородные металлические и неметаллические включения. Однако на поверхности имеются локальные наплывы и ямки, которые не превышают $\pm 0,05$ мм и не выводят толщину стенки за допустимые пределы.

Измерение шероховатости отвода проводилось с помощью профилометра ИШП-210. Были получены следующие средние значения: $R_a = 11,63$ мкм (для внутренней поверхности) и $R_a = 5,96$ мкм (для наружной поверхности). Шероховатость внутренней поверхности изделия больше, чем наружной, поскольку она обрабатывается менее эффективно. Это обусловлено ограниченной доступностью данной поверхности для взаимодействия с галтовочными телами и более низкой скоростью потока абразива внутри отвода.

Таблица 5. Результаты измерения основных геометрических параметров

Table 5. Measurement results of the main geometric parameters

Сечение		Наружный диаметр			
		Результат измерения, мм			Среднее значение, мм
		№1	№2	№3	
A-A	42,4 \pm 0,6	41,9	41,7	42,0	41,8
Б-Б	42,4 \pm 0,6	41,6	41,8	41,9	41,8
В-В	42,4 \pm 0,6	41,8	41,6	41,8	41,7
Г-Г	42,4 \pm 0,6	41,8	41,9	41,6	41,8
Сечение		Внутренний диаметр			
		Результат измерения, мм			Среднее значение, мм
		№1	№2	№3	
A-A	35,8 \pm 0,45	35,7	35,9	35,4	35,6
Г-Г	35,8 \pm 0,45	35,6	35,4	35,6	35,5
Сечение		Толщина стенки			
		Результат измерения, мм			Среднее значение, мм
		№1	№2	№3	
A-A	3,3 \pm 0,7	3,02	2,95	2,89	2,95
Г-Г	3,3 \pm 0,7	2,89	3,0	2,93	2,94



Рис. 8. Поверхностный слой изделия до и после обработки
Fig. 8. The surface layer of the branch tube before and after processing

Закключение

В результате работы были изготовлены отводы и опытные образцы, необходимые для проведения испытаний. Исследования показали, что химический состав образцов соответствует требованиям, которые предъявляются к марке стали 08X18H10T. Однако результаты механических испытаний выявили некоторые несоответствия свойств требованиям нормативно-технической документации. Предел текучести при комнатной температуре превышает требуемое значение на 6%. Это может потребовать дополнительной корректировки процесса изготовления и применения термообработки для достижения нужных характеристик. По остальным параметрам образцы соответствуют всем требованиям к механическим свойствам. Также образцы обладают высокой стойкостью к межкристаллитной коррозии, а степень загрязнённости неметаллическими включениями характеризуется как низкая, что также свидетельствует о высоком качестве металла. Содержание ферритной фазы в образцах составляет 5% и соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Проведённый контроль геометрических параметров отводов показал, что среднее отклонение размеров составляет до -0,3 мм. При этом все ответственные размеры соответствуют конструкторским требованиям. После проведённой постобработки на поверхности изделия не обнаружено дефектов в виде сколов, трещин, пор, несплавлений, а также инородных металлических и неметаллических включений. Качество и шероховатость поверхности соответствуют установленным требованиям.

Результаты проведенного исследования могут послужить основой для развития и оптимизации технологии ПЛВ при производстве отводов. Данная технология обладает потенциалом стать перспективной альтернативой традиционным методам благодаря способности быстро создавать детали сложной формы, которые соответствуют физико-механическим

свойствам, предъявляемым ГОСТ к материалу 08X18H10T.

В дальнейшем планируется исследование влияния термообработки на свойства наплавленного металла. Следует изучить микроструктуру непосредственно на отводах, чтобы точнее определить возможные проблемы при наплавке с отклонением инструмента от вертикальной оси. Кроме того, стоит рассмотреть возможность объединения отвода с деталью, к которой он будет привариваться, и выращивать их как единое изделие. Благодаря этому можно избежать сварочной операции и механической обработки под сварку, тем самым сократив производственные затраты.

Список источников

1. Анализ разнотолщинности при штамповке отводов из нержавеющей стали 08X18H10T / Т.С. Ивлева, С.В. Мыльников, С.К. Грехов, Д.Р. Салихьянов // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: материалы IV международной молодежной научно-практической конференции, Магнитогорск, 04–07 июня 2019 года / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 64–66. EDN CFHWGA.
2. Перспективы применения аддитивных технологий в России в отраслевом ракурсе (на примере авиационной промышленности) / У. А. М. Найм, Д. Н. Ермаков, В. М. Мельников, О. Ю. Казенков // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9, № 2. С. 56–66. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-56-66. EDN KPWABK.
3. Разработка технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий атомной энергетики / В.А. Королев, А.В. Сидоров, И.Ю. Михайлов [и др.] // Перспективные материалы. 2023. № 5. С. 46–55. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-5-46-55. EDN ZBUQMN.
4. Piscopo G., Iuliano L. Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Т. 119. №. 11. С. 6893–6917.
5. Ahn D. G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art // International Journal of Precision Engi-

- neering and Manufacturing-Green Technology. 2021. Т. 8. № 2. С. 703-742.
6. Глухов В.В., Туричин Г.А. Экономическая эффективность технологии прямого лазерного выращивания в промышленности // Теоретические основы формирования промышленной политики. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015. С. 176-190. EDN VDLGFD.
7. Functional metal powders: Design, properties, applications, and prospects / Wang X. et al. // Materials Science and Engineering: B. 2022. Т. 280. С. 115708.
8. Investigation of the Influence of Direct Metal Deposition Modes on Microstructure and Formation of Defects in Samples of Heat Resistant Alloy / Balyakin A. V. et al. // Materials Research Proceedings. 2022. Т. 21.
9. Применение виброгалтовки для постобработки изделий после 3D печати / Злобин Е. П. и др. // Перспективы развития двигателестроения. 2023. С. 307-308.
10. Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления / Е. П. Злобин, А. И. Хаймович, Е. С. Гончаров, А. В. Балякин // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 6(144). С. 38-48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-38-48. EDN CTSCML.
11. Laser directed energy deposition of AISI 316L stainless steel: The effect of build direction on mechanical properties in as-built and heat-treated conditions / Pacheco J. T. et al. // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2022. Т. 4. С. 100079.
12. Возможности технологий 3D-сканирования при ремонте сельскохозяйственной и лесохозяйственной техники / И.Г. Голубев, В.В. Быков, М.И. Голубев, И.А. Спицын // Технический сервис машин. 2020. № 2(139). С. 21-28. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-21-28. EDN JPUFDJ.
13. Влияние осцилляции лазерного излучения на качество поверхности изделий при прямом лазерном выращивании / А.М. Вильданов, К.Д. Бабкин, Е.В. Земляков, М.О. Гущина // Фотоника. 2019. Т. 13, № 6. С. 518-523. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.518.523. EDN ADQOQG.
1. Ivleva T.S., Mylnikov S.V., Grekhov S.K., Salihyanov D.R. Analysis of the thickness difference during stamping of 08Cr18Ni10T stainless steel branch tubes. *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: Materialy IV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Magnitogorsk Rolling Practice 2019. Proceedings of the IV International Youth Scientific and Practical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, pp. 64-66. EDN CFHWGA. (In Russ.)
2. Naym U.A.M., Ermakov D.N., Melnikov V.M., Kazenkov O.Yu. Prospects for the application of additive technologies in Russia from an industry perspective (using the example of the aviation industry). [Computational Nanotechnology], 2022;9(2):56-66. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-56-66. EDN KPWABK. (In Russ.)
3. Korolev V.A., Sidorov A.V., Mihailov I.Yu., et al. Development of technology for direct energy deposition of large-sized nuclear power products. *Perspektivnye Materialy* [Promising materials], 2023;(5):46-55. DOI 10.30791/1028-978X-2023-5-46-55. EDN ZBUQMN. (In Russ.)
4. Piscopo G., Iuliano L. Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119(11):6893-6917.
5. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2021;8(2):703-742.
6. Glukhov V.V., Turichin G.A. Economic efficiency of direct energy deposition technology in industry. *Teoreticheskie osnovy formirovaniya promyshlennoy politiki* [Theoretical foundations of industrial policy formation]. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015, pp. 176-190. EDN VDLGFD. (In Russ.)
7. Wang X., et al. Functional metal powders: Design, properties, applications, and prospects. *Materials Science and Engineering: B*. 2022;280:115708.
8. Balyakin A.V., et al. Investigation of the Influence of Direct Metal Deposition Modes on Microstructure and Formation of Defects in Samples of Heat Resistant Alloy. *Materials Research Proceedings*. 2022;21.
9. Zlobin E.P., et al. The use of vibratory finishing for post-processing of products after 3D printing. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya* [Prospects of engine building development], 2023:307-308. (In Russ.)
10. Zlobin E.P., Haimovich A.I., Goncharov E.S., Balyakin A.V. Influence of technological parameters of vibration treatment on the quality of products manufactured using selective laser fusion technology. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science intensive technologies in mechanical engineering], 2023;(6(144)):38-48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-38-48. EDN CTSCML. (In Russ.)
11. Pacheco J.T., et al. Laser directed energy deposition of AISI 316L stainless steel: The effect of build direction on mechanical properties in as-built and heat-treated conditions. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022;4:100079.
12. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I., Spitsyn I.A. The possibilities of 3D scanning technologies in the repair of agricultural and forestry machinery. *Tekhnicheskij servis mashin* [Technical service of cars], 2020;(2(139)):21-28. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-21-28. EDN JPUFDJ. (In Russ.)
13. Vildanov A.M., Babkin K.D., Zemlyakov E.V., Gushchina M.O. The effect of laser radiation oscillation on the surface quality of products during direct energy deposition. *Fotonika* [Photonics Russia], 2019;13(6):518-523. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.518.523. EDN ADQOQG. (In Russ.)

References

Поступила 25.02.2025; принята к публикации 30.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 25/02/2025; revised 30/03/2025; published 30/09/2025

Злобин Евгений Петрович – аспирант,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: ep.smr@mail.ru. ORCID 0000-0001-8419-7653

Балякин Андрей Владимирович – старший преподаватель,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: a_balik@mail.ru. ORCID 0000-0002-1558-1034

Хаймович Александр Исаакович – доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой технологии производства двигателей,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: berill_samara@bk.ru. ORCID 0000-0002-9935-5703

Котов Кирилл Андреевич – магистрант,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: aspire-7738@mail.ru. ORCID 0009-0007-7957-2894

Кретов Кирилл Сергеевич – магистрант,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.

Email: kretov2002@yandex.ru. ORCID 0009-0000-1411-8171

Платонов Михаил Сергеевич – магистрант,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.

Email: platonovmichael.s@gmail.com. ORCID 0009-0002-7588-5782

Evgeniy P. Zlobin – Postgraduate Student,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: ep.smr@mail.ru. ORCID 0000-0001-8419-7653

Andrey V. Balyakin – Senior Lecturer,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: a_balik@mail.ru. ORCID 0000-0002-1558-1034

Alexander I. Khaimovich – DrSc(Eng.), Associate Professor,

Head of the Department of Engine Manufacturing Technology,

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: berill_samara@bk.ru. ORCID 0000-0002-9935-5703

Kirill A. Kotov – Master's Student,

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Email: aspire-7738@mail.ru. ORCID 0009-0007-7957-2894

Kirill S. Kretov – Master's Student,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: kretov2002@yandex.ru. ORCID 0009-0000-1411-8171

Michael S. Platonov – Master's Student,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: platonovmichael.s@gmail.com. ORCID 0009-0002-7588-5782