

УДК 629.12

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
УЗЛА УПЛОТНЕНИЯ ДЕЙДВУДНОГО УСТРОЙСТВА**

**Елисеева Ольга Владимировна,**  
старший преподаватель кафедры  
«Кораблестроение» o.eliseeva@narfu.ru

**Беляев Никита Дмитриевич**  
магистрант 2 курса факультета «Кораблестроение»  
belyaev.n.d@edu.narfu.ru  
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»  
Россия, г. Северодвинск

**Аннотация**

Настоящая статья посвящена обзору технологии прямого лазерного выращивания изделий в сфере судостроения на примере узла уплотнения дейдвудного устройства. Проведен анализ положительных и отрицательных сторон примененной технологии на фоне традиционных методов получения изделий, а также приведены пути повышения эффективности работ на этапах проектирования и изготовления.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, режимы лазерного выращивания, дейдвудное устройство, оптимизация, технологический процесс.

**TECHNOLOGY OF DIRECT LASER GROWTH OF ELEMENTS OF SEAL  
ASSEMBLY OF STERIOD DEVICE**

**Olga V. Eliseeva**  
senior lecturer of the department  
"Shipbuilding"  
o.eliseeva@narfu.ru

**Nikita D. Belyaev**  
Master of the 1st year of the faculty "Shipbuilding"  
belyaev.n.d@edu.narfu.ru  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov»

**ABSTRACT**

This article is devoted to a review of the technology of direct laser growth of products in the field of shipbuilding on the example of the sealing unit of a stern tube device. The analysis of the positive and negative aspects of the applied technology against the background of traditional

methods of obtaining products is carried out, as well as ways to improve the efficiency of work at the stages of design and manufacture.

---

**Keywords:** additive technologies, direct laser growth, laser growth modes, stern tube device, optimization, technological process.

---

Современные технологии находят свое применение во многих направлениях промышленности, замещая собой многие закоренелые процессы изготовления различных изделий. Особенный вкладом является возможность замены импортной продукции отечественной за счёт 3D печати необходимых комплектующих и компонентов. Одним из наиболее перспективных способов такого получения изделий является аддитивное прямое лазерное выращивание.

Аддитивная технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ) относится по ГОСТ 57558–2017, к типу процесса с прямым подводом энергии [3]. Особой его отличительной чертой является наибольшая производительность и экономичность в получении готового изделия. Прямое лазерное выращивание позволяет получать готовые изделия путем построения цифровой модели с помощью средств САПР и воплощением этой модели в материал методом послойного сплавления металлического порошка, подаваемого сжатой газопорошковой струёй.

Возможность применения данной технологий присутствует и в судостроительной отрасли, особенно это касается изделий, требующих перечня процессов литьё и механическая обработка, где в отходы может уходить до 60% материала. Для получения “выгодного” изделия необходимо предусмотреть его форму, размер, материал и сопоставить с возможностями используемой установки лазерного выращивания. Наибольшая эффективность достигается при выращивании сложных элементов деталей на имеющейся заготовке, которая служит основанием и механически обрабатывается вместе с наплавленным металлом в готовое изделие. Таким образом сокращаются расходы на работу установки, сопутствующие расходные материалы и металл уходящий в стружку при механической обработке. Стоит учитывать, что изначальная толщина заготовки должна быть достаточна для сохранения своей формы при воздействии напряжений, обусловленных термическим воздействием лазерного излучения.

Серьёзным ограничением является неоднородная структура металла, получаемая в результате применения данной технологии, которая непосредственно оказывает влияние на качество итоговой продукции, понижает её механические, антикоррозионные свойства. Основными факторами, оказывающими влияние на полученную структуру, являются правильность настройки режимов работы установки, качество металлического порошка и технология выполнения работ. В данной работе разберём технологию работы установки ПЛВ и совокупность сопутствующих процессов при изготовлении изделия судостроения.

Технология изготовления элементов узла дейдвудного устройства с применением метода ПЛВ.

Назначение дейдвудного устройства состоит в том, чтобы обеспечить необходимую водонепроницаемость корпуса судна, а гребному валу — одну или две опоры, воспринимать статические нагрузки от веса вала и винта и динамические от работы гребного винта в условиях различного погружения. Узел уплотнения дейдвудного устройства состоит из деталей кольцевидной формы с выступающими уплотнительными полями, уступами формы, сложным рельефом поверхностей для обеспечения замкнутого

непроницаемого контура (рис.1). Выполнены металлические элементы узла уплотнения из нержавеющей стали марки 08Х18Н10Т.

Рассмотрим ход изготовления опорного кольца узла уплотнения дейдвудного устройства с применением метода прямого лазерного выращивания.

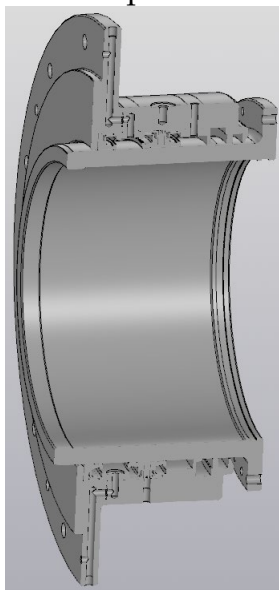


Рисунок 1 – Узел уплотнения дейдвудного устройства (выполнен авторами)

Формирование изделия начинается с выбора наиболее объемного и простого в исполнении участка, которое выполняется путем механической обработки из проката и применяется в качестве основания. Припуск на основание назначается исходя из возможных деформаций заготовки и включает слой металла, снимаемый с заготовки для обеспечения заданной шероховатости, обычно он составляет от 2–5 мм на сторону.

Начало работы с аддитивной установкой включает создание управляющей программы. Происходит загрузка 3-мерной модели необходимого изделия в рабочую среду используемого ПО, где происходит её позиционирование, разбивка на слои и назначение траектории перемещения лазерной головки - треков (рис.2). Количество треков варьируется в зависимости от толщины стенки изделия, траектория зависит от формы изделия и рациональности наложения валиков. Треки разделяются на валики “массива” и “контура”. Валики “массива” заполняют внутреннее пространство изделия, а валики “контура” являются крайними и описывают габарит изделия. Валики “контура” выполняются на пониженных скоростях для формирования внешней кромки и препятствования растеканию валиков массива за границу изделия [2].

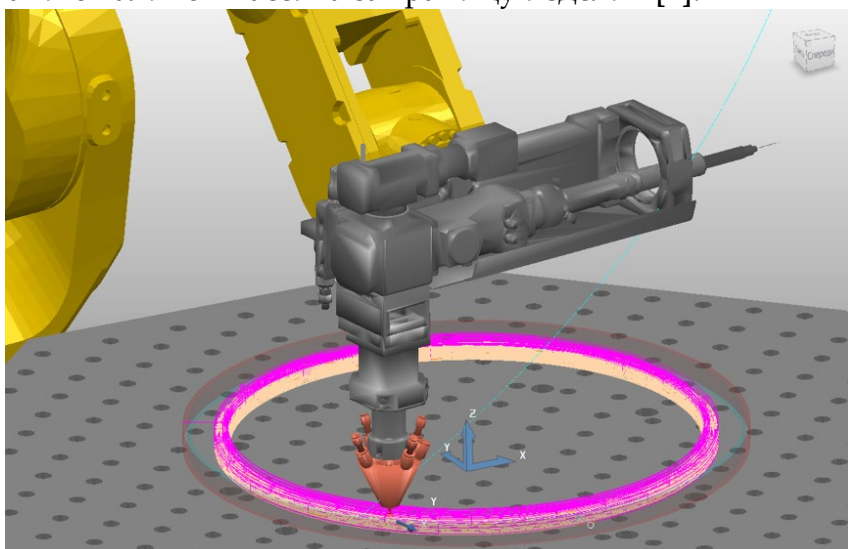
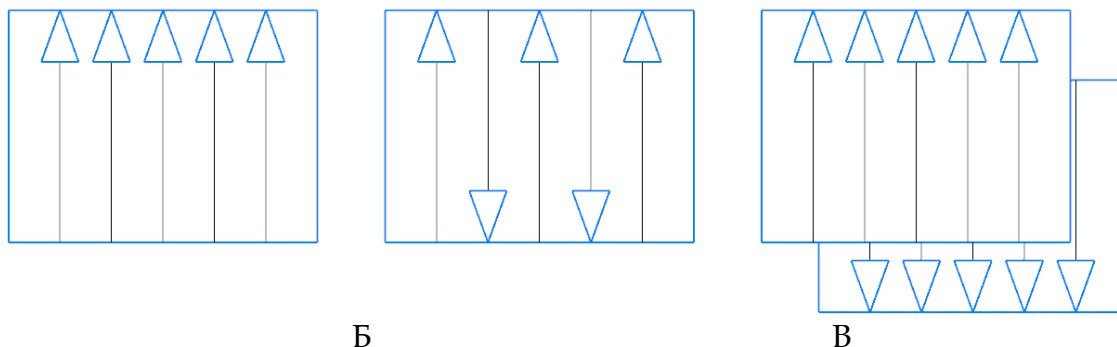


Рисунок 2 – Разбивка на слои (выполнен авторами)

Наложение валиков каждого слоя можно выполнять тремя способами “однонаправленный” (рис.3, А), “зигзагообразный” (рис.3, Б) и “перекрестная штриховка” (рис.3, В). Наиболее перспективным способом считается “перекрестная штриховка”, т. к. ввод лазерной энергии получается более сбалансированным во всех слоях, что эффективно предотвращает накопление и распространение дефектов. Данный способ для изделия кольцевой формы является оптимальным.



А

Б

В

Рисунок 3 – Способы наложения валиков (выполнен авторами)

После построения управляющей программы начинается процесс наладки. Выполняется в первую очередь он в ПО с помощью проверки траектории движения рабочего инструмента, а затем отработки режимов в металле с последующей корректировкой управляющей программы при необходимости.

В подготовительный этап работы установки ПЛВ входят:

- Просушка порошков в сушильных шкафах при температуре 130 до 150 оС в течение 2-3 часов;

- Настройка рабочего инструмента лазера на точность положения точки фокуса относительно заданного программой и проверка соосности схождения оси лазерного луча и точки схождения газопорошковой струи.

Последовательность работы с установкой при выращивании детали:

засыпать порошок в колбы питателя.

жестко зафиксировать основу.

очистить поверхность основы от грязи и масла путем применения ветоши и технического ацетона по ГОСТ 2768. Временной интервал с момента обработки до процесса лазерного выращивания не должен превышать 1 ч.

установить необходимые параметры режима.

проверить подачу присадочного порошка и газов.

загрузить управляющую программу.

нажатием кнопки на стойке управления запустить рабочую программу.

после окончания процесса выращивания изделие на подложке выдерживается в рабочей камере до достижения температуры ниже 80 °С и извлекается. Измерение температуры производится при помощи пирометра.

после процесса выращивания, полученное изделие подлежит контролю.

Порошок, оставшийся в технологических плангах и сопле, продувается сжатым воздухом.

Перед началом работ на установке ПЛВ основа подогревается до температуры 100–150 оС.

На всех этапах выращивания контролем соблюдения заданной программы занимается оператор установки для своевременного устранения ошибок управляющей программы.

Следующим этапом при изготовлении изделия является термическая обработка. Сталь марки 08X18H10T склонна к межкристаллитной коррозии. Наиболее эффективным методом борьбы с ней является отжиг при температуре 850–950 °С в течение 2-3 часов с последующим остыванием на воздухе или закалка с нагревом до температуры 1000-1100 °С с последующим быстрым охлаждением. В обоих случаях термообработка направлена на растворение карбида хрома, находящегося по краям зёрен металла и снижающего пластичность и прочность сплава [4].

По окончании вышеперечисленных процедур проводится окончательная станочная механическая обработка в размеры чертежа с необходимой шероховатостью для плотного примыкания кольца к армированной манжете.

На рисунке 4 показан внешний вид заготовки на всех перечисленных этапах.

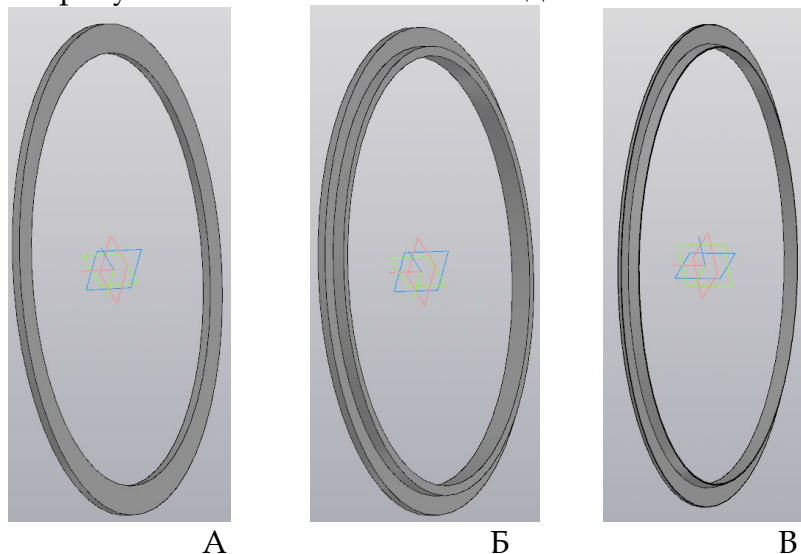


Рисунок 4 - Этапы изготовления опорного кольца (выполнен авторами)

А - заготовка (основание); Б - заготовка после лазерного выращивания; В - заготовка после окончательной механической обработки

#### Режимы прямого лазерного выращивания

Регулировка режима процесса прямого лазерного выращивания осуществляется благодаря изменению следующих параметров:

- мощность лазерного излучения ( $P$ , Вт);
- скорость перемещения инструмента ( $V$ , мм/сек);
- расход металлического порошка ( $R$ , г/мин);
- диаметр пятна ( $D$ , мм).

Увеличения ширины и высоты наплавленного валика обеспечивается путем снижения скорости процесса прямого лазерного выращивания с одновременным увлечением мощности лазерного излучения, диаметра пятна и расхода порошка. При этом ванна жидкого металла увеличивается в размерах, что приводит к росту коэффициента захвата порошка (эффективности использования порошка) [5].

Для защиты наплавляемого металла рабочая камера установки заполняется инертным газом аргоном высшего сорта (ГОСТ 10157–2016) до избыточного давления 5 мбар. Подача порошка в зону расплава также осуществляется струей аргона.

Оптимальные режимы работы установки приведены в таблице 1 с производительностью 0,97 кг/час (16,2 г/мин). Диаметр лазерного пятна при приведенных режимах - 2 мм.

Таблица 1 - Режимы работы установки

H, мм	P, Вт	V, мм/сек	R <sub>г</sub> , мм/мин	Ar <sub>защ</sub> , л/мин	Ar <sub>под</sub> , л/мин	B, мм	h, мм
193	2200	25	16,2	30	7	2,2	0,6

H – расстояние от среза лазерной головки до поверхности изделия;

Ar<sub>защ</sub> – расход защитного аргона;

Ar<sub>под</sub> – расход подающего аргона;

B – ширина наплавляемого валика;

h – высота наплавляемого валика.

Коэффициент захвата порошка на данном режиме ~85-90%.

Стоит заметить, что в таблице 1 приведены оптимальные усреднённые режимы для работы установки, т. к. в зависимости от формы и размеров конструкции режимы могут варьироваться на каждом накладываемом слое. К примеру, первые слои, наносимые на основание или подложку выполняются при повышенной мощности лазерного излучения для лучшего сплавления порошка с основным металлом. Последующие же напротив могут выполняться на пониженных режимах или с перерывами для остывания заготовки.

Параметры производительного режима прямого лазерного выращивания были проверены с применением порошка марки 08X18H10T с фракционным составом 40–200 мкм и сферической формой частиц с коэффициентом сферичности 1,0–1,2.

Согласно испытаниям, проведенным СПбГМТУ и отраженным в отчёте НОЦ мирового уровня «Российская арктика: Новые материалы, технологии и методы исследования», для оптимального перекрытия валиков при выращивании смещение головки лазера на каждый проход должно составлять 1,6 мм. В процессе ряда натуральных экспериментов было продемонстрировано, что при уменьшении расстояния смещения прохода до 1,4 мм толщина слоя возрастает вместе с количеством пор в наплавленном металле, а в случае увеличения смещения прохода до 1,6–2,1 мм появляются межваликовые западания, которые при наложении следующих слоев, образуют несплавления. [1, с. 49–52]

#### Дефекты в структуре наплавленного металла

Металл, наплавляемый лазерным излучением, претерпевает резкое изменение температур, т. к. основной металл нагревается точечно до температур плавления и не успевает прогреваться полностью. Скорости охлаждения при этом могут составлять до нескольких тысяч градусов в секунду. Это ведет к появлению таких дефектов как поры. Газ, присутствующий между частицами порошка, может раствориться в ванне с расплавом. Из-за высокой скорости охлаждения во время процесса затвердевания растворенный газ не может выйти с поверхности ванны расплава до того, как произойдет затвердевание. Размер пористости обычно невелик и имеет приблизительно сферическую форму, за исключением случаев не сплавления порошка. Сферические пористости случайным образом распределены в детали и их трудно полностью устранить.

Также из-за большого температурного градиента возникает остаточное тепловое напряжение в изготовленной детали. Высокий температурный градиент в сочетании с большим остаточным напряжением часто вызывает возникновение и распространение трещин в изготовленной детали. Касаемо нержавеющей сталей, из-за низкой теплопроводности и высокого коэффициента теплового расширения они более расположены к образованию трещин. Решением данной проблемы является предварительный подогрев основы или подложки и повышение температуры окружающей среды.

В случае недостаточного подвода энергии во время процесса ПЛВ возможно возникновение таких дефектов как отсутствие плавления. Образуются такие дефекты в результате того, что металлические порошки не полностью расплавлены для нанесения нового слоя на предыдущий слой с достаточным перекрытием. Недостаточное перекрытие

является причиной образования не плавленных порошков между дорожками сканирования. В процессе нанесения нового слоя становится трудно полностью переплавить эти порошки. Как следствие, образуются неполные отверстия для плавления, которые остаются в детали.

В результате образования дефектов поверхность металла становится шероховатой, что ведет к худшему растеканию последующих валиков расплавленного металла и образованию межслойных дефектов. К тому же залегающие в металле дефекты имеют свойство подниматься в верхние слои металла при наложении слоёв.

Величина полученных дефектов напрямую зависит от соблюдения технологических требований и качества применяемых материалов.

### **Заключение**

В рамках приведенной работы были отражены особенности работы с установкой ПЛВ. В особенности стоит отметить технические ограничения в получении необходимой шероховатости поверхности, необходимости восстановления структуры металла методом термообработки и потери времени и ресурсов на отладку управляющей программы. В противопоставление перечисленным недостаткам имеются значительные положительные стороны:

- меньшее количество металла уходит в стружку, в сравнении с изготовлением изделия из проката методом механической обработки;
- универсальность применения позволяет использовать установку для изготовления почти любых деталей сложной геометрической формы;
- автономность работы установки при настроенных режимах и отрегулированной управляющей программе даёт возможность получать изделия с гарантированным качеством;
- возможность применения конвейерного изготовления;
- сокращение сроков подготовки производства за счёт отсутствия необходимости закупки и ожидания поставки большого объема проката;
- возможность изготовления импортных комплектующих.

Наибольшая проблема заключается в сертификации полученной продукции. Для применения изделия полученного путем ПЛВ на данный момент необходимо подвергать перечню испытаний каждое изделие, полученное методом ПЛВ. Особенно это касается ответственных изделий поднадзорных органам РМРС, РКО, Ростехнадзор и т. д. Тем не менее способ ПЛВ обладает высокими темпами развития качество выпускаемой продукции уже во многих аспектах превосходит литье. Многие загвоздки кроются в экономической целесообразности его применения при уже имеющихся отработанных традиционных технологиях.

### **Список литературы:**

1. Румянцева Е. Е. Экологическая безопасность строительных материалов конструкций и изделий. – М.: Университетская книга, 2005. – 200 с.
2. Г. А. Гордеев, М.Д. Кривилев, В. Е. Анкудинов. Компьютерное моделирование селективного лазерного плавления высокодисперсных металлических порошков // Вычислительная механика сплошных сред, 2017. №3. С. 293–312



3. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. / Г. А. Абильситов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь и др. / Под общ. ред. Г. А. Абильситова. – М.: 41 Машиностроение, 1991. – Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация, 1991. – 432 с.
4. Anandan S., Pityana L., Majumdar J. D. Structure property correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC + Ni + NiCr // Ibid. – 2012. – Vol. 536. – P. 159-169.
5. Жирнов И.В. Информационно-измерительная система для контроля геометрических параметров зоны селективного лазерного плавления на основе морфологической обработки термоизображений. дис. ... канд. тех. наук, М., 2016. – 213 с.

**References:**

1. Rumyantseva E.E. Environmental safety of building materials, structures and products. - М.: University book, 2005. - 200 p.
2. G.A. Gordeev, M.D. Krivilev, V.E. Ankudinov. Computer simulation of selective laser melting of highly dispersed metal powders // Computational Continuum Mechanics, 2017. No. 3. pp. 293 – 312
3. Technological lasers: Handbook: In 2 volumes / G. A. Abilsitov, V. S. Golubev, V. G. Gontar et al. / Ed. ed. G. A. Abilsitova. - М.: 41 Mashinostroenie, 1991. - Т. 1. Calculation, design and operation, 1991. - 432 p.
4. Anandan S., Pityana L., Majumdar J. D. Structure property correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC + Ni + NiCr // Ibid. - 2012. - Vol. 536. – P. 159-169.
5. Zhirnov I.V. Information-measuring system for controlling the geometric parameters of the selective laser melting zone based on morphological processing of thermal images. dis. ... cand. those. Sciences, М., 2016. - 213 p.