

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЛИАЛ БНТУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ, ПЛАЗМЕННЫХ  
И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Сборник материалов семинара

*(Минск, 18 октября 2019 г.)*

Минск  
БНТУ  
2019

УДК 621.791  
ББК 34.58

В сборнике содержатся материалы семинара «Применение плазменных, лазерных и аддитивных технологий в промышленности», который проводится Белорусским национальным техническим университетом совместно с Министерством промышленности Республики Беларусь. Семинар посвящен ознакомлению технологов предприятий с примерами практического использования новейших достижений в области плазменных, лазерных и аддитивных технологий на машиностроительных предприятиях и предприятиях ВПК. Приведенные материалы могут быть полезны для инженерно-технических работников и научных сотрудников предприятий и организаций Республики Беларусь.

**УДК 621.791**  
**ББК 34.58**

**ISBN 978-985-583-458-9**

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Трехмерный принтер для производства песчаных литейных форм</b> <i>ООО «Аддитивные технологии», Санкт Петербург.....</i>	4
<b>Интегрированное аддитивное производство</b> <i>Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск .....</i>	9
<b>Разработки ООО «Лаборатория Аддитивных Технологий» (Беларусь) и «МерФотоникс» (Франция) в области селективного лазерного спекания/плавления</b> <i>ООО «Лаборатория аддитивных технологий», Минск.....</i>	15
<b>Прямое лазерное выращивание: технология, оборудование и примеры использования</b> <i>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Институт лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ СПбГМТУ), Санкт-Петербург.....</i>	23
<b>Технологии аддитивного производства в машиностроении</b> <i>ООО «Оерликон Рус», Москва .....</i>	24
<b>Технологии газотермического восстановления и упрочнения деталей</b> <i>ОНИЛ Плазменных и Лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск .....</i>	27
<b>Технологии лазерного упрочнения деталей</b> <i>ОНИЛ Плазменных и Лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск .....</i>	29
<b>Технология лазерной сварки</b> <i>ОНИЛ Плазменных и Лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск .....</i>	30

## ООО «АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Адрес: 195197, Санкт-Петербург,  
Полюстровский пр. 14А  
www.add-technology.com

Генеральный директор –  
Бычковский Денис Николаевич  
Denis.bychkovskii@yandex.ru  
Тел. +7 (921) 998 95 91

### ТРЕХМЕРНЫЙ ПРИНТЕР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕСЧАНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

#### **Проблема и решение:**

В настоящее время производство сложных габаритных высокотехнологичных отливок, таких как блок цилиндров и головка блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания для судостроения, автомобилестроения, тепловозостроения и т.д., на предприятиях России осуществляется по традиционной технологии, которая реализуется либо с помощью литья в разовые формы, созданные вручную по физическим мастер-моделям, что требует длинной технологической цепочки изготовления мастер-модели, подготовки смеси, формовке частей формы, их сушки, места для хранения моделей и т.д., либо литья в кокиль (металлическую форму), что является очень долгим (от 6 месяцев до 1-2 лет), затратным, трудоемким и экономически невыгодным способом, сопряженным с высоким риском брака при изготовлении кокиля. Обе технологии имеют технологические ограничения на сложность внутренней конфигурации отливки. Используя традиционные технологии невозможно или крайне сложно выполнить сложные каналы охлаждения, оптимизировать конструкцию и снизить припуск на последующую обработку, что ограничивает потенциал разработки продукции. Перечисленные проблемы затрудняют выпуск новых моделей и новых видов продукции, увеличивают сроки выхода новинок на рынок и стоимость запуска в производство, что негативно сказывается на конкурентоспособности продукции. Проблемы с невозможностью реализации традиционными технологиями наилучших расчетных конфигураций конструкции ведет к снижению эксплуатационных характеристик продукции.

#### **Решение:**

Для преодоления технологических ограничений и ускорения сроков проектирования и производства в последнее время мировыми лидерами машиностроения активно применяются аддитивные технологии. Создание литейных форм с использованием методов послойного синтеза позволяет обойти технологические ограничения традиционных технологий и сократить технологическую цепочку, отказавшись от следующих операций: изготовления мастер-модели из металла или композитных материалов, изготовление

литниковой системы и прибылей, формовка частей формы (установка мастер модели и литниковой системы в опоку и засыпка смесью). Это приводит к сокращению времени производства и снижению стоимости формы на порядок.

Принтеры, производимые нашей компанией, предназначены для создания литейных форм методом послойной печати. По сравнению с традиционной технологией их использование позволяет сократить время и стоимость процесса в несколько раз и открывает возможности производства деталей любой степени сложности. По техническим характеристикам не уступают импортным аналогам (VoxelJet и ExOne), а по некоторым превосходят. Обладают в несколько раз меньшей стоимостью по сравнению с импортными аналогами.

#### **Продукты компании:**

- 1.Трехмерные принтеры для создания песчано-полимерных литейных форм.
- 2.Песчано-полимерные формы по заказам литейных производств и центров прототипирования.

#### **Рынок:**

По данным на 2018 год, в России существует литейных 1250 предприятий. Основное количество (78%) составляют небольшие литейные цеха с объемом выпуска до 5000 тонн литья в год. Однако, уровень автоматизации литейного производства в России крайне низок: 78% отливок производятся на механизированных линиях и машинах и вручную. В связи с этим разработка автоматизированных методов создания литейных форм является одним из приоритетных направлений развития отрасли.

На основе проведенного нашей компанией маркетингового исследования ведущих предприятий, имеющих постоянную потребность в литье, можно сделать вывод, что в настоящее время многие предприятия проводят реконструкцию литейного производства на базе новых технологических процессов, материалов и перспективного оборудования. Основной целью реконструкции является расширение объемов производства, повышение качества продукции, отвечающего современным требованиям заказчика, снижение сроков производства и себестоимости продукции, а также улучшение экологической ситуации и условий труда.

С учетом активно идущих программ техперевооружения промышленных предприятий ОПК с ориентацией на отечественные технологии и сырьевую базу, предполагается высокий платежеспособный спрос. Общий объем программ техперевооружения на предприятиях ОПК превышает 1 трлн. рублей. Также предполагается наличие спроса у малых предприятий, ориентирующихся на мелкосерийное изготовление литевых изделий, и инжиниринговых компаний, занимающихся разработкой конструкции литевых изделий и литевой оснастки. Предлагаемая технология позволит им сократить издержки и сроки разработки.

Кроме непосредственных консультаций и переговоров с вышеупомянутыми предприятиями при поддержке департамента станкостроения Минпромторга России было разосланы информационные письма о производимом нашей компанией оборудовании и технологии. Более 200 российских предприятий выразили заинтересованность в применении и внедрении в производственный цикл разрабатываемой технологии, практическое применение которой позволит обойти технологические ограничения традиционных технологий и сократить технологическую цепочку, это приведет к сокращению времени производства (с 4-8 месяцев до 2-3 недель) и снижению стоимости выпуска продукции на порядок. Подобный подход осуществляет переход к цифровому производству, повышает уровень автоматизации производства и соответствует мировым тенденциям в промышленности.

Среди откликнувшихся и выразивших интерес к нашим принтерам находятся такие предприятия как: Госкорпорации «ОДК» и «ОСК», группа предприятий «Алмаз-Антей» (ГОЗ, МЗИК, НПО «Факел»), Магнитогорский металлургический комбинат (ММК), Новолипецкий металлургический комбинат (НМЛК), НМЛКПАО "Звезда", ПАО "Автодизель" (ЯМЗ), ООО «Уральский дизель-моторный завод» («УДМЗ»), ОАО "Алтайский моторный завод" (Барнаул), ООО "ВМТЗ", ОАО ХК Барнаултрансмаш, ПАО «Мотовилихинские заводы», АО "ОМСКТРАНСМАШ", ООО «Зауральский кузнечно-литейный завод», ОАО «Арзамасский машиностроительный завод», ЗАО «ЗАВОД СПЕЦИАЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ «МАЯК», АО «Машиностроительный завод им. С. М. Кирова», ОАО "Зеленодольский завод имени А.М. Горького", ООО "КЗЛЗ" (Кузнецкий завод литейных заготовок).

#### **Проведенные маркетинговые исследования позволяют сделать следующие выводы о рынке:**

- Целевой рынок России – более 1250 литейных предприятий.
- Рынок принтеров составляет не менее 30 млрд. руб.
- Рынок услуги печати форм – не менее 60 млрд. руб.

#### **Ссылки на сайт компании и видео:**

<https://www.add-technology.com>

<https://www.addtechnology.org>

<https://www.youtube.com/watch?v=nkl819bDtWc&t>

<https://www.youtube.com/watch?v=fDjePnz1AFE&t>

[https://www.youtube.com/channel/UCgiXfuKXezXqmgbV0NLUAjQ?view\\_as=subscriber](https://www.youtube.com/channel/UCgiXfuKXezXqmgbV0NLUAjQ?view_as=subscriber)

#### **Основные преимущества:**

1. Отвечающие признанным мировым стандартам установки по цене в несколько раз дешевле импортного аналога. Собственная запатентованная

технология изготовления песчано-полимерной смеси, собственный блок управления головками и механикой и собственное программное обеспечение позволяют полностью локализовать производство в России, и, как следствие, получить ценовое преимущество в несколько раз по сравнению с импортными аналогами (VoxelJet и ExOne).

2. Формы, произведенные на нашем оборудовании, отвечают всем требуемым стандартам. Мы используем российские расходные материалы (пески и химию), что позволяет в десятки раз снизить стоимость форм по сравнению с произведенными на импортном оборудовании.

### Статус:

- Полностью отработана технология печати песчаных форм для отливок различных металлов (бронза, латунь, алюминий, чугун, сталь, магний).
- Спроектирована линейка принтеров с различными зонами построения:

Параметры	AT300	AT700	AT1000/ 600	AT1000	AT2000
Зона построения	300x500x 300 мм	700x700x 450мм	1000x600x 50 мм	1000x1000x 500 мм	2000x1000x 800мм
Скорость построения по вертикали	7 см/час	7-8 см/час	7-9 см/час	7-9 см/час	4-7 см/час
Скорость построения	5000-13500 см <sup>3</sup> /ч	15000- 45000 см <sup>3</sup> /ч	21000- 65000 см <sup>3</sup> /ч	36000- 90000 см <sup>3</sup> /ч	80 000 - 140 000 см <sup>3</sup> /ч
Толщина слоя	0,2-0,5мм	0,2-0,5мм	0,2-0,5мм	0,2-0,5мм	0,2-0,5мм
Точность печати	100 мкм	100 мкм	100 мкм	100 мкм	100 мкм
Габаритные размеры (ДxШxВ)	1650x1100x 1430 мм	4400x2000x 3000 мм	5000x2000x 3000 мм	5000x2000x30 00мм	8000x5000x30 00мм
Масса	500 кг	3000 кг	3500 кг	3500 кг	6500 кг
Электропитание	220В, 50Гц, мощность max 2кВт	380В, 50Гц, мощность max 5кВт	380В, 50Гц, мощность max 5кВА	380В, 50Гц, мощность max 5кВА	380В, 50Гц, мощность max 5кВА



Рисунок 1 – Оборудование для производства песчаных литейных форм

В процессе создания установок нами разработан ряд ноу-хау. Владельцем всех прав как на разрабатываемую установку, так и на технологию (патенты) является наша компания. Интеллектуальная собственность включает в себя:

- *собственную технологию изготовления песчано-полимерной смеси;*
- *собственная конструкция блока управления головками и механикой;*
- *собственное программное обеспечение и система управления;*
- *собственная конструкция блока нанесения песка;*
- *собственный модуль подготовки песчаной смеси.*
- Построено два принтера AT300 и AT700, работу которых можно посмотреть на нашей сборочной площадке.
- Подписан контракт на производство принтера AT1000 (зона построения 1000×600×550 мм) для Магнитогорского металлургического комбината). В настоящее время идет реализация контракта.
- На нашем принтере AT700 отпечатано более 20 тонн песчаных форм для различных заказчиков.
- Проведены презентации, сделаны тестовые формы и проведены тестовые отливки для предприятий, входящих в группы Алмаз-Антей, ОДК, ОСК, ОАК, НМЛК, Северсталь и ряда других.

## ИНСТИТУТ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НАН БЕЛАРУСИ

Адрес: 220005, г. Минск,  
ул. Платонова, 41  
pmi.nil26@gmail.com

Директор – Ильющенко Александр  
Федорович  
8(017) 292-13-25  
alexil@mail.belpak.by

### ИНТЕГРИРОВАННОЕ АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

А.Ф. Ильющенко, А.И. Лецко, О.О. Кузнечик, В.С. Мачнев, А.М. Яркович

**Введение.** Считается, что появлению в США, Китае и Японии, в странах ЕС (в первую очередь Великобритании, ФРГ, Франции и Швеции), а также России, БРИКС, в странах СНГ (в первую очередь Украине и Казахстане) аддитивного производства предшествовала изобретенная Чаклом Халлом (США) в 1984 году установка лазерной стереолитографии. Коммерческое производство и распространение этих установок было начато в 1986 году компанией 3D Systems (США), одним из соучредителей которых и стал Чак Холл. Способствовало этому также развитие появившихся в конце 60-х годов прошлого столетия технологий послойного синтеза, в США, Японии, в выделенных странах ЕС, включая существовавшие на тот момент СССР, а также страны-участницы СЭВ. Итогом этого стало появление в начале текущего века, сначала в США, Великобритании, Франции и Швеции, а затем и Китае, предприятий по выпуску установок трехмерной цифровой печати полимерами (включая фотополимеры), порошками или порошковыми проволоками металлических сплавов, а также порошками, относящимися к разного вида керамики. Благодаря ASTM, эти установки со второй половины девяностых годов прошлого столетия получили общепринятое название 3D-принтеры. В зависимости от используемых исходных материалов и конструктивных особенностей, в настоящее время большинство 3D-принтеров промышленного и коммерческого назначения при осуществлении трехмерной цифровой печати (3D-печать) реализуют методы послойной избирательной (селективной) фотополимеризации в процессе осуществления лазерной стереолитографии, либо послойного селективного наложения выдавливаемых через экструдер расплавленных полимерных нитей, либо селективного лазерного сплавления, электронно-лучевого проплавления или наплавки порошков металлических сплавов, либо формованием керамических порошков с одновременным разбрызгиванием полимерного связующего. Одновременно с этим, в указанных странах возникли и начали ускоренными темпами распространяться в различных отраслях машиностроения и бытового обслуживания основанные на указанных методах аддитивные технологии и связанное с их внедрением аддитивное производство. Если в первом десятилетии текущего века аддитивное производство активно

развивалась на предприятиях здравоохранения, связанных с выпуском различного рода медицинских имплантатов и протезов, а также на предприятиях, относящиеся к ракетостроению, самолетостроению и двигателестроению, то начиная со второго десятилетия текущего века оно стало охватывать не только предприятия автомобилестроения и тракторостроения, а также связанные с ними ремонтные предприятия, но и те, которые непосредственно связаны с коммерческим обслуживанием населения.

В настоящее время аддитивное производство, активно развивается не только в странах с высоким уровнем индустриального развития, наукоемких и технологических производств, к числу таких стран, в первую очередь, относятся США, Китай, Великобритания, Германия, Франция, Швеция и Россия, но также в странах ЕС, относящихся по степени развитости промышленности и сельского хозяйства к аграрно-индустриальным, включая Индию, Иран, Украину и Бразилию. С учетом этого, для обеспечения необходимых темпов и эффективности развития в Республике Беларусь аддитивного производства, в том числе и на предприятиях автомобилестроения и тракторостроения, следует создать его интегрированный аналог в научно-практических центрах Национальной академии наук Беларуси, а также учебных, научно-методических и производственных центров технических университетов Министерства образования Республики Беларусь. Такое интегрированное аддитивное производство позволит, не только сокращать время и затраты на разработку и внедрение перспективных отечественных моделей 3D-принтеров, расходным материалов к ним к другим, выпускаемым сегодня в мире, включая аддитивные технологии, но и готовить научные и инженерные кадры, которые способны понять основные преимущества проектирования перспективных материалов и изделий, востребованных промышленностью Республики Беларусь и, которые могут быть получены только на аддитивном производстве.

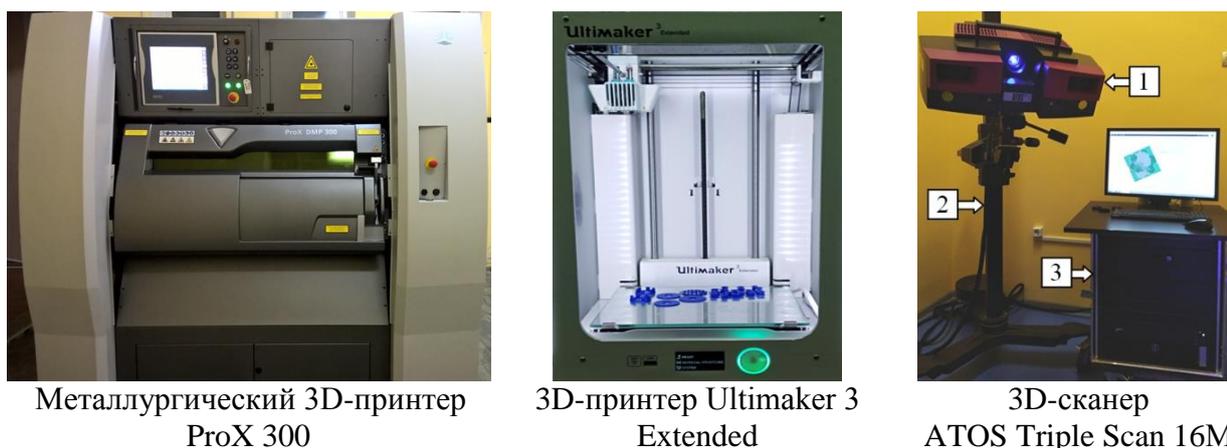
### **Обоснование структуры интегрированного аддитивного производства.**

Учитывая, что развитие трехмерной цифровой печати началось с практической реализации методов послойной селективной фотополимеризации в процессах осуществления лазерной стереолитографии или послойного селективного наложения выдавливаемых через экструдер расплавленных полимерных нитей, в научно-практических центрах стали ее стали использовать для быстрого прототипирования макетов машин и двигателей, а также различных элементов несущих конструкций, узлов и агрегатов будущих машин. Затем, по мере совершенствования метода селективного лазерного сплавления порошков металлических сплавов, 3D-печать стала использоваться на опытно-экспериментальных предприятиях для изготовления и испытаний опытных образцов различных несущих конструкций, а также деталей будущих машин и механизмов. При этом также на опытно-экспериментальных предприятиях машиностроения стали использовать 3D-печать, как полимерами и порошками

металлических сплавов, так и порошками из керамики для получения перспективных образцов формообразующего инструмента, к числу которого относят, например, штампы и литьевые формы со сложной геометрией внутренних поверхностей. При этом следует отметить, что если для обеспечения возможности установки и работы на относительно небольших по габаритам 3D-принтерах, использующих при 3D-печати полимерную нить или жидкий фотополимер, можно организовать специализированное рабочее место, то для установки и работы пусть даже и относительно небольших по габаритам 3D-принтеров, использующих в качестве расходного материала либо порошки или порошковые проволоки металлических сплавов, либо порошки из керамики, требуется организация специализированного участка. В состав этого участка должны входить не только рабочее место с 3D-принтером, но также рабочие места по подготовке пневмосистемы подачи сжатого воздуха и защитного газа, по подготовке к использованию самих расходных материалов. Кроме этого, также необходимо организовывать рабочие места с оборудованием, например, для водно-эмульсионного, химического или механического отделения от платформы построения 3D-принтера с последующей термической обработкой получаемых после 3D-печати изделий.

Отметим, что в конструктивном отношении 3D-принтеры являются разновидностью станков с числовым программным управлением. Поэтому, для обеспечения возможности послойного получения на имеющейся у них платформе построения изделий заданной формы, размеров и внутренней структуры, необходимо использовать соответствующее программное обеспечение. Особенностью такого программного обеспечения является то, что в его состав, кроме встроенной и адаптированной для работы на том или ином 3D-принтере операционной системы, драйверов и утилитов, включая диалоговую оболочку, устанавливающую связь оператора с исполнительными механизмами и режимами работы такого печатающего устройства, должны также входить программы, содержащие цифровые модели требуемых изделий, а также программы по их установке на платформу построения и закрепления на ней с помощью поддержек, с последующим виртуальным разбиением на слои построения заданной толщины. Для обеспечения возможности разработки и корректировки таких программ, включая программы-симуляторы процессов 3D-печати, механического отделения от платформы построения получаемых изделий с последующей термообработкой, необходимо создавать соответствующий информационно-технологический участок. Его основным предназначением следует считать – подготовку, корректировку, сопровождение в аддитивном производстве и хранение цифровых трехмерных моделей изделий, получаемых трехмерной цифровой печатью. Учитывая, что получаемые таким образом изделия могут иметь сложную форму и геометрию поверхности, контроль на соответствие точности параметров, характеризующих это, по отклонению получаемых значений от требуемых, может быть сложно

выполнимой задачей. Решению этой задачи может способствовать создание рабочего места или участка технического зрения, на котором имеется 3D-сканер. Возможность оперативного взаимодействия между собой задействованного работающего цифрового оборудования, вышеперечисленных производственных участков и рабочих местах цифрового оборудования, включая синхронизацию и наладки при подготовке к работе этого оборудования, может обеспечить наличие удаленного доступа к ним через локальные, а при необходимости местные региональные сети интернета. Для реализации такой возможности, на интегрированном аддитивном производстве должно быть хотя бы одно рабочее место системного администратора. Наличие удаленного доступа к цифровому оборудованию позволит при необходимости создавать гибкое интегрированное аддитивное производство на постоянной или временной основе с варьируемым переменным составом производственных участков и рабочих мест, которые к тому же могут находиться в различных населенных пунктах. В состав такого интегрированного аддитивного производства могут быть, например, включены участки металлургической 3D-печати, быстрого прототипирования и 3D-сканирования Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа. Внешний вид основного технологического оборудования представлены на рисунке 1, а его характеристики – в таблицах 1–2.



Металлургический 3D-принтер ProX 300

3D-принтер Ultimaker 3 Extended

3D-сканер ATOS Triple Scan 16M

Рисунок 1 – Оборудование для интегрированного аддитивного производства  
1 – оптический детектор; 2 – поворотная стойка; 3 – автоматизированное рабочее место

Таблица 1 – Характеристики металлургического 3D-принтера ProX300

Показатели	Значения
Метод 3D-печати	Прямое селективное лазерное сплавление частиц порошков металлических сплавов
Предельные размеры рабочей зоны 3D-печати	250×250×300 мм
Расходный материал	Порошки металлических сплавов со сферическими частицами не более 100 мкм

Таблица 2 – Характеристики 3D-принтера Ultimaker 3 Extended

Характеристики	Показатели
Метод 3D-печати	Послойное нанесение расплавленной выдавливаемой из экструдера полимерной нити
Предельные размеры рабочей зоны 3D-печати	215 x 215 x 315 мм
Расходные материалы	ABS, PLA, PVA, HIPS, ВАТСОН, Нейлон, ПОЛИКАРБОНАТ

Использование 3D-сканера позволяет не только контролировать размеры получаемых 3D-печатью изделий, но решать задачи обратного инжиниринга.

Примеры возможных вариантов экспериментальных образцов изделий, полученных на металлургическом 3D-принтере ProX300, которые могут быть использованы для разработки востребованных в машиностроении деталей, представлены на рисунке 5.

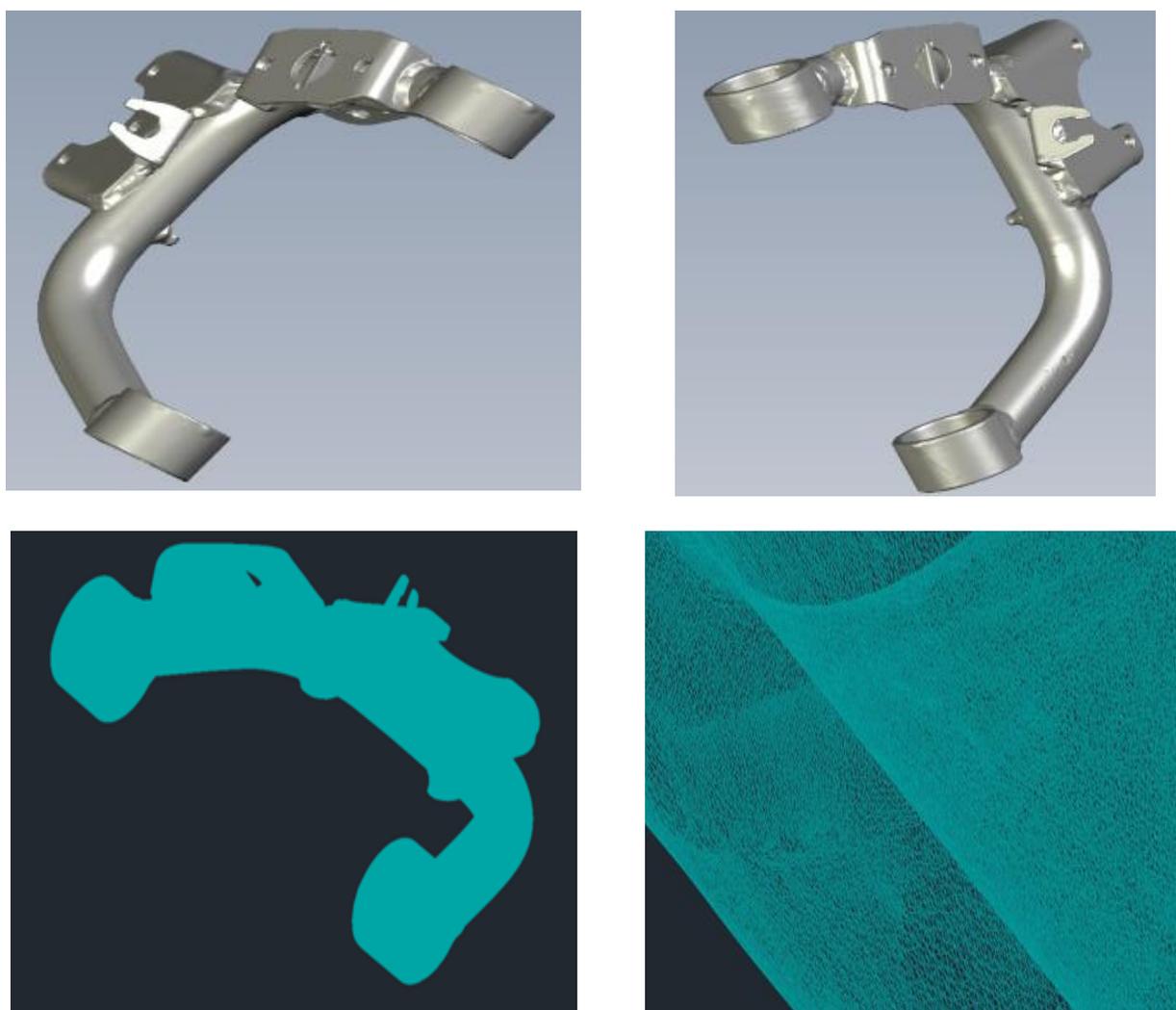


Рисунок 2 – Рычаги подвесок и их полигональные оболочки после 3D-сканирования

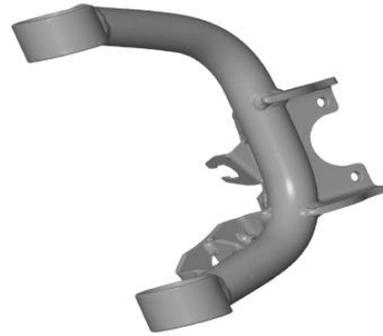
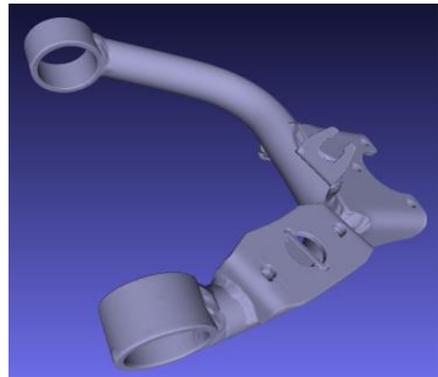
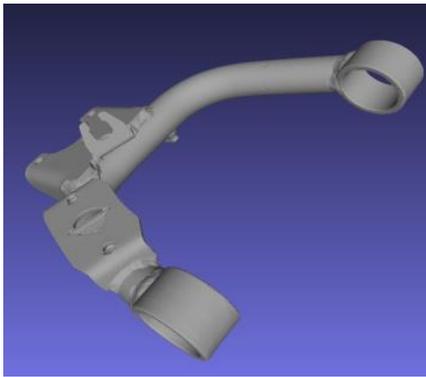


Рисунок 3 – 3D-модели рычагов автомобильной подвески в форматах .stl и .m3d;



**Resume**

Number of sliced objects	1
Database	ProX300_PS7165-21_B04.db
Manufacturing time	84h : 53min : 33s
Layering time	19 s
Sintered volume estimation (mm <sup>3</sup> )	738320
Estimation of the powder height (feeding piston, mm)	402

Рисунок 4 – Протокол расчета длительности и необходимый объем порошка для 3D-печати рычагов подвески

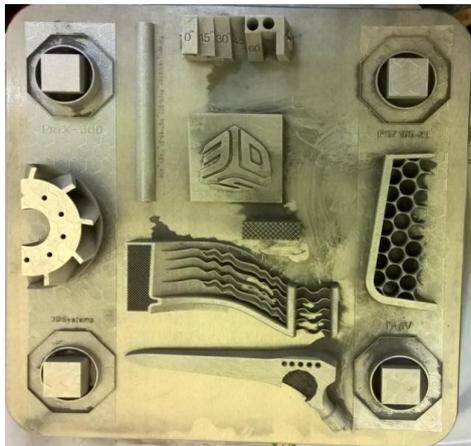


Рисунок 5 – Экспериментальные образцы деталей после 3D-печати

## **ООО «ЛАБОРАТОРИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

Минская обл., Минский р-н,  
Щомыслицкий с/с, аг. Озерцо, ул.  
Центральная, д.1В, ком. 57

Директор – Чивель Ю.А.

### **РАЗРАБОТКИ ООО «ЛАБОРАТОРИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» (БЕЛАРУСЬ) И «МЕРФОТНИКС» (ФРАНЦИЯ) В ОБЛАСТИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ/ПЛАВЛЕНИЯ**

Селективное лазерное спекание/плавление (Selective Laser Sintering/Melting) – технология прямого изготовления деталей из порошковых материалов по 3D-данным компьютерного проектирования (САД моделям). При использовании технологий объемного формообразования результирующий 3-х мерный объект (деталь, модель и т.д.), сохраняя структуру компактного материала в объеме, практически не требует дополнительной механической обработки.

Выращивание объекта осуществляется в инертной атмосфере азота или аргона и обеспечивает высокое качество изделия, требующего доводки поверхности известными методами полировки, в том числе лазерными и абразивными. В настоящее время достигнуты скорости изготовления до 160 см<sup>3</sup>/час изделий с габаритами – 500x300x800 мм из различных металлов, сплавов, пластиков.

#### **1. Состояние разработок в области селективного лазерного плавления**

Лазерные технологические комплексы, реализующие аддитивные технологии селективного лазерного плавления, (СЛП) достигли высокого уровня совершенства и позволяют изготавливать широкую номенклатуру изделий из пластмасс и металлов с характеристиками, соответствующими изделиям из компактного материала. Список металлов – титан и его сплавы, алюминиевые сплавы, медь и сплавы меди, нержавеющей стали, кобальт – хром, золото, никелевые сплавы. Основными потребителями данной технологии являются предприятия авиа-космической, автомобильной, энергетического и транспортного машиностроения.

Например, General Electric приобрело две известные фирмы Arcam (установки электроннолучевого селективного спекания) и CONCEPT (установки лазерного селективного спекания) и изготавливает по этой технологии элементы турбореактивных двигателей и турбин.

Примеры изделий, изготавливаемых серийно методом СЛП представлены на рисунках 1–5:



Рисунок 1 – Элементы авиационного двигателя, изготовленные методом СЛП



Рисунок 2 – Элементы выхлопной системы 316L

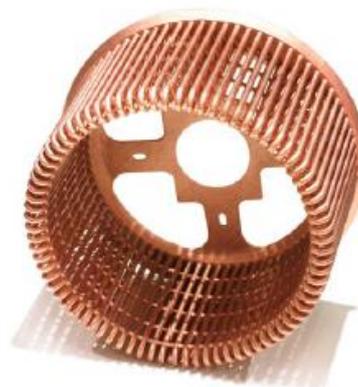


Рисунок 3 – Теплообменник. Сплав CuCrZr



Рисунок 4 – 8 крышек блока цилиндров AlSiMg 265x735x65mm Бугатти (SLM 800)



Рисунок 5 – Корпус дифференциала оси AlSiMg

## **Предельные параметры промышленных установок СЛП представленных на рынке:**

*Мощность волоконного лазера – 400 - 700 Вт;*

*Число лазеров в установке – до 4;*

*Размеры рабочей области – 500x300x800 мм;*

*Фокальное пятно – 50 - 150 мкм;*

*Толщина слоя – 20-100 мкм;*

*Скорость сканирования – до 15 м/с;*

*Скорость изготовления изделия – до 160 см<sup>3</sup>/час;*

*Качество поверхности – Rz = 10 мкм;*

*Точность изготовления – 50 мкм;*

*Расход газа Ar/N<sub>2</sub> – 3-15 л/мин;*

*Вес установки – 1000-5000 кг.*

Современные установки СЛП оснащаются системами регенерации порошка, что дает коэффициент использования порошка - 90%.

Основные проблемы технологий СЛП – производительность процесса и качество поверхности изделий, ее шероховатость. Используя различные методы полировки – абразивные, магнитоабразивные, электрохимические и лазерные шероховатость можно уменьшить до 10 – 100 нм.

Дальнейшее совершенствование установок направлено на повышение точности изготовления изделия и воспроизводимости, улучшение и ускорение процессов загрузки порошка и выемки готового изделия, разработку новых техпроцессов и дальнейшее увеличение производительности.

## **2. Основные направления совершенствования:**

2.1 Обеспечение экологической чистоты технологического процесса. Манипуляции с порошком в нейтральной и сухой атмосфере при отсутствии контакта персонала с порошком;

2.2 Повышение точности изготовления путем перехода к меньшим пятнам фокусировки (10 – 30 мкм) и диаметрам порошковых частиц (5 – 10 мкм);

2.3 Повышение скорости изготовления до 200 см<sup>3</sup>/ч;

2.4 Увеличение размеров области спекания в СЛП до 1000x1000x800мм. Это расширит область применения и спрос на технологию селективного спекания;

2.5 Разработка технологий и установок для изготовления методами СЛП изделий из керамик и металлокерамик, которые обычно изготавливаются методами традиционной порошковой металлургии (спекание под давлением). В этой области имеется много проблем, обусловленных большими градиентами температур в фокальном пятне, приводящих к образованию трещин;

2.6 Введение систем контроля и управления технологическим процессом для повышения точности, качества и обеспечения воспроизводимости результатов.

### 3. Инновационные технические решения для УСЛП

В разработках МерФотоникс и ЛАТ реализуются новые технические решения, позволяющие решить многие из имеющихся проблем:

Одной из важнейших, но нерешенных проблем в области СЛС, является спекание 3D мульти-материальных изделий из металла. Для получения такого изделия необходимо в каждом слое спекать области из порошков различных металлов. Нами разработан метод и оборудование для его реализации. В настоящее время осуществляется сборка первой установки с рабочей областью 100x100x150 мм<sup>3</sup>. Технология и оборудование аналогов не имеют и запатентованы в России и патентуются в США.

Вторая нерешенная проблема – прямое спекание изделий из керамики и металлокерамики. Большие градиенты температур в пространстве и во времени приводят к растрескиванию и снижению прочности изделий. К настоящему времени нами разработан новый подход к решению этой проблемы на основе специальной безуглекислотной керамики и специальной технологии и технологической установки с использованием, помимо лазерного излучения, источников лампового или СВЧ излучения. Технология и оборудование аналогов не имеют и запатентованы в России.

Мультиспектральная технология спекания. Переход к применению в селективном лазерном спекании лазеров коротковолнового диапазона – 532 нм и менее, дает тройной эффект:

- 1) повышение точности изготовления детали за счет уменьшения фокального пятна;
- 2) повышение линейной скорости сканирования при сохранении малого размера пятна за счет увеличения фокусного расстояния объективов гальваносканера;
- 3) увеличение поглощения излучения, характерное для большинства металлов при переходе в коротковолновую область спектра.

Инновационная мульти-лазерная технология. Очень привлекательным решением задачи увеличения производительности является переход к мульти-лазерной и мульти-сканерной технологии в СЛП. Параллельная работа N лазеров позволяет сразу в N раз увеличить производительность. В установках SLM Solutions и EOS гальваносканеры располагаются стационарно в фиксированных позициях. Но при выращивании протяженных сложных по конфигурации

объектов часть лазеров не участвует в процессе и тем самым уменьшается производительность. В нашей разработке на установках с полем 1000x1000 мм и выше гальваносканеры попарно размещаются на платформах перемещающихся по оси X линейным приводом. Это позволяет иметь максимальную производительность при выращивании любых объектов любой протяженности.

Мониторинг и контроль технологических процессов. До настоящего времени промышленные установки СЛП не оснащались системами мониторинга и контроля технологического процесса. На ряде установок проводится мониторинг прежде всего бесконтактный – оптический путем фотоэлектрической и видео регистрации теплового излучения области лазерной обработки. При этом в большинстве случаев мониторинг ведется не путем количественного измерения физических величин (температура, ее распределение), а уровня и характера сигнала.

Нами разработана и патентуется в Европе система оптического мониторинга СЛП. Отличительная особенность этой системы состоит в том, что мониторинг осуществляется на длинах волн близких к длине волны лазера, что исключает ошибки измерений. Регистрируется максимальная температура в зоне плавления и ширина дорожки расплава. С помощью ПИД контроллера путем изменения мощности лазера, поддерживаются технологические параметры – термодинамическая температура и размеры зоны плавления.

Новизна нашего подхода состоит также в установке на каретку нанесения порошкового слоя 2-х координатного сканера изображений с высоким пространственным разрешением для контроля размеров спеченных сечений 3D объекта с микронной точностью и корректировки программы сканера в процессе изготовления объекта. Это позволяет на порядок повысить точность изготовления 3D объекта.

### **Основные параметры разработанного типоряда установок селективного лазерного плавления (УСЛП)**

#### **1. Технические параметры УСЛП 100 МУЛЬТИ:**

- количество типов порошков – 2;
- рабочее поле – 100x100x150 мм;
- мощность диодного лазера – 250 Вт;
- длина волны излучения лазера – 980 нм;
- диаметр фокусного пятна – 80 мкм;
- скорость изготовления изделия – до 30 см<sup>3</sup>/час;
- скорость сканирования – 10 м/с;
- фокусное расстояние F-teta линзы – 160 мм;
- апертура пучка на входе в головку сканера – 30 мм;

- потребляемая от сети переменного тока промышленной частоты мощность не превышает – 4кВт;
- расход газа Ar/N<sub>2</sub> – 1 л/мин.

## **2. Технические параметры УСЛП 300:**

- рабочее поле – 320x320x300 мм;
- мощность лазера № 1 – до 1,5 кВт;
- мощность лазера № 2 – до 100-200 Вт;
- длина волны излучения лазера № 1 – 1070 нм;
- длина волны излучения лазера № 2 – 532 нм;
- диаметр фокусного пятна – 30-700 мкм;
- толщина порошкового слоя – 20-150 мкм;
- скорость изготовления изделия – до 70 см<sup>3</sup>/час;
- скорость сканирования – 15 м/с;
- фокусное расстояние F-teta линзы – 520-560 мм;
- апертура пучка на входе в головку сканера – 20 мм;
- тип сканера – 2D с сдвигом фокуса;
- оптическая стойкость оптики сканера – 1 кВт/см<sup>2</sup>;
- потребляемая от сети переменного тока промышленной частоты мощность не превышает – 6 кВт;
- расход газа Ar/N<sub>2</sub> – 3 л/мин.

## **3. Технические параметры УСЛП 500:**

Требования к основным показателям УСЛП:

- рабочее поле – 500x350x350 мм;
- мощность лазера № 1 – 2 лазера по 1,5 кВт;
- мощность лазера № 2 – 2 лазера по 100-200 Вт;
- длина волны излучения лазера № 1 – 1070 нм;
- длина волны излучения лазера № 2 – 532 нм;
- диаметр фокусного пятна – 30-700 мкм;
- толщина порошкового слоя – 20-150 мкм;
- скорость изготовления изделия – до 120 см<sup>3</sup>/час;
- скорость сканирования – 15 м/с;
- фокусное расстояние F-teta линзы – 520-560 мм;
- апертура пучка на входе в головку сканера – 20 мм;
- тип сканера – 2 сканера 2D с сдвигом фокуса;
- оптическая стойкость оптики сканера – 1 кВт/см<sup>2</sup>;
- потребляемая от сети переменного тока промышленной частоты мощность не превышает – 12 кВт;
- расход газа Ar/N<sub>2</sub> – 10 л/мин.

#### **4. Технические параметры УСЛП 1000:**

Требования к основным показателям УСЛП:

- рабочее поле – 1000x1000x1500 мм;
- мощность лазера №1 – 4 лазера по 1,5 кВт;
- длина волны излучения лазера №1 – 1070 нм;
- мощность лазера № 2 – 4 лазера по 100-200 Вт;
- длина волны излучения лазера № 2 – 532 нм;
- диаметр фокусного пятна – 50-700 мкм;
- толщина порошкового слоя – 20-150 мкм;
- скорость изготовления изделия – до 200 см<sup>3</sup>/час;
- скорость сканирования – 15 м/с;
- фокусное расстояние F-teta линз – 520-560 мм;
- апертура пучка на входе в головку сканера – 20 мм;
- тип сканера – 4 сканера 2D с сдвигом фокуса;
- оптическая стойкость оптики сканера – 1 кВт/см<sup>2</sup>;
- потребляемая от сети переменного тока промышленной частоты мощность не превышает – 15 кВт;
- расход газа Ar/N<sub>2</sub> – 10 л/мин.

Предлагаемые нами установки по ряду параметров превосходят параметры представленных на рынке установок.

Разработана уникальная система вертикального перемещения поршня с изделием, позволяющая перемещать изделие с порошком суммарным весом до 15 тонн, что позволяет увеличить габариты спекаемых изделий до 1000x1000x1500 мм<sup>3</sup>.

Для сканирования внутренних областей изделий большим (до 700 мкм) пятном облучения нами применены мощные, 1,5 и более кВт, дешевые многомодовые диодные лазеры.

Принципы построения установок идентичны для всего типоряда установок. Для удаления неспеченного порошка из рабочей камеры используется гравитационный принцип в отличие от используемого SLM Solutions и EOS извлечения и переноса всей огромной рабочей камеры в специальный модуль. Перемещение порошка производится вакуумными устройствами. Оператор не контактирует с порошком.

#### **4. Установка электронно-лучевого селективного спекания**

На базе разработанных установок СЛП нами проработан проект замены в этих установках лазерного источника на электронно-лучевой. Тем более в наших установках мы устанавливаем мощные вакуумные насосы для откачки рабочего объема, что позволяет осуществлять процесс СЛП и в вакууме. При установке электронной пушки дополнительно устанавливается турбомолекулярный насос для

обеспечения рабочего вакуума. Проработана поставка электронной пушки мощностью 3 кВт с полем сканирования 100x100 мм.

#### **Технические характеристики УЭЛП**

- рабочее поле – 100x100x150 мм;
- мощность ЭП – 3 кВт;
- толщина порошкового слоя – 50-300 мкм;
- скорость изготовления изделия – до 60 см<sup>3</sup>/час;
- скорость сканирования – 15 м/с;
- фокусное расстояние электронной линзы – 160 мм;
- диаметр фокусного пятна – 200 мм;
- потребляемая от сети переменного тока промышленной частоты мощность не превышает – 4 кВт;
- расход газа Ar/N<sub>2</sub> – 1 л/мин.

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И  
СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
(ИЛИСТ СПбГМТУ)**

195251, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая,  
д. 29, к.7

Руководитель научно-технического  
отдела – Земляков Е.В.  
e.zemlyakov@ilwt.smtu.ru

**ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ: ТЕХНОЛОГИЯ,  
ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Земляков Е.В., Бабкин К.Д., Туричин Г.А.

Вопросы сокращения производственного цикла, материало- и трудоемкости и, соответственно, производственной себестоимости актуальны при изготовлении крупногабаритных сложнопрофильных изделий из труднообрабатываемых материалов (титановые, никелевые и кобальтовые сплавы, высокопрочные стали). При использовании традиционных технологий, основанных на механической обработке поковок, проката или отливок, может удаляться более 90 % материала. Наиболее перспективным направлением решения указанных проблем является внедрение современных аддитивных технологий и разработка новых подходов к конструированию, учитывающих их технологические возможности. В докладе представлены результаты исследований и разработок Института лазерных и сварочных технологий (г. Санкт-Петербург) в области промышленных аддитивных технологий – технологии прямого лазерного выращивания. В настоящий момент разработанные в ИЛИСТ технологии и оборудование позволяют изготавливать высокоточные крупногабаритные заготовки (диаметром до 2100 мм) из высокопрочных и нержавеющей сталей, титановых, никелевых, кобальтовых и медных сплавов с производительностью до 2,5 кг/ч. Прочностные характеристики соответствуют требованиям к металлопрокату и значительно превосходят показатели литья. Точность заготовок соответствует 11-13 качеству. Примеры изготовления по разработанной технологии заготовок деталей по заказу промышленных партнеров также представлены в докладе.

## **OERLIKON AM**

ООО «Оерликон Рус»  
109240, Москва, Россия  
Николаямская, 13/1

Директор по развитию бизнеса  
и технологий аддитивного  
производства – Перевозчиков М.В.  
mikhail.perevozchikov@oerlikon.com

### **ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ**

В Oerlikon AM мы помогаем развивать новое направление – технологию аддитивного производства. Мы обладаем уникальной квалификацией для обеспечения глобального технологического лидерства. Мы входим в состав Oerlikon Group и являемся частью сегмента Oerlikon Surface Solutions, обладающей глобальными компетенциями в области материалов, и осуществляем работы на передних рубежах передовых технологий.

Сегмент Surface Solutions – это динамично растущая сеть предприятий, которая состоит из более чем 130 промышленных площадок и 110 специализированных центров в 35 странах Европы, Америки и Азии. Штат сотрудников сегмента насчитывает около 6000 высококвалифицированных специалистов.

В настоящее время мировой рынок производства компонентов диктует производителям возрастающие требования не только к качеству и технологичности, но и к повышению функциональности конечных изделий.

Рассмотрим основные требования и препятствующие им барьеры в рамках традиционных технологий машиностроения:

1. Комплексная геометрия и функциональная интеграция (применение новых материалов, позволяющих получать изделия с лучшими механическими и электрофизическими свойствами);
2. Малое количество и значительные различия в геометрии изделий (изготовление прототипов в кратчайшие сроки; глубокая кастомизация изделий);
3. Бережливое производство (оптимизация массы изделий, включая оптимизацию расходов во время их производства; сбалансированное распределение действующих сил на изделие; повышение энергоэффективности производства).

Барьеры, которые ставят традиционные технологии машиностроения:

1. Разработка интегрированных систем в составе последовательных производственных циклов, требующих применения новых технологий, опережающих существующие;

2. Методы массового производства, не позволяющие осуществлять оперативные изменения в процессе прототипирования;

3. Отсутствие возможности обеспечения получения максимальной эффективности изделия, так как производство ограничено существующим инструментарием.

Одним из важных преимуществ Oerlikon AM является возможность контроля на всех этапах создания изделия, начиная от создания металлического порошка и заканчивая финишной механической обработкой изделия.



Рисунок 1 – Этапы аддитивного производства

Являясь производителем металлических порошков для технологий аддитивного производства, таких как лазерная наплавка и послойное лазерное спекание, мы обладаем постоянно расширяющимся портфолио материалов. В состав нашего портфолио металлических порошков входят материалы на основе Ni, Co, Fe и Ti (<https://www.oerlikon.com/am/>). Мы обладаем тремя научно-исследовательскими центрами, расположенных в Европе и Северной Америке. Мы производим и адаптируем материалы для всех основных производителей металлических 3D принтеров, представленных на мировом рынке.

Мы осуществляем широкий спектр работ для решения задач наших партнеров области машиностроения, используя при этом научно-исследовательские центры и площадки мелкосерийного производства Oerlikon AM.

Вот лишь самая малая часть примеров успешных работ в области машиностроения: пресс-формы; изделия для ДВС; компоненты автомобилей; системы теплоотвода; компоненты роботов; компоненты ГТД.



Рисунок 2 – Примеры деталей, изготовленных аддитивными методами

Мы располагаем широким набором технологий функциональной модификации поверхности и передовыми материалами для аддитивных технологий, а также опытом в области проектирования и разработки промышленных компонентов из металлов и их сплавов. Мы осуществляем производство изделий на основе глубокой экспертизы и извлекаем пользу из мирового опыта открывая новые решения в аддитивных технологиях.

Нам доверяют одни из самых известных компаний в мире, потому что мы можем обеспечить нашему партнеру лидирующие позиции при использовании технологий аддитивного производства.

**ОНИЛ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФИЛИАЛА БНТУ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ»**

220013, Минск,  
пр. Независимости, 65,  
6 корпус БНТУ

Зав. лабораторией – Девойно О.Г.  
scvdmed@bntu.by  
Тел. 8(017)331-30-58

**ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ И  
УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ**

Технология формирования защитных покрытий плазменным напылением порошковых материалов: обеспечивает возможность напыления широкой номенклатуры порошковых материалов и создания: износостойких, коррозионностойких покрытий, покрытий, стойких к эрозии, кавитации и тепловым воздействиям. Возможно напыление металлических, керамических, плакированных и композиционных материалов, а также материалов, обладающих экзотермическим эффектом.

Принцип напыления покрытий основан на разогреве порошкового материала в генерируемой плазмотроном струе плазмы до температуры плавления с последующей кристаллизацией на упрочняемой рабочей поверхности детали.

Таблица 1 – Основные технические характеристики установки газопламенного напыления

Наименование показателя режима напыления	Единица измерения	Величина показателя
Напряжение дуги	В	90...95
Ток дугового разряда	А	220...250
Расход плазмообразующего газа (азота)	м <sup>3</sup> /час	3,6
Расход транспортирующего газа (азота)	м <sup>3</sup> /час	0,3
Коэффициент использования порошкового материала	%	до 95
Дистанция напыления	мм	120
Производительность процесса:	кг/час	3...4
	м <sup>2</sup> /час	0,37...0,5

Разработанные технологии опробованы для быстроизнашивающихся деталей самого широкого назначения: нефтяного, нефтехимического, бурового, газоперерабатывающего оборудования, автотракторной техники, текстильного производства, запорной арматуры энергетического оборудования, валы, штоки, гильзы, втулки насосного оборудования. Износостойкость деталей, как правило, повышается в 3-5 раз по сравнению с серийными.

Установка термораспылительная ТРУ-2.1.Р. Предназначена для напыления широкой номенклатуры порошковых материалов и создания: износостойких, коррозионностойких покрытий, покрытий, стойких к эрозии, кавитации и тепловым воздействиям. Возможно напыление металлических, керамических, плакированных и композиционных материалов, а также материалов, обладающих экзотермическим эффектом.

Принцип напыления покрытий основан на разогреве порошкового материала в высокотемпературном пламени, образующимся при сгорании пропан-бутана или ацетилен в кислороде.

Установка состоит из пульта управления, снабженного контролирующими приборами, вентилями для регулировки рабочих газов, системой автоматики и газораспределения, термораспылительной горелки пистолетного типа, позволяющей осуществить напыление как вручную, так и в полуавтоматическом режиме. Для напыления внутренних и труднодоступных поверхностей установка имеет специальный удлинитель, который позволяет производить напыление деталей типа втулок от диаметра 150 мм на длине 700 мм с каждой стороны.

Таблица 2 – Основные технические характеристики установки газопламенного напыления

№ п/п	Основные характеристики	Значения параметров
1	2	3
1	Полезный объем порошкового питателя, (л)	0,7
2	Размер напыляемых частиц (мкм)	30 - 150
3	Максимальная производительность (кг/час): - на пропан-бутане - на ацетилене	6 9
4	Коэффициент использования порошкового материала (%)	до 95
5	Дистанция напыления (мм)	100 - 200

Установка может быть дополнительно укомплектована горелкой для газопорошковой наплавки, которая позволяет проводить наплавку различных классов материалов: никелевых сплавов, железных сплавов, сплавов на медной основе и т.д.

Разработанные технологии опробованы для быстроизнашивающихся деталей самого широкого назначения: нефтяного, нефтехимического, бурового, газоперерабатывающего оборудования, автотракторной техники, текстильного производства, запорной арматуры энергетического оборудования, валы, штоки, гильзы, втулки насосного оборудования. Износостойкость деталей, как правило, повышается в 3-5 раз по сравнению с серийными.

# ОНИЛ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФИЛИАЛА БНТУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

220013, Минск,  
пр. Независимости, 65,  
6 корпус БНТУ

Зав. лабораторией – Девойно О.Г.  
scvdmed@bntu.by  
Тел. 8(017)331-30-58

## ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Технология поверхностной лазерной закалки основана на перемещении с определенной скоростью по заданной траектории сфокусированного лазерного луча. Обеспечивается термообработка поверхности без объемного разогрева деталей, что позволяет использовать такой вид упрочнения для деталей сложной формы, крупногабаритных и ряда других, упрочнение которых невозможно традиционными методами.

Лазерная закалка эффективна для углеродистых, легированных инструментальных сталей, чугунов и твердых сплавов. Твердость упрочненного слоя достигает до 1000 – 1200 HV. Износостойкость повышается в 2-3 раза по сравнению с объемно-закаленными сталями. Глубина слоя составляет 0,3...1 мм.

Технология лазерного легирования предусматривает нанесение на упрочняемую поверхность слоя легирующих компонентов и последующее его проплавление лучом лазера. Обладая всеми преимуществами лазерной закалки, метод позволяет, кроме того, производить упрочнение материалов, не подвергающихся закалке, например, малоуглеродистых сталей, сталей аустенитного класса, цветных сплавов. Выбор легирующей обмазки и режимов лазерной обработки обеспечивает формирование слоев с требуемым комплексом физико-механических свойств. Глубина упрочненного слоя составляет 0,3...0,5 мм. Повышение износостойкости составляет 3...5 раз по сравнению с объемно-закаленными.

Технология лазерной наплавки защитных покрытий используется для восстановления изношенных деталей. С этой целью предварительно на деталь производится газотермическое напыление покрытия порошковыми самофлюсующимися сплавами, а затем лазерное оплавление данного слоя. Дополнительное легирование покрытий в процессе оплавления обеспечивает корректировку свойств покрытия в зависимости от условий работы деталей.

Лазерная технология внедрена на ряде производств для упрочнения деталей автотракторной техники (распределительные и коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания), нефтяного и нефтехимического оборудования (валы насосов, рабочие колеса в местах их щелевых уплотнений, а также ряд других деталей).

# ОНИЛ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФИЛИАЛА БНТУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

220013, Минск,  
пр. Независимости, 65,  
6 корпус БНТУ

Зав. лабораторией – Девойно О.Г.  
scvdmed@bntu.by  
Тел. 8(017)331-30-58

## ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Лазерная сварка в отличие от традиционных методов позволяет за счет концентрации высокой плотности мощности в зоне воздействия лазерного луча имеет следующие преимущества:

1. Высокая производительность процесса, характерные скорости сварки могут достигать 200-400 м/час, а при использовании лазерно-дуговой (гибридной) технологии и до 2000 м/час;
2. Возможность сварки разнородных металлов;
3. Возможность сварки встык листов металла достаточно большой толщины за один проход;
4. Отличные свойства металла шва и околошовной зоны, во многих случаях механические свойства металла шва не хуже свойств основного металла, а иногда и выше;
5. Малая ширина зоны термического влияния и малый уровень деформаций: примерно в 3-5 раз ниже, чем при дуговой сварке;
6. Возможность сварки в труднодоступных местах и разных пространственных положениях;
7. Хорошая управляемость и гибкость процесса, возможность его полной автоматизации;
8. Возможность транспортировки лазерного излучения от источника на значительные расстояния, а для волоконных лазеров и по оптическому световоду;
9. Экологическая чистота процесса, определяется отсутствием флюсов и других сварочных материалов.

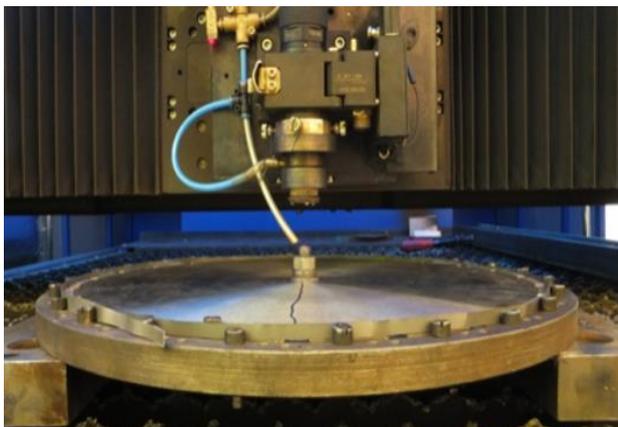


Рисунок 1 – Процесс лазерной сварки



Рисунок 2 – Пример сварного соединения

Научное издание

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ, ПЛАЗМЕННЫХ  
И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Сборник материалов семинара

*(Минск, 18 октября 2019 г.)*

Подписано в печать 16.10.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 1,36. Тираж 100. Заказ 756.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.