

УДК 629.5.01

А.В. ДектяревАспирант кафедры кораблестроения
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»**В.Н. Морозов**Доцент кафедры кораблестроения
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
кандидат технических наук, доцент

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННУЮ СУДОСТРОИТЕЛЬНУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Аннотация

В работе рассматриваются основные вопросы технико-экономического обоснования внедрения аддитивных технологий в отечественную судостроительную промышленность. В основе исследования лежат факторы применимости изделий судостроения к аддитивному производству, сравнение конечных физико-механических характеристик объектов в зависимости от их технологии изготовления, технико-экономические показатели внедрения аддитивных технологий на производство.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-принтеры, трехмерная печать, судостроительная промышленность, судостроение, технико-экономические характеристики.

Введение

С 1986 года, когда первый прототип 3D-принтера появился на свет, прошло уже 30 лет. За это время аддитивные технологии прочно вошли и закрепились во многих отраслях различных производств. С научной точки зрения, данная технология, если брать за основу прототип 1986-го года, сильно изменилась по своим составляющим в части самих 3D-принтеров, а также технологии работы с ними.

В настоящее время по технологии печати на 3D-принтере осуществляется изготовление моделей и форм для литейного производства, репликация изделий (3D-сканер → 3D-модель → 3D-принтер), производство готовых деталей, создание сложных макетов изделий и архитектурных макетов, прототипирование деталей и изделий.

Ранние исследования относительно специфики работы аддитивных технологий в тяжелой промышленности [5; 10], в том числе и в судостроении [8; 9] показывают, насколько данная тематика актуальна в современном производстве. Ее изучению посвящены труды таких отечественных исследователей, как Дорохова А.Ф., Абачараева М.М., Бажовой Л.С., Маринина А.А., Голубчиной Я.Р., Проскуракова Н.Е. Про преимущества аддитивных технологий над традиционными методами изготовления конструкций также уже многократно высказывалось – легкое изготовление прототипов, быстрая корректировка проектов, возможность применения сложных архитектурных решений, минимум человеческого труда.

Некоторые высказывания относительно развития аддитивных технологий в судостроении при евразийской интеграции для углубления сотрудничества ЕАЭС с третьими странами представлялись в авторской работе [1; 11]. Ускоренные и цифровые достижения последних десятилетий сделали мир более сложным, многоплановым и взаимозависимым. Современному миру научно-технического прогресса, экономики знаний и культурных технологий стали необходимы новые инновационные технологии, как средства и инструменты взаимодействия для осуществления международных социально-политических связей.

В настоящий момент членами Евразийского экономического союза являются 5 стран: Армения, Белоруссия, Казахстан, Киргизия и Россия. Молдавия выступает в роли государства-наблюдателя. Для сравнения, в том же Европейском Союзе состоит 28 европейских государств. Для успешного сотрудничества в рамках инновационных технологий, в том числе аддитивных, отечественному судостроению следует начинать фазу активного внедрения аддитивных технологий на свои производства, перенимать опыт зарубежных коллег, стремиться предотвращать и устранять их недостатки и упущения, формировать выпуск продукции с видом на современные российские реалии. Такого рода сотрудничество возможно при реализации практических навыков, уже реализованных или реализуемых за рубежом. Наиболее успешными в этом направлении выступают следующие страны:

- Южная Корея. В 2015 г. Hundai Heavy Industries открыло инновационный центр по разработке промышленной 3D-печати для нужд судостроения. Объем финансирования на протяжении срока программы (5 лет) составляет \$20 млн. Заказчиком выступает Министерство торговли, промышленности и энергетики.

- Китай. Имеет 45 университетов и 20 исследовательских организаций, занимающихся представленной тематикой.

- Европа. По мнению главы отдела кораблестроения Национального института судоходства и судостроения (NISS), 3D-печать должна полностью изменить подход к проектированию и изготовлению судов. Сочетание 3D-печати, компьютеризации всего производства и роботизации развивается высокими темпами. Эти тенденции полностью обновят морское судоходство.

- США. Имеет 15 институтов промышленных инноваций: Консорциум Boeing, General Electric, General Dynamics, Goodrich, Honeywell, Lockheed Martin, Morris Technologies, Northrop Grumman, Rolls-Royce, Sciaky, NASA, NAVAIR, NIST и др. Финансирование правительства составляет порядка \$1 млрд.

В начале 2010-ых произошел эволюционный скачок в плане 3D-техники. У ведущих компаний мира в сфере аддитивных технологий – Stratasys и 3D Systems - истекли патенты. Это привело к тому, что 3D-оборудование на порядок упало в цене и самые дешевые 3D-принтеры стали стоить около \$1 тыс.

По исследованиям Wohlers Associates, с 1988 по 2015 г.г. среднегодовой прирост рынка аддитивных технологий составил 26,2%. Общая прибыль компаний, занимающихся производством и обслуживанием 3D-принтеров в мире, в 2015-ом году превысила \$5,16 млрд. По данным Context, мировой рынок услуг 3D-печати к 2020-му году достигнет цифры в \$17,8 млрд.

Говоря о месте России в потенциальном рынке, стоит отметить, что по исследованиям компании 3Dtool, одного из главных поставщиков оборудования на рынке аддитивных технологий, объемы продаж российского оборудования за первый квартал 2016-го года выросли на 45% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. По данным аналитиков IDC, поставки 3D-принтеров к 2017-му году выросли в 10 раз, что полностью ожидаемо, учитывая условия постоянно меняющихся способов и технологий печати. Российские производители в текущей экономической обстановке не могут занять лидирующих позиций на рынке аддитивных технологий по тому фактору, что наши 3D-принтеры, позиционируясь как отечественная продукция, все равно собираются из импортных комплектующих. Однако, в общем плане, Россия идет по пятам мирового тренда, отставание в области аддитивных технологий, в общем смысле, совсем невелико. К примеру, в Европе из тех, кто работает в «hi-tech» сфере, только 4% предприятий активно внедряют и применяют устройства подобного типа. По данным UPS, 75% мировых пользователей

3D-принтеров нашли им применение для разработки новых продуктов, остальные же печатают с их помощью запасные детали. Аналогичная картина сегодня сложилась и в России. Объемы российского рынка продаж 3D-оборудования достигает 1 млрд. руб. в год. Цены на технику колеблются в диапазоне от пары десятков тысяч рублей за бытовые принтеры до десятков миллионов долларов за промышленные. Ежегодно в России производятся около 8 тыс. единиц 3D-техники средней стоимостью около 120 тыс. руб.

Однако, до сих пор остро стоит вопрос о различиях в конечных физико-механических характеристиках изделий по сравнению с традиционными методами изготовления (литье, сварка, прокат), технико-экономических аспектах производства и анализу применимости изделий современного судостроения под их производство аддитивными способами. Данная статья посвящена решению проблемы последних трех вопросов, наиболее актуальных при проблеме внедрения аддитивных технологий в судостроение и прочному закреплению их в этой индустрии.

Гипотеза

Внедрение аддитивных технологий в судостроительную промышленность, уже на первом этапе, позволит достичь следующих результатов:

- произойдет упрощение и уменьшение логистики и складских запасов, сокращение времени поставок;
- произойдет сокращение сроков и стоимости запуска новых изделий в производство;
- появится возможность и экономическая целесообразность мелкосерийного и единичного производства;
- за счет оптимизации технологического цикла произойдет снижение стоимости деталей в 1,5-2 раза;
- в результате оптимизации внутренней структуры изделий будет наблюдаться снижение веса конструкций;
- произойдет функциональная оптимизация продукции;
- повысится коэффициент использования материала и приблизиться к максимальной отметки в единицу;
- из-за внедрения принципиально новых подходов к проектированию изделий произойдет снятие технологических ограничений, позволяющих создать сложные пространственные неразборные детали, решетчатые облегченные конструкции, производство которых с использованием традиционных технологических методов невозможно;
- появится новый подход к разработке и дизайну изделий, исходя из их функционального назначения.

Методы

Для решения проблемных задач, поставленных в работе, были использованы методы аналитического исследования, математического и компьютерного моделирования предполагаемых или реализованных конструкций и технологий, которые объединялись в группу теоретических и эмпирических методов.

Была проанализирована обширная научно-методическая база, состоящая из отечественных и зарубежных источников информации; интернет-ресурсы, в том числе, информационные базы азиатских регионов; патентный поиск.

Данные по экспериментальным наблюдениям получены в содружестве с Санкт-Петербургским Государственным Морским Техническим Университетом (СПбГМТУ),

компаниями ГК «Остек», Voxeljet, КГ «Солвер», а также Департамента развития индустриальной модели ПАО «ОАК». Некоторые результаты были осуществлены в Калининградском Государственном Техническом Университете (КГТУ) при поддержке Технопарка КГТУ и на АО ПСЗ «Янтарь».

Результаты и обсуждение

Относительно применяемости аддитивных технологий к современному судостроительному производству можно утверждать, что на данный момент массово запустить в производство аддитивными методами можно изделия судового машиностроения из любых материалов, элементы корпусов их полимерных композиционных материалов, судовое насыщение, корпуса деревянных судов (из материалов полимерного ряда – заменителей древесины [8]), а также массово производить модели судов для их испытаний в опытовых бассейнах и выставочных экспозициях.

Применяемость изделий судостроения по отношению к аддитивным технологиям оценена в таблице 1. Стоит отметить допущение, что изготовление указанных в таблице 1 изделий носит массовый, не единичный, характер. В таблице рассматривается три этапа внедрения и развития аддитивных технологий в судостроении, оцененных согласно известного закона Мура [9].

Таблица 1. Оценка применяемости изделий судостроения относительно их аддитивного производства

№ п/п	Сегодня (T – Today)	Недалекое будущее (Near Future – NF) <10-15 лет	Далекое будущее (Distant Future – DF) свыше 40 лет
1.	Изделия судового машиностроения	Гребные винты крупнотоннажных судов	Секции любых габаритов и сложности
2.	Модели судов	Суда стояночного флота	Блок-секции любой сложности
3.	Элементы корпусов из полимерных материалов	Элементы сложного гнutoго набора	Судно целиком
4.	Элементы деревянных корпусов	Сложны листовые элементы корпуса	Судовые двигатели целиком
5.	Судовое насыщение	Судовая оснастка	Сложные механизмы
6.	Гребные винты для маломерных и среднетоннажных судов	Небольшие секции со сложными обводами	Самостоятельные ремонт судна путем 3D-прототипирования на борту
7.	Оснастка для литейного производства	Корпуса деревянных судов целиком	Самостоятельное перевооружение судна на борту

Первый этап относится к сегодняшним технологическим процессам, обеспечивающим изготовление указанных изделий. Данные изделия уже массово изготавливаются на мировых судостроительных предприятиях аддитивными методами, либо же, их серийное производство наступит в течение двух-трех лет. Для них уже получены опытные образцы, которые прошли необходимую сертификацию.

Второй этап – ближайшее будущее. Обозначает изделия, для которых на данный момент формируется теоретическая база технологических процессов изготовления, а некоторые, например, как гребной винт [12] уже изготовлены в единичном экземпляре для отработки технологической схемы. В общем случае, их серийное производство начнется в ближайшее десятилетие.

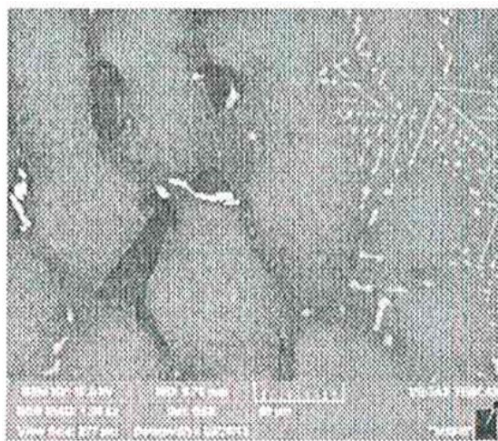
Третий этап – далекое будущее. Обозначает перечень объектов, которые можно будет изготавливать аддитивными методами только в перспективе. Для них требуется полный переход на новое производство и полное освоение первых двух этапов.

Исследования, проводимые по четырем различным материалам (Inconel 625, ЖС6У, ВТ20, 316L) выявили различия в физико-механических характеристиках конечных

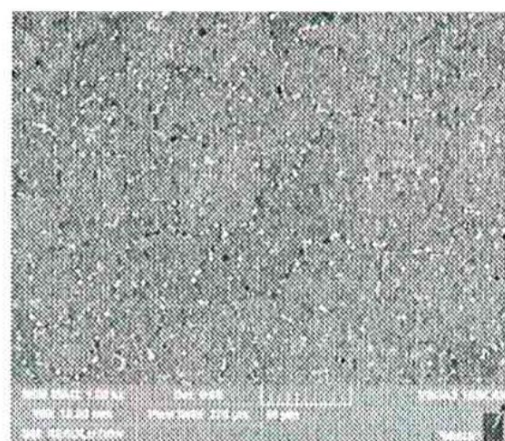
изделий относительно технологии их изготовления. Результаты исследований сведены в таблице 2, сравнительные фотографии образцов показаны на рисунке 1.

Таблица 2. Результаты исследований образцов, изготовленных при помощи традиционных методов и аддитивных технологий

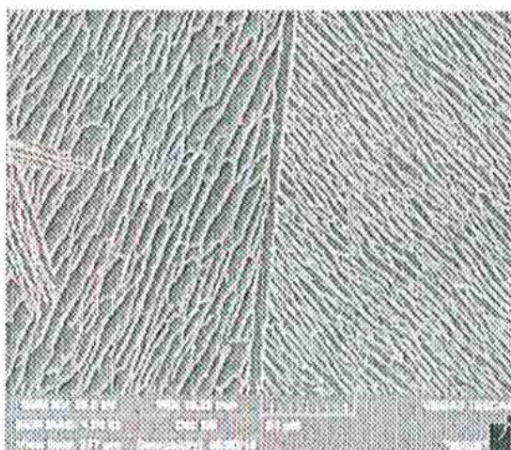
№ п/п	Марка материала	Технология изготовления	Испытания на разрыв		
			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
1.	Inconel 625	аддитивные	489	865	28,5
		литье	310	-	25,0
		прокат	414-758	827-1103	30-60
2.	ЖС6У	аддитивные	1045	1353	11,5
		литье	1075	1108	2,9
3.	BT20	аддитивные	982	1168	5,6
		литье	876	951	6,4
4.	316L (аналог X17H12M3)	аддитивные	273	570	41,0
		аддитивные после отжига	182	485	35,0



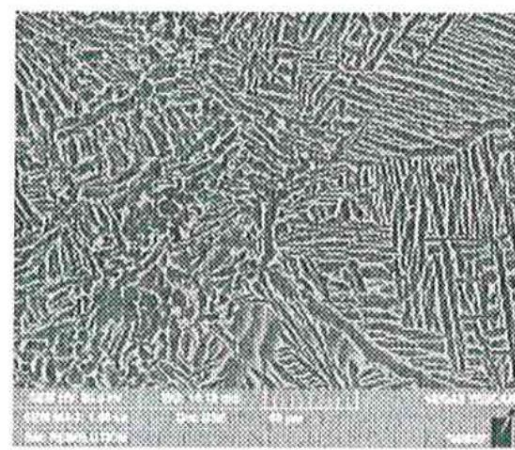
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1. Сравнение структуры материалов, изготовленных традиционными методами литья с аддитивными. а) ЖС6У, литье. б) ЖС6У, 3D-принтер. в) BT20, литье. г) BT20, 3D-принтер

Результаты металлографических исследований и механических испытаний выращенных экспериментальных образцов методом прямого лазерного выращивания, подтверждают отсутствие внутренних дефектов и высокие эксплуатационные характеристики.

Рассмотрим далее пример оптимизации под аддитивное производство и изготовление объекта судового машиностроения и сравним его конечные физико-механические характеристики. Объектом судового машиностроения выступает сатуратор.

Сатуратор представляет собой аппарат, позволяющий под давлением насыщать морскую опресненную воду углекислым газом, делая ее пригодной для питья и приготовления пищи. Сатураторы жизненно необходимы на судах с ограниченными объемами, на которые невозможно установить и перевозить резервуары с пресной водой. Бывают периодического, циклического и непрерывного действия с ручным, полуавтоматическим и автоматическим управлением. Насыщение воды углекислым газом может происходить путем механического перемешивания, барботирования газа через слой жидкости, разбрызгивания и расслоения жидкости в газе и т.д.

При применении аддитивных технологий и оптимизации конструкции под 3D-печать в одном цельном корпусе была получена деталь как одна единица хранения. В результате, отсутствуют операции сборки, нет прокладок, которые могут течь, нет соединительных фланцев, на которые уходит материал и место в конечном изделии, вес детали уменьшился в разы.

Сравнение технологических схем изготовления сатуратора согласно его традиционной схеме по обычной технологии и оптимизированной конструкции по аддитивной технологии представлена в таблице 3.

Таблица 3. Анализ технологических схем изготовления сатуратора

№ п/п	Показатель	Традиционная конструкция	Оптимизированная конструкция
1.	Количество деталей, ед.	12	1
2.	Масса, кг	1,30	0,05
3.	Объем, см ³	401,9	45,3
4.	Количество прокладок	3	0
5.	Время изготовления, мин	720	360
6.	Задействовано отделов предприятия	4	2
7.	Производственные затраты, €	1250	340

Схема традиционного сатуратора показана на рисунке 2. Схема оптимизированного сатуратора под производство аддитивными технологиями – на рисунке 3. Сравнение характеристик двух сатураторов – на рисунке 4.

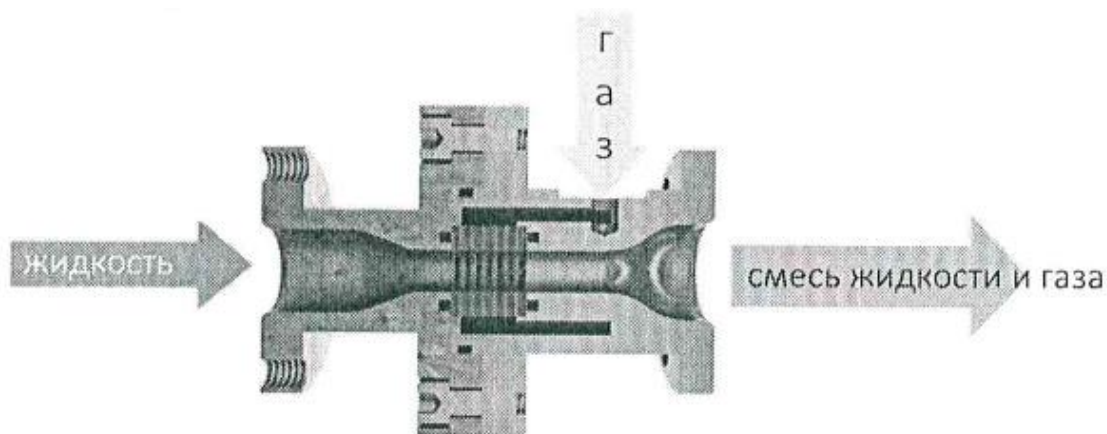


Рисунок 2. Традиционная схема сатуратора

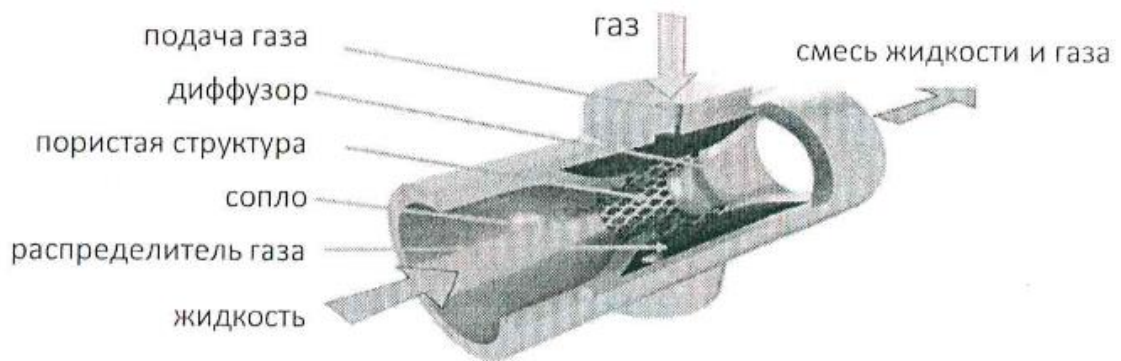


Рисунок 3. Оптимизированная схема сатуратора

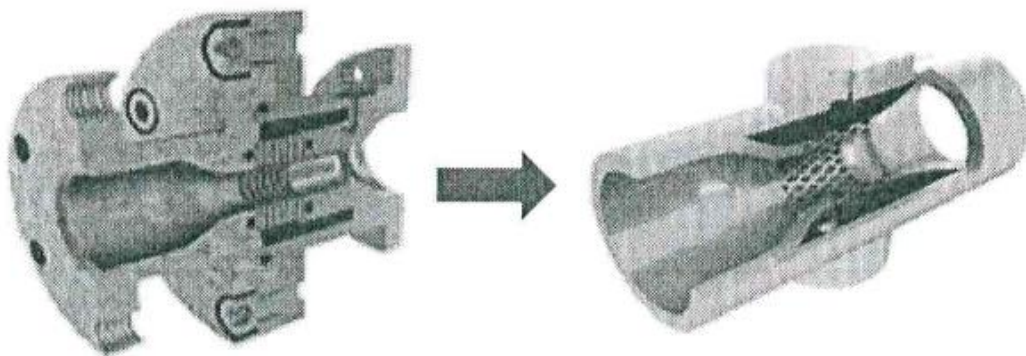


Рисунок 4. Традиционная схема сатуратора (слева) и оптимизированная конструкция для аддитивного производства (справа)

При сравнении двух технологических схем изготовления деталей на основе аддитивных технологий и традиционных методов, становится понятно, что во втором случае составляющих значительно больше, чем в первом, что отражается на времени изготовления и трудоемкости конечного изделия. Если в качестве примера традиционной технологии взять литье, то упрощенная последовательность процесса изготовления детали данным методом будет выглядеть следующим образом:

- проектирование 2D- или 3D-модели;
- разработка рабочей конструкторской документации (РКД);
- проверка на технологичность;
- разработка технологии производства;
- выпуск конструкторской документации (КД);
- изготовление оснастки:
- литье;
- термическая обработка;
- механическая обработка;
- получение готового изделия.

Описанный процесс наглядно показан на рисунке 5.

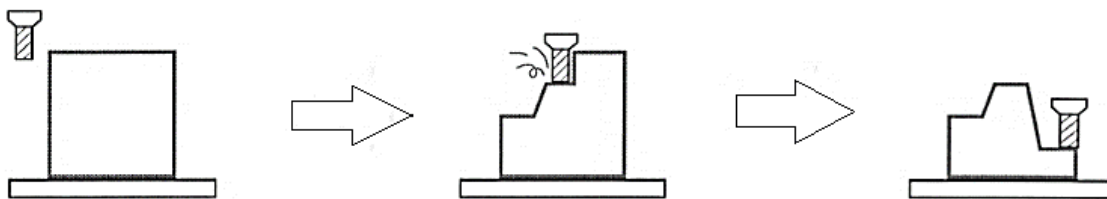


Рисунок 5. Принципиальная технологическая схема изготовления объекта традиционными методами литья

Упрощенная последовательность процесса изготовления детали аддитивными технологиями основывается на следующем:

- проектирование 3D-модели;
- определение технологии печати;
- создание управляющей программы для печати;
- печать;
- механическая обработка (при возникновении потребности);
- получение готового изделия

Данный процесс также наглядно показан на рисунке 6.

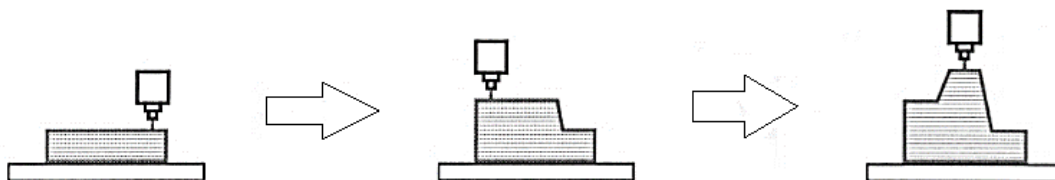


Рисунок 6. Принципиальная технологическая схема изготовления объекта аддитивными методами

Сравнение временных затрат на две технологические схемы представлено в виде диаграмм на рисунке 7.

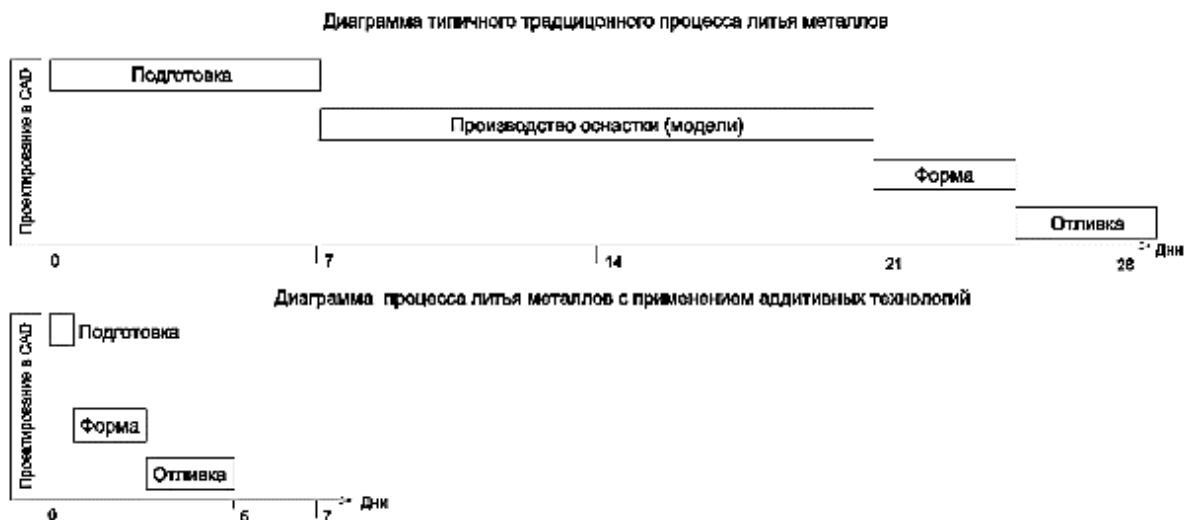


Рисунок 7. Сравнение временных затрат при традиционном процессе литья и применении аддитивных технологий

Из представленной диаграммы можно сделать следующие выводы:

- экономия времени достигается свыше 50;
- появляется возможность гибкого изменения изделия в режиме реального времени;

- происходит сокращение времени на производство более чем в 5 раз – с 4 недель до 5 дней.

Работы по внедрению аддитивных технологий в производство с применением металлопроката начались несколько лет назад, хотя ранние концепции относительно внедрения аддитивных технологий в судостроение, судомоделизм и судоремонт доказывались в [1; 2; 3; 4; 5]. На сегодняшний день были достигнуты некоторые результаты – несколько изделий судового машиностроения изготавливаются по новой технологии.

К примеру, относительно пластиков и полимеров ведутся следующие работы по подготовке учебно-тренировочных средств, прототипированию вновь изготавливаемых изделий и привлечению внимания путем рекламы и выставочных образцов.

Однако, наибольший интерес представляют работы с металлическими порошками. На данный момент ведутся разработки по созданию следующих инженерных компонентов судна:

- гребной винт фиксированного шага;
- корпус редуктора подруливающего устройства;
- решетка откидной колонки;
- корпус движителя подводного аппарата;
- реактивное сопло водометного движителя с лопастной системой;
- опытные образцы элементов судовых движителей.

У любой технологии есть свои положительные и отрицательные аспекты. Положительный результат внедрения аддитивных технологий рассмотрен выше. Однако, существуют и барьеры, стоящие на пути внедрения аддитивных технологий, такие как, например:

- отсутствие полноценного программного обеспечения как по конструированию материалов из металлопорошков, так и технологическое – по выращиванию;
- ограниченный выбор материалов для аддитивного производства;
- особенности контроля качества получаемых изделий;
- отсутствие нормативно-правовой базы, регламентирующей применение аддитивных технологий и материалов в промышленности: без методик сертификации самих технологий практически невозможно с их помощью внести изменения в конструкцию деталей или применить новый материал;
- закрытая архитектура большинства установок аддитивного производства: нет возможности варьировать условия обработки – в аддитивных технологиях важно оборудование, потому как оно, отчасти, определяет характеристики будущего изделия во взаимодействии с материалом;
- отсутствие альтернативных подходов, позволяющих проводить ускоренную аттестацию оборудования аддитивных технологий;
- отсутствие объективного и экономически обоснованного перечня и очередности производства деталей.

При переходе на совершенно новую модель производства необходимо не только пересмотреть практически полностью весь производственный цикл – необходимо, прежде всего, оптимизировать конструкцию под аддитивное производство. В мировой практике такие прецеденты уже имелись – в 30-ых годах прошлого столетия в судостроении на смену клепке пришла сварка и специалистам того времени пришлось решать сложные вопросы и проблемы, связанные с этим, что обеспечило необходимый мировой прогресс производства.

Также, остро стоят проблемы относительно сертификации и отраслевых баз. На сегодняшний день существуют стандарты и сертификация новой технологии в разных

отраслях мировой промышленности. В основном это авиакосмическая промышленность и автомобилестроение. В РФ в настоящий момент технология и материалы не сертифицированы.

Вместе с тем, в отечественной инновационной промышленности начинаются первые шаги, связанные с промышленной организацией работ на 3D-технологиях. Однако, в большинстве своем, на сегодняшний день, пока все ограничилось сводом документации. Приказом Росстандарта №1013 от 1 сентября 2015 г. был создан технический комитет по стандартизации №182 «Аддитивные технологии». На данный момент, в его состав входят 56 организаций. Секретариат ТК сформирован на базе ФГУП «ВИАМ».

В заключении можно резюмировать, что несмотря на то, что судостроение является отраслью консервативной направленности с особыми путями развития, отличными от смежных отраслей, аддитивные технологии уже нашли свое применение и в ней. Множество российских судостроительных предприятий вводят 3D-печать в свое производство: отрабатывают технологию, делают заготовки, оценивают применимость. Такие системы обеспечивают будущее всей тяжелой промышленности, всеми желаемую автоматизацию и роботизацию производственных процессов, эволюционный скачок в технологии изготовления сложных инженерных объектов.

Список литературы

1. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроении и перспективы их развития. – BeauBassin (Mauritius): Lamp Academic Publishing, 2018. – 177 с.
2. Дектярев А.В. Возможности применения 3D-принтеров в судостроении, судомоделизме и судоремонте // Докл. на конкурс «Инженер года-2015». – АО ПСЗ «Янтарь». – Калининград. – 2015.
3. Дектярев А.В., Морозов В.Н. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития // Морские интеллектуальные технологии. 2017, №12 (2), с.78-88.
4. Серия "Стратегическая аналитика". Ассоциация развития аналитического потенциала личности, общества и государства "Аналитика" (Москва). Большая Евразия - 2030: аналитика развития, безопасности и сотрудничества, 2017 г.
5. Дектярев А.В. Возможности применения 3D-принтеров в судостроительной промышленности // Тезисы 67-ой Международной студенческой научно-технической конференции, 2017 г.
6. Emilia Mikolajewska, Marek Macko, Łukasz Ziamecki, Sonia Stańczak, Patryk Kawalec and Dariusz Mikolajewski, «3D printing technologies in rehabilitation engineering», Journal of Health Sciences, №4 (12), pp. 78-83, November 2014.
7. Juan Luis Chulilla, «The cambrian explosion of popular 3D printing», International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, vol. 1, issue 4, pp. 30-32, December 2011.
8. S.K. Jha, «Emerging technologies: Impact on shipbuilding», Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India, vol. 12, issue 2, pp. 78-88, October 2016.
9. Seung Ki Moon, Yu En Tan, Jihong Hwang and Yong-Jin Yoon, «Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures», International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, vol. 1, issue 3, pp. 223-228, July 2014.
10. Seyed Farid Seyed Shirazi, Samira Gharehkhani, Mehdi Mehrali, Hooman Yarmand, Hendrick Simon Cornelis Metselaar, Nahrizul Adib Kadri and Noor Azuan Abu Osman, «A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing», Science and Technology of Advanced Materials, vol. 16, №3, pp. 1-20, May 2015.
11. Wei Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang and Pablo D. Zavattieri, «The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering», Computer-Aided Design, vol. 69, pp. 65-89, December 2015.
12. Впервые гребной винт для корабля напечатан на 3D-принтере // Хайтек URL: <https://hightech.fm/2017/05/18/shipyards>