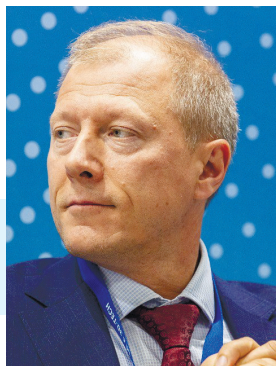


Быстрый металл аддитивных технологических комплексов



Д.Н. Трушников



Д.С. Трубашевский

*Д.Н. Трушников, директор ООО «ИксВелд»
Д.С. Трубашевский, независимый эксперт,
основатель бренда «Логика слоя»*

Введение

С незапамятных времен человечество покоряет природу. Вначале это стремление было вызвано в основном инстинктом самосохранения и пропитания. И лишь в последние тысячелетия человека стало заботить удобство и эстетика его жилища, орудий труда, средств передвижения, одежды, оружия... В последние столетия освоение человеком новых этапов наращивания «силы», начиная от использования энергии открытого пара, движения воды и воздуха, сжатого пара, горения углеводородов, и наконец, атома, повлияло на уровень техногенности нашей эпохи [1]. Получаемую энергию человек использовал для создания техники через технологию. По этой причине технологии он уделял и уделяет большое значение. Время, когда субтрактивные (классические/традиционные) технологии в эпоху развитой промышленности главенствовали в техногенной деятельности человека, уходит. На место высокопроизводительным, серийным, но не гибким классическим технологиям приходят аддитивные, с ярким выраженным эффектом единичного производства и индивидуального отношения к клиенту, являющиеся своеобразным глотком свежего воздуха в меняющейся парадигме производственной реальности.

Со времен массового производства, рождённого автомобильной империей Генри Форда, произошли существенные изменения. Сегодня в погоне за лояльностью потребителя мы стали активно создавать и осваивать новые «постфордистские» концепции промышленности, например, такие, как «lean manufacturing» — бережливое производство, «agile» — активное производства, и «quick response manufacturing» (QRM) — быстро реагирующее производство [2]. В итоге такое «оптимизированное» производство добавило головной боли управленцам

предприятий, но помогло им обходиться меньшим количеством человеческих усилий, оборудования, изготавливать за меньшее время и на более компактных площадях то, что хочет клиент. Инновационные компании сегодня все чаще обращаются к аддитивным технологиям, устраняя ими слабые стороны классических производственных методов. Меньше оборудования, переналадки, электроэнергии, материалов, квалифицированной рабочей силы, сокращение брака — вот что стало теми триггерами всемирной известности послышного способа получения изделий на основе цифровых данных.

Сегодня важным конкурентным фактором является способность производства выпускать индивидуализированную продукцию по специальным заказам. Но это не является проблемой для «активных» компаний и производств с «быстрой реакцией», ведь они и создаются для этого. Тем не менее, возможности индивидуализации продукции ограничиваются гибкостью используемого оборудования, и для крупносерийного производства — это сложная и дорогостоящая задача.

Инновационный потенциал у «активных» компаний значительно выше, чем у «бережливых» и с «быстрой реакцией», особенно, если они располагают 3D-принтерами, что позволяет успешно решать персонализированные проблемы клиентов за короткие сроки.

Одним из действенных способов быстро реагировать на запросы рынка и удовлетворять все усложняющиеся индивидуальные проекты является использование скоростных технологических комплексов с возможностью аддитивной или гибридной обработки металлических изделий. Почему мы говорим именно о скоростных комплексах? Дело в том, что современные заводы, далекие от инноваций и разработки прорывной высокосложной, часто агрегированной продукции, не готовы к производству «на широкую ногу» принципи-

ально иных товаров чем те, на которые они сегодня без проблем находят сбыт. Тем не менее, топ-менеджеры «стабильных» предприятий ищут пути сокращения затрат и ускорения выпуска продукции. Здесь на помощь и приходят скоростные комплексы, позволяющие избавиться от неповоротливого наследия классического серийного производства.

Прямой подвод энергии и материала

Несмотря на то, что сегодня появляется все больше проектов, связанных с созданием перспективных металлопорошковых технологий с 3D-печатью связующим, например, Metal Binder Jetting или Multi Jet Fusion, мы не будем их рассматривать в данном обзоре по причине сложно прогнозируемой усадки в процессе спекания. Для многих современных предприятий машиностроительного профиля, не желающих проводить много времени с тестированием и отработкой технологий спекания, именно методы прямого подвода энергии и материала покажутся интуитивно понятными и рентабельными для решения нетривиальных задач. Давайте для начала разберемся в основных методах технологий прямого подвода энергии и материала, которые применяются в аддитивном производстве из металлов.

Семейство прямого подвода энергии и материала (англ. Directed Energy Deposition, DED) включает в себя ряд лучевых технологий, имеющих общий признак: конструктивно оборудование очень похоже на фрезерную обработку на металлообрабатывающих станках или роботизированных манипуляторах. Однако, есть и отличия в самих видах материалов. Это может быть металлопорошок или металлическая проволока.

Металлопорошковые DED технологии в качестве источника для наплавки могут использовать лазерный луч, как в случае с DED-P (англ. Powder Directed Energy Deposition), так и электронный луч, как с DED-EB (англ. Electronic Beam Directed Energy Deposition),

а также холодное газодинамическое напыление ХГН (англ. Cold Spray) на сверхзвуковых скоростях.

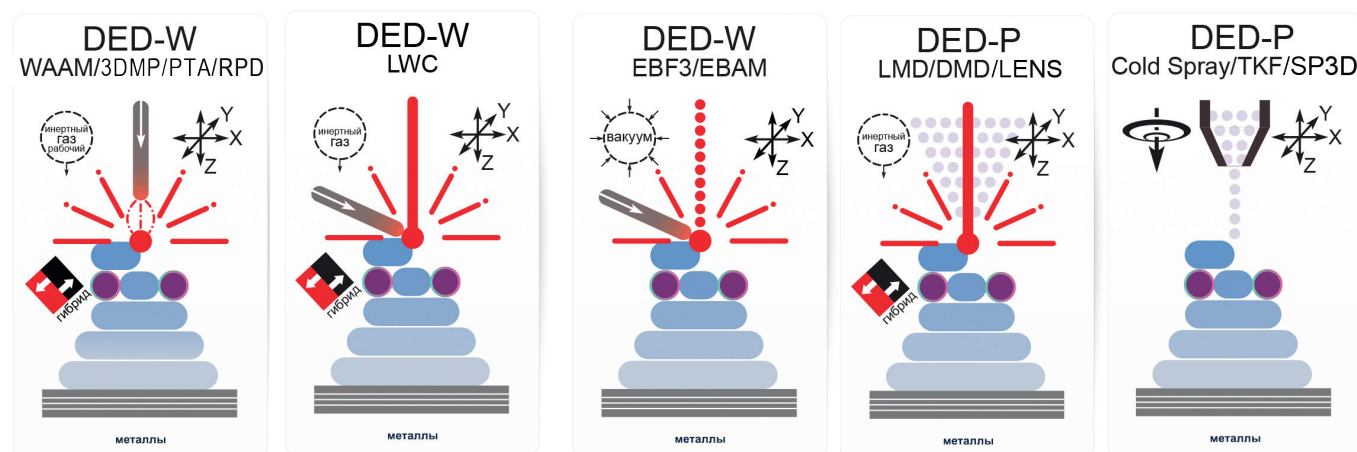
Вместо или в дополнение к металлопорошку сегодня все чаще начинают использовать металлическую сварочную проволоку в подсемействе DED-W (англ. Wire Directed Energy Deposition). Проволочная наплавка сегодня имеет целый ряд энергетических источников и их коллабораций друг с другом. Например, в технологии LWAM (англ. Laser Wire Additive Manufacturing) используется лазерный луч, в EBF3 (англ. Electron-beam Freeform Fabrication) — электронный луч, а в PAW (англ. Plasma Arc Welding) и WAAM (англ. Wire Arc Additive Manufacturing) — плазменная дуга, производящаяся плазменным источником или сварочным аппаратом. Также сегодня все чаще появляются гибридные комбинации PAW + WAAM, PAW + WAAM + проковка, DED + лезвийная ЧПУ механообработка, и другие.

В вышеперечисленных технологиях наплавки построение изделий производится как на трехосевом станке (обычно, это среднесложные крупногабаритные модели) или на многоосевом станке (5 осей на фрезерном станке-доноре, станке с собственной компоновкой, или с помощью роботизированного манипулятора/манипуляторов).

Оборудование DED проектируется таким образом, чтобы энергия от источника вместе с материалом, а иногда и инертным газом, подавалась в одну точку по принципу сходимости, где и происходит наплавление материала. В DED процессе достаточно легко реализовать восстановление сломанных/изношенных деталей, например, лопаток турбин, направляющих аппаратов, формообразующих пресс-форм, кронштейнов и т.п.

Заключительным этапом работ с получением качества поверхностей, согласно чертежа, зачастую после металлических аддитивных технологий является фрезерная, реже — токарная механообработка. Если аддитивную и субтрактивную технологии удастся реализовать на одном станке, то в этом случае говорят о ги-

Рис. 1. Схемы аддитивных технологий с прямым подводом энергии и материала [3]



бридном центре или гибридном производстве. Тогда на одном станке без его переналадки и внутрицеховой или контрактной логистики мы имеем дело с производством, которое берет лучшее из противоположных процессов, выигрывая в скорости и требуемой сложности деталей.

В популярной в России технологии LB-PBF/SLM (англ. Laser Beam Powder Bed Fusion) перечисленные выше методы для ремонта изделий реализовать крайне сложно на одном гибридном станке [4], поэтому в настоящем обзоре мы их рассматривать не будем.

Рассмотрим некоторые компании с уникальными решениями в сфере наплавки в России и зарубежом. Также обратим внимание на возможности их гибридного производства, если таковые имеются.

Успешные компании с технологией прямого подвода энергии и материала

Addilan [5] — достаточно молодая компания с небольшим модельным рядом WAAM установок для производства среднеразмерных и крупных изделий до 5 метров: Arclan P1200-4X и 1000-5X. Оба станка позволяют печатать изделия в закрытой инертной среде со специальной системой загрузки и выгрузки. Станки обеспечивают гибридное производство с наплавкой деталей с производительностью до 6 кг/час.

AddUp [6] — французская компания, специализируется на двух популярных технологиях аддитивного производства: LB-PBF и DED-P. Компания VeAM, входящая в AddUp Group, на данный момент предлагает две DED-P установки: Magic 800 и Modulo 400. Внутренние размеры камеры Magic 800, составляющие 1200×800×800 мм, лазер мощностью 2 кВт, быстрая замена головки с точной на более производительную и наоборот делают ее желанной для потребителей из сферы авиастроения и космонавтики.

AML3D [7] — австралийская компания, разрабатывающая центры ARCEMY для проволоочной наплавки по технологии WAM (DED-W/WAAM). Преимуществом разработки является модульная компоновка, предусматривающая вариативность длины рабочего стола, количества роботизированных манипуляторов. Особую гордость для AML3D представляет наличие заслуженных сертификатов и соответствие стандартам: DNV, Lloyd's Register, ISO 9001:2015, AWS, 3 bizSafe.

Big Metal Additive [8] — компания из Денвера (штат Колорадо, США), которая использует гибридный станок открытого исполнения для проволоочной WAAM наплавки изделий максимального размера 3,6 м. Компания берется за самые сложные проекты, порой, включающие топологически оптимизированные элементы, которые не так просто реализовать даже с помощью порошковых и более точных LB-PBF и DED-P технологий.

DMG MORI [9] — знаменитая немецкая станкостроительная компания, сравнительно недавно приобретающая компетенции в аддитивных технологиях. Их гигантский гибридный центр LASERTEC 6600 DED Hybrid предназначен для производства крупногабаритных изделий полного цикла до размеров $\varnothing 1010 \times 3702$ мм (3D-печать + ЧПУ механообработка) для авиастроения, космонавтики, и энергетики.

Evobeam [10] — немецкая компания, предлагающая три аддитивные технологии собственного производства. Одна из них — LWAM, причем с лазером в вакууме, реализованная в установке проволоочной наплавки с производительностью 200–500 см³/ч и романтическим названием WiLaVAM (англ. Wire Laser in Vacuum Additive Manufacturing). Применение вакуума позволяет избежать образования пор в сталях, титановых сплавах, суперсплавах и тугоплавких металлах.

Formalloy Technologies [11] — американская компания, специализирующаяся на газопорошковой наплавке целого ряда различных металлов и сплавов. Уникальной особенностью компании является программное обеспечение DEDSmart с системой управления с обратной связью, лазерами с переменной длиной волны, а также с магазином на 16 питателей металлопорошка FormAlloy ADF! FormAlloy ADF предоставляет беспрецедентные возможности для исследований по разработке новых, функционально-градиентных материалов FGM (англ. Functionally Graded Materials) и биметаллических структур.

Gefertec [12] — известная немецкая компания проволоочной наплавки по технологии 3DMP (DED-W/WAAM), предлагающая модельный ряд из 4-х станков в 3-х и 5-и осевом исполнении. В зависимости от модификации станков и сложности воспроизводимых изделий пользователям доступны модели для печати заготовок от 0,8 м³ с максимальным весом 500 кг и до 3,0 м³ с 3000 кг. Gefertec намеренно не стремится использовать роботизированные манипуляторы и финишную обработку заготовок резанием по причине заботы о качестве, легкости программирования, и простоте встраивания технологии в существующие производственные процессы любого машиностроительного предприятия.

InssTek [13] — популярная в России корейская компания, предлагающая ряд DED-P 3D-принтеров с рядом интересных решений, например, адаптивной системой с обратной связью, позволяющей анализировать высоту расплава в режиме реального времени, обеспечивая измерение и контроль каждого слоя. Также компания предлагает систему подачи порошка CVM с 6-ю независимыми питателями.

Lincoln Electric Additive Solutions [14] — дочерняя компания знаменитой американской транснациональной компании Lincoln Electric, выпускающей продукты для дуговой и роботизированной сварки,

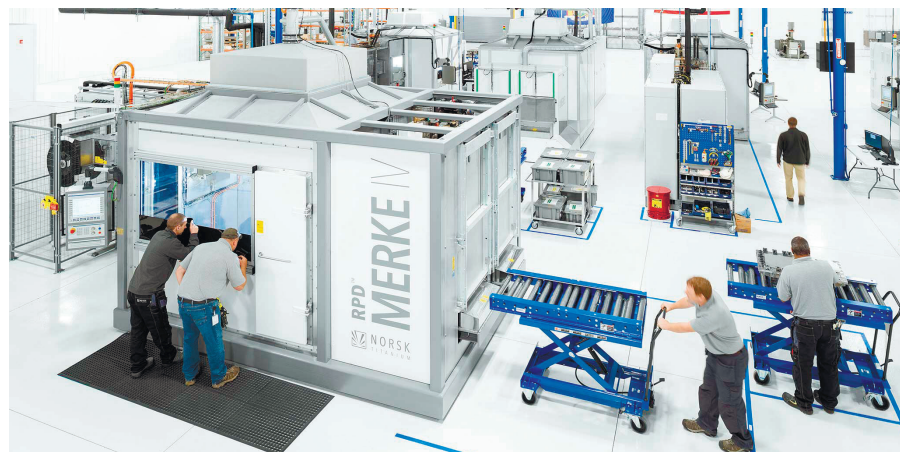
плазменной и газовой резки. В своих проектах контрактного производства компания использует технологию WAAM, собственную проволоку высочайшего качества, металлообрабатывающие ЧПУ станки для завершающего цикла производства.

Meltio [15] — испанская компания, предлагающая оборудование, ПО и интеграцию с роботизированными манипуляторами благодаря своей технологии WLMD (англ. Wire Laser Metal Deposition). WLMD является своеобразным гибридом технологий DED-P + DED-W и позволяет работать как двумя проволоками одновременно для увеличения скорости наплавки, так и с проволокой и порошком, позволяя «на лету» получать новые сплавы. Головка 3D-принтера Meltio M450 может содержать до 6 диодных лазеров по 200 Вт каждый, а небольшие габариты печати 145×168×390 мм будут достаточны для научных разработок или производства малогабаритных изделий.

MX3D [16] — голландская медийная компания, предлагающая роботизированную 8-и осевую систему M1 Metal AM для производства средних и крупных металлических деталей с использованием технологии WAAM (DED-W). Для WAAM технологии часто типично использование холодного переноса металла CMT (англ. Cold Metal Transfer) от лидера Fronius, а также скорости печати 1–5 кг/час.

Norsk Titanium [17] — является ключевым игроком в области аддитивного производства DED-W. Компания запатентовала собственную технологию RPD (англ. Rapid Plasma Deposition) для плазменного осаждения металлической проволоки. Их серийная система четвертого поколения под названием MERKE IV позволяет изготавливать титановые заготовки для авиастроения (имеется одобрение Федерального управления гражданской авиации США FAA) и космонавтики размерами до 900×600×300 мм с производительностью 5–10 кг/час. Один станок способен наплавлять до 10–20 тонн проволоки в год. Уже сегодня Norsk Titanium открывает внушительные производства с десятками

Рис. 2. Центр разработки и производства Norsk Plattsburgh в США с десятками установок MERKE IV (Norsk Titanium)



установок для 3D-печати титановых заготовок для авиастроения и других отраслей (рис. 2).

Optomec [18] — настоящий американский старожил в области технологий наплавки, диктующий моду и имеющий целый ряд последователей. Аддитивные и гибридные системы компании используют технологию LENS (DED-P) и могут оснащаться лазером мощностью до 3 кВт, магазином на 16 инструментов, и шпинделем со скоростью вращения 8 000 или 10 000 об/мин.

Prima Additive [19] — итальянская компания, специализирующаяся на двух популярных технологиях аддитивного производства: LB-PBF и DED-P. В DED-P компанией предлагается несколько решений, в том числе станок Laser Next 214 с потрясающим объемом печати 4140×2100×1020 мм. Laser Next 214 особенно впечатляет своей головкой для наплавки, которая перемещается одновременно по 3–5 осям, лазером в диапазоне мощности от 1 до 6 кВт.

Relativity [20] — эта американская компания известна своим проектом по напечатанной и запущенной ракете Terran 1. Relativity серьезным образом изменила привычные сроки производства ракет за 60-летнюю историю космонавтики. Ее 3D-принтеры Stargate являются самыми большими для проволочной наплавки и используются для печати ракеты Terran 1. Роботизированный Stargate 4-го поколения способен одновременно наплавлять до 4 проволок!

Известная американская компания **Sciaky** [21] предлагает обширный ряд оборудования, оснащенного технологией наплавки с электронным лучом в вакууме EBAM (англ. Electron Beam Additive Manufacturing), принадлежащей к семейству DED-W/EBF3. С помощью их 3D-принтеров можно создавать изделия размерами до 5790×1220×1220 мм или круглые детали диаметром до 2440 мм с производительностью платформы от 3,18 до 18,14 кг/час в зависимости от выбранного материала и параметров детали! Кроме того, процесс EBAM позволяет печатать небольшие детали с толщиной слоя 1 мм, а с помощью двойной подачи проволоки

можно комбинировать два разных металлических сплава в одном изделии, создавая биметаллические или градиентные структуры.

Sotimeco [22] — французская компания, специализирующаяся на технологии DED. Для сплавления металлопорошка и проволоки в оборудовании используют волоконный лазер мощностью 1 кВт и роботизированный манипулятор для производства заготовок размерами до 1500×500×500 мм. Головку для газопорошковой наплавки можно оперативно заме-

нять на подающую проволоку или совмещать работы двумя типами материалов за один цикл 3D-печати.

SPRINT [23] — австралийская компания и, пожалуй, самая успешная в технологии ХГН, в которой частицы металлопорошка разгоняются до сверхзвуковой скорости, в 4 раза превышающей скорость звука, причем без использования вакуума или инертной газовой атмосферы. В компании разработано новое сопло сверхвысокой мощности Phaser, которое позволяет осуществлять наплавку со скоростью 100 г/мин при температурах до 800°C меди, алюминия, алюминиевой бронзы, нержавеющей стали, титана, карбидов на основе никеля, хрома, вольфрама. В SPRINT разработано несколько производственных решений с размерами 3D-печати до $\varnothing 1000 \times 700$ мм, поставляемых также в составе передвижных 6-и метровых морских контейнеров.

Titomic [24] — знаменитая австралийская компания, предлагающая ручные и автоматические роботизированные системы по технологии ХГН с отсутствием деформаций и проблем с окислением деталей. Нанесение высокоэффективных покрытий или аддитивное производство с размерами изделий до $9000 \times 3000 \times 1500$ мм, широкие пределы регулировок производительности от 10 г/мин до 500 г/мин (30 кг/ч), а также самая низкая цена за металлопорошковые материалы — визитная карточка этой компании. Еще одно направление ХГН, которое практически невозможно реализовать с помощью высокотемпературных аддитивных технологий — это внедрение электронных датчиков, сенсоров, или нанесение металлических покрытий на такие чувствительные материалы, как стекло, керамика и пластик. Также технологию активно используют для защиты от коррозии, радиационного излучения, для ремонта, нанесения индуктивных покрытий.

Trumpf [25] — знаменитая немецкая компания со 100-летней историей, выпускающая оборудование для автоматизации металлообрабатывающего производства. Для целей 3D-печати у компании имеется две технологии: LB-PBF и DED-P. С помощью их фирменной технологии высокоскоростной лазерной наплавки HS-LMD (англ. High Speed Laser Metal Deposition) с предварительным нагревом порошка достигается значительное увеличение производительности вплоть до $1500 \text{ см}^2/\text{мин}$. А их наплавка с помощью зеленого лазерного излучения особенно эффективна для материалов с высокой отражательной способностью, например, меди, медных сплавов, бронзы, алюминиевых сплавов и благородных металлов. И это еще не все. Станки TruLaser Cell позволяют работать с большими заготовками до 4000 мм, осуществляя в гибридном режиме резку, сварку и наплавку металла.

Британская компания **WAAM3D** [26] является коммерческим проектом, реализованным благодаря десятилетиям научно-исследовательских работ университета

Крэнфилда (родоначальник WAAM технологии в мире). Их роботизированный 3D-принтер RoboWAAM способен работать с огромным количеством материалов проволок и создавать детали с максимальными размерами до $2000 \times 2000 \times 2000$ мм. Кроме того, оборудование поставляется с собственным программным пакетом WAAM3D, использующим интерферометрическую технологию для предоставления геометрических данных о трехмерном профиле каждого слоя в режиме реального времени.

ООО «ИксВелд» [27] — мощный и коммерчески успешный проект деятельности ученых, инженеров, конструкторов Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), инжиниринговых компаний и производственных предприятий Пермского края. Благодаря такой коллаборации ООО «ИксВелд» (бренд xWELD) сегодня предлагает следующие модели оборудования: компактный мобильный центр ProM для трехосевой наплавки с размерами рабочей зоны $800 \times 600 \times 600$ мм и производительностью до 5 кг/ч; порталный 3-х и 5-осевой центр Portal с размерами рабочей зоны до $6000 \times 3000 \times 1200$ мм и производительностью до 10 кг/ч; 4-х и 6-и осевые аддитивные роботизированные манипуляторы с рабочей зоной до $1500 \times 1500 \times 1500$ мм и производительностью до 9 кг/ч. К технологическому превосходству xWELD можно применить следующую формулу: PAW + WAAM + проковка, к которой они прибегают в зависимости от поставленных клиентом задач. Например, если нужно реализовать наиболее доступную по стоимости наплавку, то используется WAAM с СМТ, если же нужно обеспечить высокое качество — PAW, высокую производительность — PAW + WAAM, повышенные механические свойства — рекомендуется оснащение проковкой. Важным отличием компании от конкурентов является широкое применение алгоритмов предеформации для уверенности в точности получаемого физического объекта. Предеформация позволяет уменьшить припуск и сократить, если требуется, объем механообработки, в том числе на гибридном станке.

Примечательно, что ученые ПНИПУ долгие годы параллельно с университетом Крэнфилда (Великобритания) занимались вопросами, связанными с проковкой (последовательным ударным упрочнением) наплавляемых заготовок. Последовательное деформационное упрочнение обеспечивает снятие остаточных механических напряжений и повышенные механические свойства материала, близкие к свойствам поковок. Очевидно, что этот процесс значительно удлиняет производственный цикл, но и способствует улучшению качества заготовок. По этой причине бизнес и промышленность редко жалуют такое «растягивание» времени производимой продукции. Зато НИИ и вузы часто выбирают такие решения для своих изысканий несмотря на то, что проковку зна-

чительно проще организовать на 3-х осевом станке, чем на 5-и осевом (5 осей позволяют изготавливать более сложные изделия с одного постанова).

О востребованности предлагаемых решений компании говорит тот факт, что на ее опытно-производственном участке к 2023 году было выращено более 5 тонн заготовок по заказам промышленных предприятий.

Деликатность и сложность реализуемой геометрии изделий с помощью вышеперечисленных технологий должна быть очевидна: в большинстве случаев порошок выигрывает у проволоки. Однако, если речь идет о производительности, то заготовки из проволоки получаются значительно быстрее. Этот выигрыш также сохраняется при лезвийном удалении припуска, который может составлять 1-3 мм или до 10% от номинальных размеров детали.

Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ (ИЛИСТ) [28] — лучшая компания по DED-P технологии в России. Директор ИЛИСТ, профессор, доктор технических наук Г.А. Туричин начал проводить прикладные исследования газопорошковой наплавки еще в 2000 году, а основал предприятие в 2004 году на базе двух кафедр: «Лазерной технологии» и «Теории и технологии сварки». За долгие годы команда специалистов этих кафедр внесла большой вклад в развитие теоретических основ сварочных и лазерных технологий и разработку оборудования. Сегодня известно 4 модификации станков, самая крупная из которых имеет диаметр построения 2200 мм и высоту 1000 мм, а мощность лазера составляет 4 кВт.

Концерн «Калашников» [29] — ижевский производитель боевой и гражданской продукции решил попробовать свои силы в выпуске гибридного обрабатываемого центра. Станок IZH N600 сочетает в себе технологию лазерной наплавки и 5-ти осевую фрезерную обработку, позволяя изготавливать детали и сборочные единицы сложной геометрической формы массой до 300 кг и габаритами до 600×500×500 мм. Разработчики достигли главной цели — они создали станок полного цикла для ремонта собственных заводских штампов, пресс-форм и быстроизнашиваемой оснастки. Тем не менее, станок должен быть интересен и многим машиностроительным предприятиям, предприятиям энергетической, атомной, нефтяной промышленности, и многим другим.

ГК «Лазеры и аппаратура» [30] известна своим огромным ассортиментом различного оборудования для металлообработки, часто оснащенного лазерными источниками. Среди аддитивных комплексов в компании представлена как классическая установка МЛ6 для LB-PBF 3D-печати, станки лазерной сварки и наплавки проволокой, так и установки лазерной порошковой наплавки МЛ7 и МЛ7-С с размерами зоны построения до 1000*1000*800 мм и головкой коаксиальной подачи

порошка собственной разработки. Компания помогает внедрять на станки заказчика собственные отработанные решения, например, наплавочные головки для гибридных комплексов. Это помогает сократить путь освоения инновационных технологий и сразу приступить к насущным производственным проблемам, например, ремонту штамповой оснастки путем наплавки металла и механообработки на одном станке.

Выдающиеся проекты 3D-печати изделий

На что же всё-таки ориентироваться промышленнику, на какую сложность изделий можно рассчитывать с помощью рассмотренных технологий? Давайте рассмотрим некоторые выдающиеся примеры реализации различных технологических методов.

Технологический научно-исследовательский институт IRT Saint Exupéry совместно с компанией PolyShape, являющейся дочерней AddUp Group, разработали и напечатали один из самых сложных демонстраторов по технологии DED-P [31]. Данное сопло является частью проекта DePÔz, объединяющего 15 участников из промышленных и академических кругов всей цепочки создания ценности аддитивного производства из металлов. Данный образец является кульминацией нескольких лет исследовательской работы. Он имеет вес 18 кг и изготовлен из Инконеля 718 — жаропрочного материала, широко используемого в авиации, космонавтике и энергетике. Высокий уровень индустриализации технологии DED-P подтверждается ее возможностями, реализованными в данной детали: пересекающиеся перегородки, переменное сечение сопла с наклонной геометрией, изогридные (или «вафельные») элементы переменных размеров по поверхности сложной кривизны, добавленные (наращенные) элементы (рис. 3).

Институт лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ (ИЛИСТ), ООО «РусАТ», ОКБ «ГИДРОПРЕСС» завершили комплексный проект для аддитивного производства сложнопрофильных и

Рис. 3. Демонстрационный образец DePÔz — одна из самых сложных на сегодняшний день реализаций технологии DED-P для промышленного применения (технологический научно-исследовательский институт IRT Saint Exupéry, Франция)

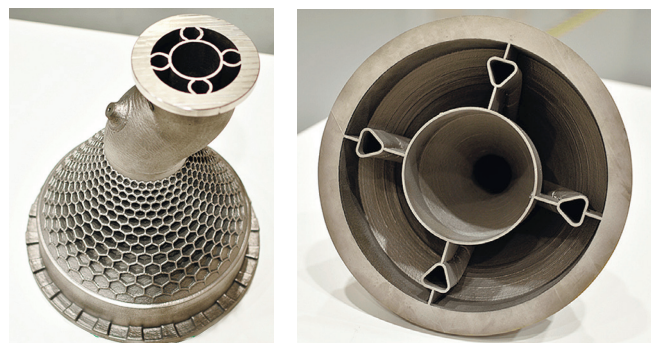
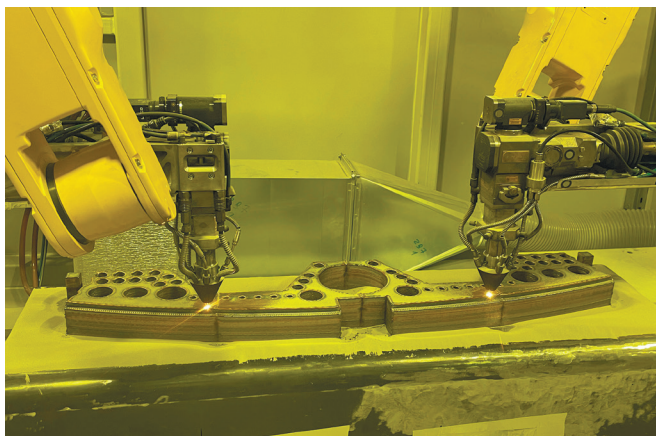


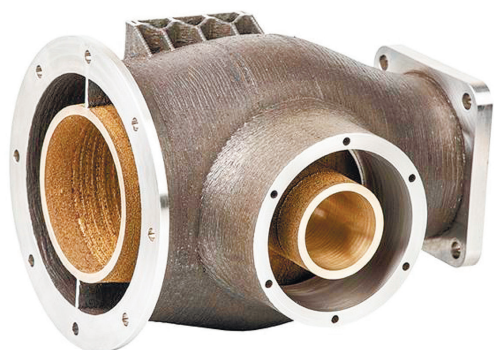
Рис. 4. Процесс изготовления выгородки внутрикорпусного устройства водо-водяного энергетического реактора двумя роботизированными газопорошковыми манипуляторами (ИЛИСТ, ООО «РусАТ», ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)



крупногабаритных изделий для нужд атомной энергетики. Они спроектировали и напечатали по технологии DED-P фрагмент выгородки внутрикорпусного устройства водо-водяного энергетического реактора [32]. Высота изделия составила 1 м, масса – более 700 кг, а время построения – 22 дня (рис. 4). Ранее для выпуска изделий такого масштаба требовались мощности крупного промышленного предприятия.

Достаточно высокий уровень сложности воспроизводимой геометрии, особенно в сравнении с традиционными методами производства – не единственная сильная сторона DED-P. Одним из важных преимуществ такого метода наплавки является полиметаллическая 3D-печать, ограниченная только количеством порошковых питателей (от 2 до 16). Питатели могут попеременно дозировать необходимое количество порошка для нанесения осаждающей головкой. Стоит отметить, что строить несколькими материалами с четкой границей или функционально-градиентными материалами FGM в этой технологии получается достаточно просто [33]. Последние позволяют эффективно решать вопросы с концентраторами напряжений между твердым и мягким материалом, которые обычно появляются у традицион-

Рис. 5. Возможности гибридной обработки из полиметаллов двухканального теплообменника из меди (внутренняя часть) и алюминия (внешняя часть) на станке LASERTEC 3D (DMG MORI, Германия)



ных технологий. Плавный переход с FGM от мягкого материала к твердому успешно их решает. Гибридные станки позволяют печатать детали и затем производить лезвийную механообработку ответственных поверхностей деталей под сборку или крепеж (рис. 5).

Однако, возможность работы с двумя и более материалами в одном цикле обработки пока еще не находит большого отклика у потребителей. Дело в том, что для использования таких инноваций у заказчика должна быть готова соответствующая научная и конструкторская база с квалифицированными и опытными специалистами.

Очередной выдающийся пример – известная у нас технология ХГН для специализированных покрытий, но до сих пор не снискавшая себе славы в 3D-печати. Можно отметить сразу три ее главных преимущества: лучшая в классе производительность (десятки кг/час); простая работа с обширным ассортиментом материалов, включая медь, титан, карбиды; отсутствие специфических требований к материалам, что положительно сказывается на их стоимости (рис. 6).

Рис. 6. Гильза медного ракетного сопла, весом 17,9 кг, напечатанная за 199 минут по технологии ХГН (SPEE3D, Австралия)



Рассмотрим, наконец, проекты, связанные с проволоочной наплавкой DED-W, которая полюбилась пользователям не только в мире, но и в России.

Компания Relativity произвела 85% компонентов 33-метровой ракеты-носителя Terrain 1 с помощью 3D-печати. Ступени ракеты и носовой обтекатель были напечатаны из алюминиевой проволоки по технологии WAAM (DED-W) (рис. 7–8), а 10 двигателей Aeon – по технологии LB-PBF. Наплавка проволокой осуществлялась с помощью огромных роботизированных 3D-принтеров Stargate собственной разработки.

Если вы считаете, что с проволоочной наплавкой можно производить только крупные заготовки достаточно простых форм, то это не так.

Хочется отдельно рассказать об уникальном совместном проекте, единственном в России и Республике Беларусь, и постараться убедить многих скептиков в том, что для аддитивных технологий нет ограничений в плане производства сложной продукции. Однако, выбор рентабельной технологии 3D-печати – это большой

Рис. 7. Ступень ракеты Terrain 1 (Relativity, США)

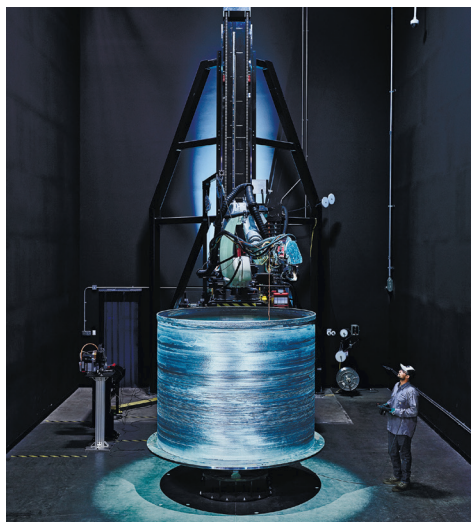


Рис. 8. Носовой обтекатель ракеты Terrain 1 (Relativity, США)



труд и опыт, который нужно приобретать за долгие годы или с помощью опытных интеграторов.

Топологическая оптимизация, генеративный дизайн, бионические конструкции, навеянные природой — все эти эпитеты и мощные современные алгоритмы инженерных САЕ (англ. Computer-aided engineering) стали справедливы в совместном проекте ООО «ИксВелд» (Россия) и ОАО «Могилевлифтмаш» (Республика Беларусь).

ОАО «Могилевлифтмаш» — успешный советский и белорусский производитель лифтов, более 50 лет обеспечивающий местный, российский и зарубежные рынки лифтовым оборудованием с выгодным соотношением цена-качество. Удивить рынок, открыть для себя новые горизонты разработки продукции и ее изготовления с помощью новаторских технологий — именно такую цель поставили перед собой эти компании.

Лифт — опасный объект с бескомпромиссными требованиями к его надежности. Чем нагляднее технология, чем меньше в ней скрытых явлений — тем она надежнее. Но при таком подходе есть шанс остаться на уровне технологий «забивания гвоздей», хотя и в ней есть скрытые от глаз явления. Традиционные подходы к производству несущих частей лифтовых конструкций задействуют, в основном, технологии работы с листовым металлом (раскрой, гибка, и т.д.) и на сегодняшний день вполне удовлетворяют большинство производителей и потребителей. Однако, степень удовлетворения снижается, а то и пропадает вовсе, как только лифт становится виден не только изнутри, но и снаружи. В последнее время частым в использовании материалом является стекло, которое «раскрывает тайны» лифтовых конструкций и может вызвать диссонанс между красотой и изяществом внутри кабины и простотой снаружи. В этом случае на помощь могут прийти аддитивные технологии,



Рис. 9. Слева — половина несущего корпуса лифта, изготовленного и собранного по обычной технологии, справа — половина корпуса лифта, напечатанная по WAAM технологии и сваренная в единое целое изделие (ОАО «Могилевлифтмаш»)

Рис. 10. Половина нижней опорной части корпуса лифта (ОАО «Могилевлифтмаш»)

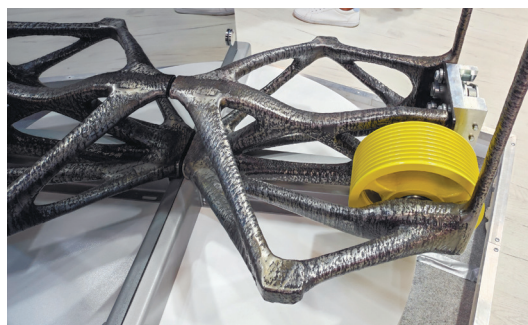
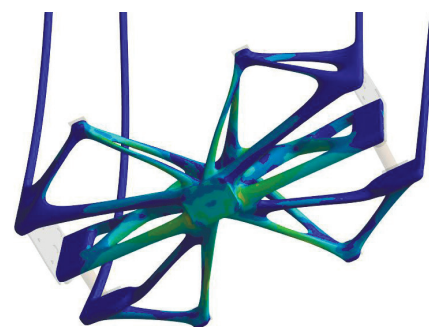


Рис. 11. Эквивалентные напряжения в режиме посадки кабины на ловители



которые предоставляют огромные возможности для созидания, но при этом требуют более высокого уровня профессионализма на этапах конструирования и изготовления. Коллектив отраслевой лаборатории лифтового машиностроения ОАО «Могилевлифтмаш» сочетанием подходов топологической оптимизации и генеративного дизайна, расчетов несущей способности, а также аддитивных технологий от ООО «ИксВелд» создали последовательно в виртуальном и реальном мирах каркас лифта – прочный, безопасный, но при этом изящный и притягивающий взгляд. Из особенностей проекта стоит отметить пустотелую модель каркаса, материал – доступная сталь 30ХГСА для использования внутри помещений (после постобработки поверхностей ее можно покрыть лакокрасочным покрытием), диаметр наплавляемой проволоки – 1,2 мм. В результате работ ООО «ИксВелд» напечатали несколько деталей, сварив их между собой. Общий размер ажурного изделия составил 540×745×2640 мм и был с успехом продемонстрирован на Международной выставке лифтов и подъемного оборудования Russian Elevator Week 2023 на ВДНХ в Москве (рис. 9–11).

ОАО «Могилевлифтмаш» отличается индивидуальным подходом к потребителям, реализуя в значительном объеме так называемые «специальные» лифты под условия и желания Заказчика, а в сотрудничестве с ООО «ИксВелд» этот подход расширен предложением, по сути, произведения искусства – приятного для восприятия, но бескомпромиссно надежного в использовании. Сотрудничество ОАО «Могилевлифтмаш» и ООО «ИксВелд» можно назвать техноджазом – слаженная и результативная импровизация.

Послесловие

Сегодня перед производителями лежит целое поле инноваций, способных радикально изменить их традиционный уклад как в проектировании продукции, так и в ее изготовлении. Выбор технологии – не простая задача, особенно, если заниматься ей самостоятельно. Выбор производственного партнера или комплексного интегратора, бережно сопровождающего предприятие в долгий и захватывающий путь покорения аддитивных технологий – крайне ответственная задача. Выбор, конечно, есть всегда, и всегда можно плыть по течению, не вкладываясь в развитие, оставаться на месте, пока продукция продается, и медленно деградировать. Или же проявлять активность, изучая новые и перспективные методы, обучая персонал, осторожно или оперативно внедряя новое инженерное мышление и скоростные технологии, которыми уже восторгается весь мир и передовые российские предприятия.

В конце хотелось бы привести статистику из отчета, подготовленного по данным 327 производителей в

США, Германии и Японии исследовательской компанией B2B International по заказу Materialise [34]. Согласно представленной информации, несмотря на сложности с внедрением 3D-печать остается в списке приоритетов большинства предприятий. 78% компаний, внедривших 3D-печать, продолжают инвестиции в них, избегая при этом аутсорсинга, а 46% увеличат их использование как минимум в два раза.

Выбор должен быть очевиден для рачительных собственников, который уже сделали многие мировые и российские компании. Каким судьбоносным будет ваш?

Литература

1. Производственный процесс как киберфизическая система связей. Червяков Л.М., Шептунов С.А. ИКТИ РАН.
2. Постфордизм – три ключевые производственные парадигмы нового столетия. Лузин А.Е., Бабанова Ю.В. Журнал «Менеджмент в России и за рубежом» № 6 год - 2013.
3. Трубашевский Д. С. Аддитивные зарисовки или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. – Воронеж: Изд. «Умное производство». 2021. ISBN 978-5-600-02999-6 (<https://layerlogic.tech/services-2/book/>)
4. Умнов, В. П. Построение, управление и моделирование роботизированных технологических комплексов гибридной обработки [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.П. Умнов, И.Н. Егоров ; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2023.
5. <https://www.addilan.com/en/>
6. <https://addupsolutions.com>
7. <https://aml3d.com>
8. <https://bigmetaladditive.com/>
9. <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-6600-ded-hybrid>
10. <https://www.evobeam.com/en/home/>
11. <https://www.formalloy.com/>
12. <https://www.gefertec.de/en/>
13. <http://www.insstek.com/>
14. <https://additive.lincolnelectric.com/>
15. <https://meltio3d.com/>
16. <https://mx3d.com/>
17. <https://www.norsktitanium.com/>
18. <https://optomec.com/>
19. <https://www.primaadditive.com/en>
20. <https://www.relativityspace.com/>
21. <https://www.sciaky.com/>
22. <http://sotimeco.fr/>
23. <https://www.spee3d.com>
24. <https://titomic.com/>
25. <https://www.trumpf.com>
26. <https://www.waam3d.com/>
27. <https://xweld.ru/>
28. <http://www.ilwt-stu.ru/>
29. <https://kalashnikovgroup.ru>
30. <https://laserapr.ru/>
31. <https://www.irt-saintexupery.com/fr/depouz-project-lmd-demonstrator/>
32. <https://www.smtu.ru/ru/viewnews/5820/>
33. Трубашевский Д. С. 3D-печать полиметаллами. Вы готовы? // Аддитивные технологии. 2022. № 2. С. 28–36.
34. <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/manufacturing-companies-3d-printing-struggle>