# ПЕРЕХОД К ПРОВОЛОЧНЫМ АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ – ТРЕНД ИЛИ НЕОБХОДИМОСТЬ?

Дмитрий Трубашевский, ООО «Современное оборудование», группа компаний «Солвер»

В последние годы в аддитивном сообществе все чаще рождаются новые стартапы, а также делаются попытки глубокой модернизации существующего аддитивного оборудования с целью увеличения скорости изготовления изделий, расширения ассортимента используемых материалов, снижения стоимости производства, увеличения размеров производимых изделий, улучшения металлургического качества и качества внешних поверхностей.

Аддитивные технологии находят всё больше приверженцев в традиционных производствах и фактически готовы стать новым классом промышленных стандартов. Так, например, металлическая 3D-печать всё шире используется в таких отраслях промышленности, как авиакосмическая и автомобильная, в энергетике, кораблестроении, медицине, а также в ювелирном деле, исследовательской деятельности, в создании артобъектов и в ряде других направлений. Практически всегда металлическую печать выбирают в том случае, когда требования разработчика, технолога, хирурга, стоматолога, ученого или дизайнера выходят за пределы возможностей традиционных видов производства. С одной стороны, это может быть, например, топологически оптимизированная конструкция, либо сложное изделие с объединением в единое целое нескольких элементов сборочного узла, либо индивидуальный имплантат или протез. Другой веской причиной перехода к аддитивной технологии может стать отсутствие цеховых площадей для размещения всего спектра механообрабатывающего оборудования или невозможность использования крайне дорогого и вредного литейного производства.

Сегодня, такие металлопорошковые технологии, как селективное лазерное сплавление (Laser Beam Melting, LBM), электроннолучевое сплавление (Electron Beam Melting, EBM), газопорошковая наплавка с прямым подводом энергии и материала (Direct Energy Deposition, DED), уже ассоциируются со стандартом печати металлических заготовок высокого качества. Конечно, деталям, полученным по этим технологиям, может потребоваться доработка: удаление поддержек, отделение от основы, улучшение шероховатости поверхности, а также внутренней структуры материала, что иногда занимает значительное время. Но вряд ли стоит рассматривать это как существенный недостаток, ведь в целом с помощью металлической 3D-печати удается существенно сократить время цикла, количество задействованного персонала, значительно увеличить конструктивную сложность изготавливаемых изделий. А дорабатывать с помощью механообработки, виброгалтовки, пескоструйной, термической или газостатической обработки зачастую необходимо лишь те поверхности или структуру объемных тел, которые нуждаются в плотном прилегании к другим деталям сборки, с целью минимизации напряжений и пористости или для достижения более высокого эстетического качества.

## Виды технологий проволочной наплавки

Сегодня набирают популярность аддитивные технологии, которые используют не порошок, а металлическую проволоку. Эти технологии в качестве теплового излучения

используют различные источники энергии. Например, технология электроннолучевой плавки (Electron-Beam Freeform Fabrication, EBF3) использует электронный луч, лазерная наплавка проволоки (Laser Wire Cladding, LWC) — лазер, электродуговая сварка в среде газа (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) — электрическую дугу, быстрая плазменная наплавка (Rapid Plasma Deposition, RPD) — плазму (рис. 1).

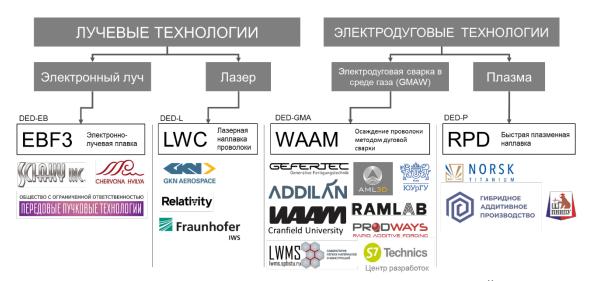


Рис. 1. Виды проволочных аддитивных технологий

Как видно из рисунка, наибольшая популярность у технологии WAAM. В ее основе лежит тот самый процесс электродуговой сварки (MIG/MAG), который еще в 1888 году применил наш соотечественник Н.Г. Славянов для сваривания вала паровой машины<sup>1</sup>. Таким образом, можно утверждать, что процесс электродуговой сварки сегодня изучен настолько досконально, что режимы, процессы, металлы, сварочные флюсы, головки для автоматической сварки, диаметр проволоки, защитные газы легко подбираются в полном соответствии с поставленной задачей для получения гарантированно высокого качества шва. Зачастую в цикле изготовления с помощью проволочной наплавки применяют технологии лезвийной механообработки для придания ответственным поверхностям деталей формы и шероховатости по чертежу (рис. 2).

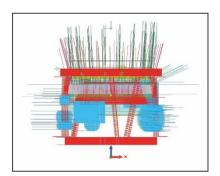






Рис. 2. САМ-модель, заготовка после 3D-печати и готовый корпус редуктора (EMAG, изготовлено на оборудовании Gefertec arc405)

Почему же разработчики и пользователи 3D-печати стали проявлять интерес к использованию проволоки? Проволочные технологии было бы разумнее сравнивать с традиционными технологиями лезвийной обработки и литья, а также их влиянием на полный цикл производства продукции, однако в настоящем обзоре мы постараемся

-

<sup>1</sup> https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрическая дуговая сварка

систематизировать текущую ситуацию в разрезе металлических аддитивных технологий. Также дадим сравнительную оценку основных технических характеристик устройств и их возможностей. А примеры удачных применений технологий в этом сегменте можно найти в сети Интернет.

#### Типы систем

Компоновочная схема оборудования проволочной наплавки на данный момент представлена тремя основными разновидностями (рис. 3). В составе робототехнического комплекса (РТК) могут использоваться один, два или более роботов (рис. 4). Каждый из роботов может выполнять однотипные операции по наплавке, тем самым увеличивая общую производительность и габариты обработки. Также возможна схема задействования одного робота для наплавки, а второго – для не силовой фрезерной обработки.

При использовании классической станочной схемы в виде портала или консоли становится доступным внедрение неразрушающего контроля, полноценной фрезерной обработки, а также обкатки и проковки. Плюсом к этому можно отнести также более высокую безопасность, точность позиционирования, качество наплавки, удобство и интуитивность программирования, отсутствие необходимости калибровки и неравномерной наплавки в углах и по краям детали, как при использовании роботов. Стоимость РТК будет несколько дешевле, чем наплавка с помощью систем станочного типа при равном количестве рабочих органов: горелок, роботов, лазерных головок, плазмотронов, электроннолучевых пушек.

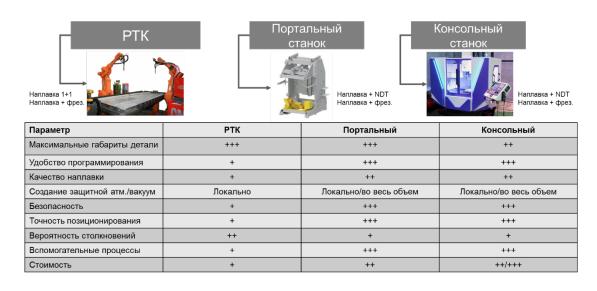


Рис. 3. Типы систем проволочной наплавки



Рис. 4. Действующий прототип фабрики по 3D-печати космических ракет Relativity Space

# Материалы

Пользователи металлопорошковых аддитивных систем по достоинству оценят тот факт, что стоимость сварочной проволоки, в зависимости от металла, дешевле порошка в 2-10 раз. Кроме того, доступен широкий ассортимент материалов проволоки, а это сотни наименований, доступных на рынках стран Европы, в США, Китае и России. Например, не составит большого труда найти качественную проволоку из титана и его сплавов, жаропрочных сплавов, тантала, вольфрама, ниобия, молибдена, нержавеющей, малоуглеродистой, инструментальной, мартенситно-стареющей стали, инвара, сплавов алюминия, циркония, бронзы, меди, медноникелевых, магниевых сплавов и др.

Со специальной промышленной проволокой дела обстоят несколько сложнее, она дороже сварочной, но может быть изготовлена под требования заказчика достаточно простыми технологическими методами. Другими словами, за многие десятилетия производители сырья насытили мир сварки всеми возможными марками проволоки с однородными механическими и физическими свойствами, что в отличие от металлопорошковых технологий позволяет не тратить время на подбор или получение материала с необходимыми свойствами. Крайне важным также является практически 100-процентное использование материала и его простое хранение, в отличие, от порошка. Большой потенциал имеет возможность изготовления биметаллических и полиметаллических изделий за один технологический цикл.

#### Энергетические источники

Если в уже ставших классических аддитивных технологиях используется преимущественно лазер средней и высокой мощности, то в проволочной наплавке наибольшее распространение получили электродуговые источники энергии. Это сварочные аппараты таких известных производителей, как Fronius International GmbH (например, у Gefertec GmbH, Германия), чуть реже — лазерные (волоконные, дисковые, диодные) мощностью до 4 кВт (например, у Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, Германия) и плазменные (например, как у Norsk Titanium AS, Норвегия). Заканчивают список электроннолучевые установки мощностью до 42 кВт (например, у Sciaky Inc., США), а также комбинированные источники (например, плазма и плавящийся электрод с плазмотроном обратной полярности, как у российской компании «Гибридное аддитивное производство»).

При технологии WAAM в анодной области температура доходит до 4000°С, а в дуговом промежутке — до 7000-10000°С (рис. 5). При использовании плазмы и электронного луча в сварочной ванне может достигаться температура 12000°С. Более высокая температура увеличивает текучесть расплавляемого металла, что является определенным плюсом технологий EBF3 и RPD. Однако важно понимать, что для охлаждения может потребоваться более длительное время. Если изделие не очень большое, то наплавленный слой может не успеть охладиться для нанесения нового слоя, чего требует любая технология проволочной наплавки. В итоге все преимущества от более высокой скорости могут быть уравновешены процессом охлаждения.

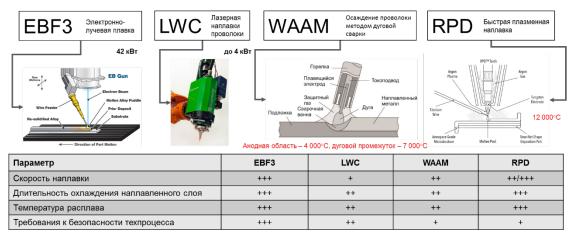


Рис. 5. Энергетические источники сварки

#### Рабочая зона

В отличие от лазерных и электроннолучевых аддитивных технологий, работающих с металлическим порошком, РТК и станки для проволочной наплавки заметно выигрывают в размерах получаемых деталей. Обычно полезный рабочий объем превышает 1 м³, что не может не воодушевить как активных пользователей, так и потенциальных потребителей аддитивных технологий. Среди серийно выпускаемого оборудования «гигантскими» размерами рабочей камеры может похвастаться компания Sciaky Inc. с установкой EBAM 300 с рабочей зоной 5791×1219×1219 мм. Компания Gefertec GmbH предлагает установку агс603 в 3-осевой версии с размерами зоны построения 1200×1500×1600 мм и весом изделия до 3000 кг (в 5-осевой версии максимальный размер изделий составляет Ø900×700 мм). Однако по требованию заказчика компания может изготовить оборудование с любыми размерами. РТК обычно не имеют ограничений особенно для 3-осевого исполнения (рис.6), но в этом случае робот должен перемещаться по направляющим с ухудшением точностных характеристик (рис. 7). Использование 5-осевой обработки возможно только с применением глобусных поворотных столов, что сильно уменьшает рабочий объем.



Рис.6. Самый большой в мире напечатанный лонжерон крыла из алюминия длиной около 6 метров (Центр сварочной техники и лазерной обработки Крэнфилдского университета, Великобритания)



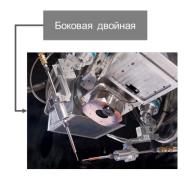
Рис. 7. Центр сварочной техники и лазерной обработки Крэнфилдского университета, Великобритания

# Подача проволоки

Подача проволоки в зону плавления может быть как коаксиальная, так и боковая, а для систем Sciaky Inc. с технологией EBAM — двойная (рис. 8). При использовании двойной подачи проволоки производительность вырастает почти в два раза, но одновременно с этим может несколько ухудшиться качество. Применяя коаксиальную подачу проволоки можно полноценно использовать пять рабочих осей устройства, чего нельзя сказать при использовании боковой подачи, потому как ограничивается свобода поворота энергетического источника при описании сложных траекторий.







Параметр	Коаксиальная	Боковая	Боковая двойная
3-осевая наплавка	+++	+++	+++
5-осевая наплавка (трудность поворота)	+++	++	++
Скорость наплавки	++	++	+++

Рис. 8. Варианты подачи проволоки

#### Качество

Металлургическое качество получаемых изделий с помощью наплавки проволокой заметно выше всех популярных на сегодняшний день аддитивных технологий. Проволока, в отличие от порошка, имеет гомогенную структуру без оставшихся при его производстве газов, включений частиц с неудовлетворительной морфологией и формой, проблем с недостаточной или избыточной температурой сплавления, и т.п. Высокотемпературная ванна расплава получается достаточно большой и однородной (рис. 9). Молодым компаниям удается достичь относительной пористости наплавленного металла на уровне 0,9-2%. Серьезные игроки рынка применяют самые совершенные технологии, нативное программное обеспечение, что в совокупности позволяет получать наплавку без трещин и несплавлений в зоне термического влияния и с единичными порами.

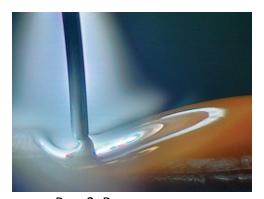


Рис. 2. Ванна расплава

Тем не менее, в проволочных технологиях следует внимательно следить за качеством защитной сварочной смеси (аргон, гелий и их смеси являются предпочтительными технологическими газами для аддитивного производства, а активные компоненты  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  или  $H_2$  могут быть добавлены для тонкой настройки свойств материала), поскольку их состав и покрытие зоны сплавления влияет на качество результата и наличие окислов на поверхности детали. Более высокое качество поверхности деталей остается за технологией электроннолучевой наплавки, поскольку процесс происходит в вакууме.

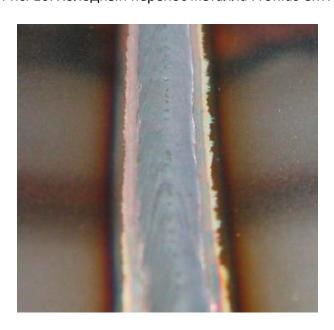
Однако при технологии EBF3 в корне шва может появляться полость, поэтому обязательно следует проводить контроль качества. Катодная очистка комбинированной технологии «плазма плюс плавящийся электрод» также позволяет получать хорошее качество

благодаря удалению оксидной пленки. В классической технологии WAAM на поверхность детали оказывается достаточно высокое тепловое воздействие. За счет этого повышается степень термической деформации заготовки (на степень деформации также влияет качество атмосферы, количество углеводородов и влаги). Для уменьшения коробления наиболее продвинутые компании, например, Центр сварочной техники и лазерной обработки Крэнфилдского университета и Gefertec GmbH в своих технологиях — WAAM и 3DMP соответственно применяют последние разработки лидера рынка, компании Fronius International GmbH — процесс холодного переноса металла (Cold Metal Transfer, CMT) с уменьшенным вводом тепла (рис. 10).

Известны случаи использования источников питания других компаний, например, EWM AG с технологией ограниченного тепловложения EWM-coldArc (рис. 11). Эти процессы позволяют осуществлять перенос металла из плавящегося электрода в сварочную ванну при пониженных температурах за счет короткого замыкания и возвратно поступательного движения (с частотой 70-130 Гц). В результате этого получается стабильная и контролируемая дуга, высокая скорость (до 30% роста производительности при сварке стали и до 10-кратного роста производительности при сварке алюминия), отсутствие брызг и возможность наплавлять трудносвариваемые материалы.



Рис. 10. Холодный перенос металла Fronius CMT



# Деформационная обработка

Некоторые производители, например, Центр сварочной техники и лазерной обработки Крэнфилдского университета и группа компаний «Гибридное аддитивное производство» совмещают наплавку с послойной обкаткой — проковкой. Это позволяет получать механические свойства на уровне или выше основного материала с изотропной структурой, уменьшить размер зерна и снять остаточные напряжения в детали (рис. 12).

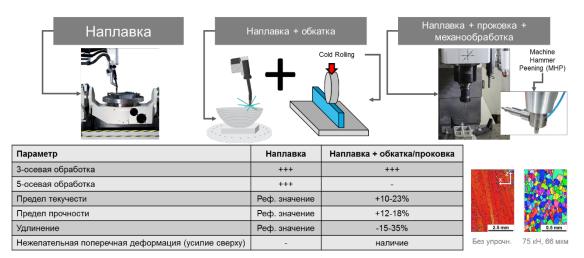


Рис.12. Варианты дополнительной деформационной обработки в составе оборудования

Такая обкатка может происходить при помощи прижимного ролика сверху или сбоку, двумя роликами, а также ультразвуковой или пневматической ударной обработкой (рис. 13). Проковка эффективна для снятия остаточного напряжения в местах, недоступных для ролика. Наряду с преимуществами такого метода упрочнения стоит отметить увеличение времени цикла и невозможность использования 5-осевой обработки, поэтому этот метод снижения пористости, внутренних остаточных напряжений и увеличения усталостных характеристик пока не нашел широкого применения.

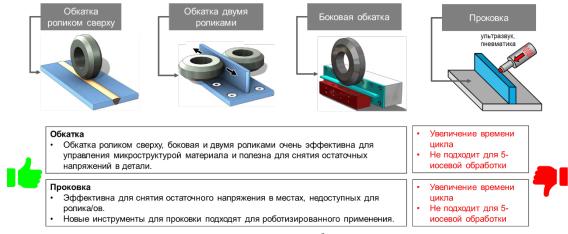


Рис. 13. Виды обкатки

# Безопасность

В целом, вопросы безопасности при работе с системами WAAM, RPD, EBF3 в составе станков с запираемыми дверцами или рольставнями решены на высоком уровне (рис. 14), но достигается это различными средствами.



Рис. 14. Высокий уровень безопасности на Gefertec arc405 обеспечивается рядом технических решений

Важным условием обеспечения безопасности работы является не только запрет нахождения персонала в непосредственной близости к зоне наплавки и к источнику излучения, но и доступ уполномоченных лиц к силовым, электронным, фильтрующим элементам, системам охлаждения, газовым баллонам, и т.п. Для этих целей применяются как технические средства (поворотные краны, запираемые секционные выключатели, огнетушители, датчики, фонари), так и организационные меры. При использовании технологии ЕВF3, в дополнение к вышеуказанным мероприятиям, в связи с использованием электронного луча, необходимо иметь специалиста по радиационной защите и осуществлять регулярную проверку радиационной безопасности, т.к. при больших мощностях часть энергии электронов переходит в рентгеновское изучение, что вредно для персонала. К оборудованию с потенциальной опасностью получения травм можно отнести практически все РТК, кроме их закрытых вариантов, как у австралийской компании AML Technologies (рис. 15).



Рис. 15. Комплекс Arcemy от AML Technologies, Австралия

# **Автоматизация**

Высокое потребление проволоки в технологиях проволочной наплавки требует либо частой замены катушек с материалом, либо использование специальных барабанов для сварочных работ. Первые, при весе материала 5-18 кг, имеют резерв на 2-8 часов в зависимости от скорости наплавки, вторые могут питать оборудование на протяжении 50-250 часов при емкости барабана 250-500 кг. Использование барабанов экономит время на замену 13-26 катушек, позволяет использовать оборудование с высокой степенью автоматизации (рис. 16) и строить массивные детали без необходимости постоянного присутствия обслуживающего персонала.



Рис. 16. Автоматизация подачи проволоки

### Производительность и точность

Все проволочные технологии кратно превосходят по скорости популярные металлические аддитивные технологии, реализованные в металлопорошковых 3D-принтерах (рис. 15). Например, производительность установок, базирующихся на технологии WAAM/3DMP, достигает 5 кг/ч или 450-1000 см³/ч в зависимости от материала. Плазменная технология RPD от Norsk Titanium уверенно работает на скоростях 5-10 кг/ч. Электроннолучевая плавка EBAM использует типовую производительность 3-9 кг/ч и имеет потенциал до 11,34 кг/ч. А вот использование комбинированных источников, например, плавящегося электрода и плазменной наплавки, по заверению разработчика может поднять уровень производительности до 15 кг/ч!

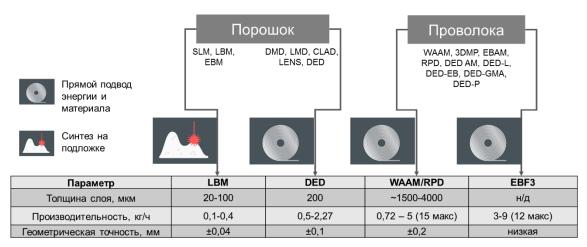


Рис. 17. Сравнение производительности и точности систем аддитивного производства по металлу

С другой стороны, геометрическая точность и повторяемость проволочных технологий значительно ниже, чем у газопорошковой наплавки DED и выборочного сплавления LBM. Но если принять во внимание производство изделий, как заготовок под механообработку – то точностные характеристики наплавки не играют столь большой роли.

## Эффективность технологий проволочной наплавки

Как уже говорилось вначале статьи, технологии проволочной наплавки уместнее всего сравнивать с традиционными технологиями, чаще с фрезерной обработкой. Наиболее

ощутимый эффект в этом случае будет проявляться при работе с труднообрабатываемыми материалами: коррозионностойкими и жаропрочными сталями и сплавами, материалами с высокой твердостью и прочностью, сплавами на основе титана и тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, ниобий). Особенности обработки этих материалов заставляют уменьшать скорость резания и способствуют снижению стойкости инструмента. Твердые оксиды и нитриды титана, возникающие при лезвийной обработке, а также малая теплопроводность титановых сплавов влияют на стоимость и время получения готового изделия. Тугоплавкие металлы обладают высокой твердостью, высокой способностью на износ. Добавим к этому необходимость обработки средне размерных и крупных заготовок с уходом в стружку 60-90% материала, и выбор проволочных аддитивных технологий становится очевидным, ведь КИМ при ее использовании может достигать 90-100% (рис. 18). При определенных оговорках проволоку удобнее и гораздо выгоднее использовать и как замену металлопорошковых аддитивных технологий.

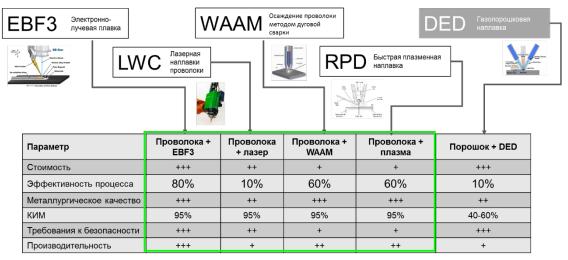


Рис. 18. Основные показатели эффективности

Большое значение при выборе технологии проволочной наплавки или разработке собственного решения имеет программное обеспечение, которое позволит осуществлять программирование многочисленных параметров рабочего органа станка или робота:

- импорт данных САD,
- поддержка гибридного модуля для фрезерной или ударной обработки,
- симуляция,
- создание траекторий,
- контроль температуры в зоне расплава, защитной атмосферы,
- управление столкновениями,
- пополняемая база данных,
- мониторинг,
- учет деформаций и т.п.

Также важным является наличие неразрушающего контроля, визуальный анализ с помощью камер, 3D-сканирование. Другими словами, важно управлять технологией в режиме реального времени. Это позволит избежать проблем и повысить качество, надежность и скорость процесса.

Проволочная наплавка позволяет изготавливать детали с припуском 1-3 мм на механообработку, что обеспечивает снижение количества стружки в 10 и более раз.

Например, соотношение закупленного и использованного материала при традиционном производстве нервюры крыла<sup>2</sup> может составлять 37 раз: из заготовки в 657 кг получают готовое изделие весом 18 кг! А переход от традиционных методов производства к использованию проволочной наплавки может обеспечить сокращение производственных затрат на 60-70% (рис. 18).

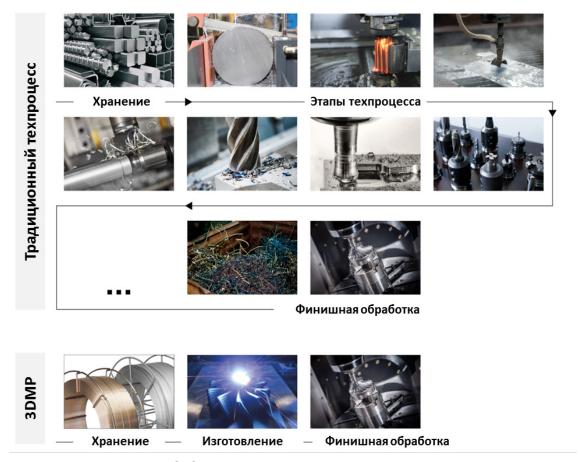


Рис. 19. Сокращение производственных затрат

Серийное производство с выгодой уже на первой детали, не сложное техническое обслуживание и ремонт оборудования, легкая корректировка изменений, задействование принципов оптимизации формы — еще один ряд аргументов в пользу проволочной наплавки.

Сегодня технологии с аддитивным принципом формирования изделий из проволоки проходят сложный путь от популяризации, испытаний, экономического обоснования, до попыток внести свою лепту в разработку устройств, соответствующих возможностям лидеров или в чем-то превосходящих их. Пока в мире существует всего несколько компаний, производящих оборудование серийно, например, Gefertec GmbH, Sciaky Inc., ведь добиться высокого качества, надежности и обеспечить выполнение промышленных стандартов под силу компаниям с крупными инвестициями и солидным опытом работы. Поэтому многие зарубежные производители проволочных аддитивных установок предпочитают оказывать услуги, используя оборудование своего производства, а

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> REPORT Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison, Welding Engineering and Laser Processing Centre, Date: April 22, 2015

российские изобретатели и вузы для осуществления проектов внутри своих заводов и лабораторий используют собственные наработки.

Для применения проволочных аддитивных технологий предлагается достаточно много моделей с разными энергетическими источниками и разной стоимостью. Другой путь – разрабатывать собственную технологию, опираясь на российский и зарубежный опыт, что неизбежно потребует немало времени.

На вопрос о том, что проволочные технологии — это тренд или необходимость, у каждого предприятия будет свой ответ, исходя из назревшей необходимости, технологической заинтересованности, возможности инвестировать.

Для себя мы сделали выбор в пользу технологии электродуговой наплавки WAAM/3DMP, как наиболее изученной, надежной, гибкой, а также доступной. Серийно производимое оборудование Gefertec является, по нашему мнению, золотой серединой и оптимальным вариантом как для исследователей, так и настоящих производств.