

## РАЗВИТИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Ковалевский С. В., Гончарова Н. С.**

Показана принципиальная возможность дальнейшего развития аддитивных технологий при изготовлении деталей методом наращивания. Экспериментально определены условия рационального осуществления процесса при послойном наращивании экспериментальных образцов. Установлено, что наряду с величиной технологического тока и накопленного разряда решающее значение имеют частота и продолжительность контакта в течение одного периода вибраций рабочего электрода. Сформулированы основные требования к составу и параметрам технологического оборудования. Даны рекомендации по параметрам предложенного технологического процесса

Показана принципова можливість подальшого розвитку адитивних технологій при виготовленні деталей методом нарощування. Експериментально визначені умови раціонального здійснення процесу при пошаровому нарощування експериментальних зразків. Встановлено, що поряд з величиною технологічного струму і накопиченого розряду вирішальне значення мають частота і тривалість контакту протягом одного періоду вібрацій робочого електрода. Сформульовано основні вимоги до складу і параметрів технологічного обладнання. Дано рекомендації по параметрах запропонованого технологічного процесу.

The principal possibility of further development of additive technology in the manufacture of parts by capacity. The experimentally determined the conditions of the management process with stratified build experimental samples. It is found that along with the current value of the process and the accumulated discharge crucial frequency and duration of contact in one period of vibration of the working electrode. The basic requirements for the composition and parameters of the process equipment. The recommendations on the proposed parameters of the process

Ковалевский С. В.

докт. техн. наук, проф. каф. ТМ ДГМА  
kovalevskii@dgma.donetsk.ua

Гончарова Н. С.

магистр ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.8

**Ковалевский С. В., Гончарова Н. С.**

## **РАЗВИТИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Аддитивное производство (Additive Manufacturing, AM) является технологической концепцией, активно разрабатываемой во всех высокоразвитых странах со второй половины XX века. Принцип ее заключается в том, что изделие создается при помощи послойного добавления материала различными способами, например, наплавляя или напыляя порошок, жидкий полимер, композитный материал. Эта концепция призвана дополнить традиционные методы производства, основанные на удалении первичного материала. Технология позволяет получать даже микронные внутренние полости различной конфигурации (цилиндрические, конические, спиральные каналы, ячейки и пр.), которые являются недоступными для традиционных способов изготовления изделий [1–4].

Это перспективная технология изготовления изделий единичного и мелкосерийного производства во многих отраслях промышленности (машиностроение, авиационная и космическая отрасли, медицина и пр.). Использование данной технологии позволяет изготавливать детали с внутренними криволинейными отверстиями, недоступными изготовленияами другими методами обработки. Прямое производство с САПР и отсутствие множества переходов и изменения позиционирования детали на станке, как при традиционных методах изготовления, позволяет получить высокую точность изделия [5–7].

Таким образом, рассматривается процесс объединения материала с целью создания объекта из данных – оцифрованной модели, отличается от "вычитающих" производственных технологий. Под «вычитающими» технологиями подразумевается механообработка - удаление материала из массива заготовки.

Действительно, существует два основных способа производить изделия. Первый — при помощи механической обработки, постепенно избавляясь от всего лишнего: отрезая, отбивая, высверливая. Второй — аддитивный, постепенное добавляя материал и наращивая необходимую форму [2, 8, 9].

Ранее эти технологии еще называли технологиями быстрого прототипирования [1, 10, 11, 12], но так как изготовление моделей и макетов на 3D-принтерах превратилось в создание конечных и серийных продуктов, использовать термин «прототип» нельзя. Вопрос терминологии отдельно рассматривался в рамках деятельности организации ASTM International (American Society for Testing and Materials), которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг. ASTM (в своем стандарте ASTM F2792.1549323-1) определяет аддитивные технологии как процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от «вычитающих» производственных технологий» [10–13].

Классификация аддитивных технологий (по ASTM) включает следующие технологии [2, 9, 11, 12, 14]:

- Material extrusion – «выдавливание материала»;
- Material etting – «разбрызгивание материала» «струйные технологии»;
- Binder jetting – «разбрызгивание связующего»;
- Sheet lamination – «соединение листовых материалов»;
- Vat photopolymerization – «фотополимеризация в ванне»;
- Powder bed fusion – «расплавление материала в заранее сформированном слое»;

- Directed energy deposition «прямой подвод энергии непосредственно в место построения».

К наиболее распространенным технологиям Bad Deposition можно отнести технологии, которые включают [9, 14]:

- SLA (Stereo Litography Apparatus) — послойное выращивание модели с помощью ультрафиолетового лазера;

- SGC (Solid Ground Curing) — многоэтапный процесс с использованием ультрафиолетового лазера и фрезерной обработки каждого слоя;

- SLS (Selective Laser Sintering) — лазерное спекание порошковых компонентов.

К наиболее распространенным технологиям Direct Deposition можно отнести технологии, которые включают [11, 12, 14]:

DMD - Direct Metal Deposition (компания POM, США);

LENS - Laser Engineered Net Shape (Optomec, США);

DM - Direct Manufacturing (Sciaky, США);

MJS - Multiphase Jet Solidification (Fraunhofer IFAM, Германия FDM, США) и др. — прямое или непосредственное осаждение (материала), т. е. непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали [5, 15–18].

Аддитивные технологии отличаются друг от друга выбором материалов и способа их нанесения, однако во всех случаях создание модели основывается на послойном наращивании.

Наиболее распространены два способа нанесения: струйный и лазерный.

К струйному способу относятся такие технологии, как моделирование методом наплавления (Fused deposition modeling).

К лазерному способу относится послойное ламинирование (Laminated object manufacturing), селективное лазерное плавление (Selective laser melting), селективное лазерное спекание (Selective laser sintering), директивное лазерное спекание (DMLS), лазерная наплавка металла (Laser metal deposition) и лазерная стереолитография (Laser stereolithography), изготовление расслоенных продуктов (LOM) и другие [6, 7, 19].

Особенности аддитивных технологий:

- значительная экономия средств при запуске производства (данные, необходимые для запуска производства, могут храниться в цифровом виде, и воспроизводятся без материальных затрат;

- возможность внести поправки на любом этапе скорректировав CAD-файл;

- быстрая адаптация к постоянно меняющимся условиям на рынке - размер партии можно легко поменять в любую минуту в зависимости от повышения или снижения спроса;

- аддитивные технологии позволяют печатать партии, в которых каждый предмет немного отличается от предыдущего, что позволяет создавать производственные линии персонализированных товаров;

- доступность и отсутствие привычных ограничений.

В Европе расположены крупнейшие производители промышленных 3D-машин: Voxeljet, SLM Solutions, EOS GmbH, Concept Laser, Realizes (все пять – Германия), Arcam (Швеция), Phenix Systems (Франция), Renishaw (Великобритания) [9, 18, 20].

В США сейчас сосредоточены около 40 процентов произведенных в мире аддитивных машин, разработки в этой сфере активно финансирует агентство DARPA. При поддержке руководства Соединенных Штатов создается ряд центров по созданию новых технологий.

Научный национальный фонд и NASA – выступили инициаторами создания Национального института инновационного производства America Makes. Эта организация способствует сотрудничеству лидеров бизнеса и научных учреждений, помогая продвижению инновационных разработок в аддитивных технологиях на мировом рынке. В работе института

участвуют около 100 компаний, некоммерческих организаций и государственных учреждений [6, 18].

Важным шагом стало строительство Digital Lab for Manufacturing в Чикаго. На этот проект Минобороны уже выделило \$ 70 млн, еще \$ 250 млн поступлений ожидается от представителей индустрии, образовательных учреждений, правительства и общественных партнеров. Digital Lab будет иметь общих партнеров с America Makes, это такие промышленные гиганты, как Rolls-Royce, Dow Chemical, Procter & Gamble, General Electric, General Dynamics, Lockheed Martin, Honeywell, Rockwell Collins, Microsoft, Boeing, Autodesk и 3D Systems. В настоящее время Digital Lab использует открытую онлайн-платформу программного обеспечения для проектирования и сотрудничества в режиме реального времени [1, 18].

Понимая перспективность развития идей аддитивных технологий авторами работы выполнен поиск новых способов формообразования деталей на основе использования способностей концентрированного источника энергии переносить материал в зону строительства будущей детали. В связи с этим были исследованы условия, при которых известный способ электроискрового легирования «граничил» с точным нанесением расплавленного материала при формировании тела детали.

Для проведения исследований был разработан экспериментальный стенд, реализующий принцип предлагаемого процесса. Экспериментальный стенд состоит из двух контуров. Первый – силовой контур, который обеспечивает подачу на рабочий электрод из материала будущей детали высоковольтного разряда положительного знака. Второй контур – управление подачей рабочего электрода от управляющего генератора. Главной особенностью этого контура является возможность регулирования подачи электрода в режиме вибраций с изменяемой частотой и изменяемой скважностью, т.е. продолжительностью контакта рабочего электрода с наращиваемым материалом выращиваемой детали в течение одного периода вибраций рабочего электрода.

Условия оптимального процесса выращивания детали будут выполняться при условии максимальной скорости наращивания. Это полностью согласуется с физической сущностью процесса. Действительно, технологии, основанные на применении вибраций как управляющего воздействия, имеют максимальные показатели при определенных значениях скважности переменного процесса контакта-отрыва рабочего электрода.

Для исследования возможностей процесса в пределах заданных изменений режимов был принят следующий порядок проведения эксперимента:

- составлен план полнофакторного эксперимента, в котором входными переменными приняты сила тока в первом контуре, частота, скважность управляющего генератора и продолжительность воздействия;
- рандомизирован порядок изменения уровней факторов;
- для построения математической модели процесса применена нейросетевая обработка созданного кортежа экспериментальных данных с помощью компьютерного пакета NeuroPro 0,25 [21, 22].

Созданная модель позволила определить характер зависимости наращивания материала детали в зависимости от частоты управляющего генератора и силы тока в первом (рабочем) контуре. Результаты такого исследования представлены на рис.1 и 2.

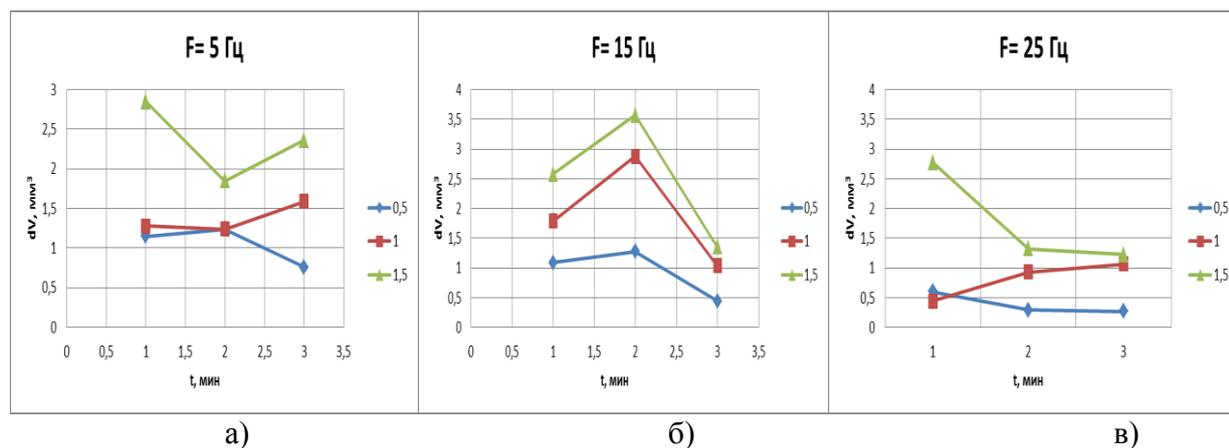


Рис. 1. Зависимости объема выращенного образца детали от времени, при частоте: а)  $F=5$  Гц; б)  $F=15$  Гц; в)  $F=25$  Гц

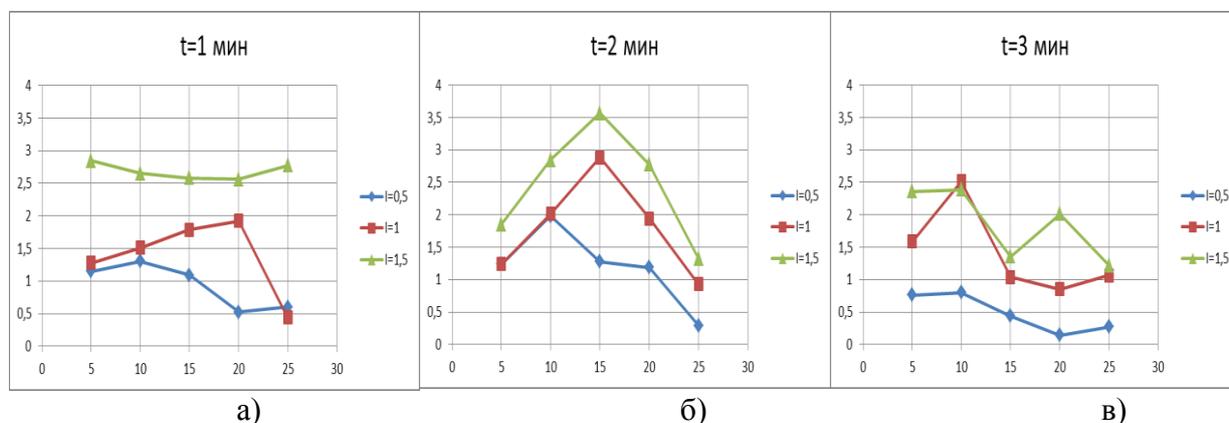


Рис. 2. Зависимости объема выращенного образца детали от частоты, при продолжительности: а)  $t=1$  мин; б)  $t=2$  мин; в)  $t=3$  мин

Из представленных обработанных результатов следует, что рациональным вариантом выращивания образца детали являются режимы при частоте  $F=15-20$  Гц и силе тока  $I=1,0$  А и при частоте  $F=5-10$  Гц и силе тока  $I=1,5$  А.

## ВЫВОДЫ

Показана принципиальная возможность и экспериментально определены условия достижения наивысшей производительности послойного выращивания детали. Увеличение силы тока в рабочем (первом) контуре для рационального осуществления процесса сопровождается требованием снижения частоты управляющего генератора во втором контуре.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологии бизнеса. Web: <http://www.techbuss.ru>
2. Технологии быстрого прототипирования. Web: <http://www.polymery.ru/letter>.
3. Технология FDM. Web: <http://rp-machines.ru/technology/fdm>.
4. Deckard, C. R. Recent advances in selective laser sintering / C. R. Deckard J. J. Beaman // Proceedings of the 14th Conference on Production Research and Technology. Michigan, 1987. P. 447-451.
5. Amato K. N., Gaytan S. M., Murr L. E., Martinez E., Shindo P. W., Hernandez J., Collins S., Medina F. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting // Acta Materialia. 2012. – Vol. 60, No. 5. P. 2229–2239.
6. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape // Physics Procedia. 2010. Vol. 5. P. 551–560.

7. El-Bagoury N., Matsuba T., Yamamoto K., Miyahara H., Ogi K. Influence of Heat Treatment on the Distribution of Ni2Nb and Microsegregation in Cast Inconel 718 Alloy // *Materials Transactions*. 2005. Vol. 46, No. 11. – P. 2478–2483.
8. Афанасьев К. 3D-принтеры [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.3dnews.ru/160001](http://www.3dnews.ru/160001).
9. Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. Second Edition. – World Scientific Publishing, 2003. – 420 p.
10. Довбыш В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко // Библиотечка литейщика. – 2014. – № 9. – С. 14–71.
11. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. – Санкт-Петербург : Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
12. Волхонский А. Е. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий / А. Е. Волхонский, К. В. Дудков // *Образовательные технологии*. – 2014. – № 1. – С. 127–143.
13. [http://nami.ru/uploads/docs/centr\\_technology\\_docs/55a62fc89524bAT\\_metall.pdf](http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf)
14. Hague R.J.M., Reeves P.E. *Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing*. – iSmithers Rapra Publishing, 2000. – 118 p.
15. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties // *J. Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 585. P. 713–721.
16. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufactured Inconel 718 superalloy parts: High-temperature oxidation property and its mechanisms // *Optics & Laser Technology*. 2014. Vol. 62. P. 161–171.
17. Wang Z., Guan K., Gao M., Li X., Chen X., Zeng X. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting // *J. Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 513. P. 518–523.
18. Yasa E., Deckers J., Kruth J. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2011. Vol. 17, No. 5. P. 312–327.
19. <http://www.stankin.ru/science/scientific-educational-centres-and-laboratories/liat/laboratory-of-innovative-additive-technologies-liat/laboratory-equipment/index.php>
20. Электронный ресурс / Режим доступа: [pw.utc.com/Home](http://pw.utc.com/Home).
21. Ковалевський С. В., Онищук С. Г., Тулупов В. І., Стародубцев І. Н. Нові комбіновані методи оброблення робочих поверхонь деталей машинобудування: Монографія: – Краматорськ: ДДМА, 2013. – 196 с.
22. Ковалевский С. В. Экспериментальные исследования электроимпульсного упрочнения деталей машин / С. В. Ковалевский, В. И. Тулупов, Я. С. Азарова // *Нейросетевые технологии и их применение: Материалы междунаучно-техн. конф. «НСТуП – 2008» в г. Краматорске 10 декабря 2008 г.* – Краматорск. – 2008. – С. 45–49.

Статья поступила в редакцию 10.11.2015 г.