

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация. Появившиеся в конце 1980-х аддитивные технологии, в наше время являются перспективными технологиями для мелкосерийного и единичного производства в различных областях машиностроения, медицины, самолето- и ракетостроения. Аддитивные технологии являются принципиально новыми методами в производстве различного рода изделий, в том числе и металлических. Их использование допускает как непосредственно создание изделий «с нуля», так и обработку уже имеющихся, причем изготовленный материал имеет механические и физические характеристики, идентичные свойствам материала, полученного традиционной ковкой или литьем. Дано описание двух видов аддитивных технологий по методам формирования слоя. Показаны проблемы, связанные с получением требуемых качеств и свойств деталей. Приведены способы получения металлопорошковых материалов на основе никеля, для применения в разных областях промышленности и машиностроения. Проведенный анализ позволил наметить пути повышения технологической прочности деталей из порошков на никелевой основе.

Ключевые слова: аддитивные технологии, тепловые эксперименты, методы печати, селективное лазерное спекание, прямое осаждение материала, термобарьер, выдавливание материала, теплопроводность, традиционные технологии, трехмерная печать.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-136-144

За последние 20 лет технологии машиностроения шагнули далеко вперед. Появилось различное множество новых конструкционных материалов, а так же методов их обработки и нанесения, превосходящих традиционные конструкционные материалы по прочностным и массогабаритным характеристикам.

В отличие от традиционных технологий порошковой металлургии аддитивные технологии позволяют:

- изготавливать детали из композиционного материала со 100%-й плотностью;
- воспроизводить форму изделия по компьютерной модели, снижая потери материала при механической обработке;
- изменять состав материала во время нанесения, согласно функциональной особенности поверхностной и внутренней части детали;

- получать материалы со специфическими свойствами, характерными только для лазерной обработки;

- использовать коммерчески доступные порошковые материалы;
- осуществлять локальное упрочнение (модификацию) рабочей детали.

В международном сообществе, так же, как и в России, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным или модельным материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т.д.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т.д.);
- по методам формирования слоя.

В данной работе уделено внимание аддитивным технологиям, предусматривающим формирование детали переплавом металлопорошкового материала лазерным излучением. По методам формирования слоя существует два вида аддитивных технологий. Первый вид носит также название «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание». В нем сначала формируют слой, например, насыпав на рабочую платформу порцию порошкового материала и разровняв порошок с помощью ролика или «ножа», таким образом создав ровный слой материала определенной толщины; затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной модели.

При этом часть порошка в созданном слое остается нетронутой (рис. 1) [1].

Как видно из рисунка, лазерное излучение системой зеркал переносится в плоскость построения, где по мере формирования слоя платформа построения опускается и лазерное излучение формирует слой «связанного» материала уже из вновь созданного слоя порошка, который подается выдвиганием платформы подачи материала и выравнивается в ровный слой роликом.

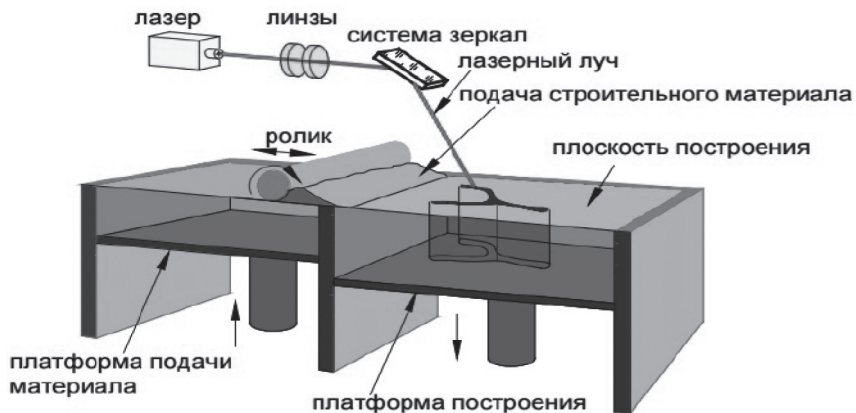


Рис. 1. Технология селективного лазерного спекания

Fig. 1. Technology of selective laser sintering

Второй вид можно назвать как «непосредственное (прямое) осаждение материала», при котором не формируется слой материала перемещением лазерного излучения в соответствии с моделью, а материал подается непосредственно в зону, куда подается и лазерное излучение. В данном случае уже будет перемещаться в соответствии с моделью детали сопло, из которого подается как порошковый материал, так и лазерное излучение, то есть лазерное излучение и порошковый материал перемещаются как единое целое (рис. 2) [2].

Если для технологии применяются не самофлюсующиеся порошки, то в этом случае процесс «выращивания» целесообразно проводить одновременно с подачей инертного газа, таких как аргон или гелий для защиты материала от окисления на воздухе. Газ при этом будет играть роль не только транспортного, но и защитного. На рис. 2 показан вариант коаксиальной подачи защитного газа. В обоих случаях готовая деталь получается послойным скреплением (склеиванием, сплавлением) частичек порошка в соответствии с требуемым сечением модели для получения готового изделия.

Аддитивные технологии для изготовления различного рода деталей в настоящее время являются сильно развиваю-

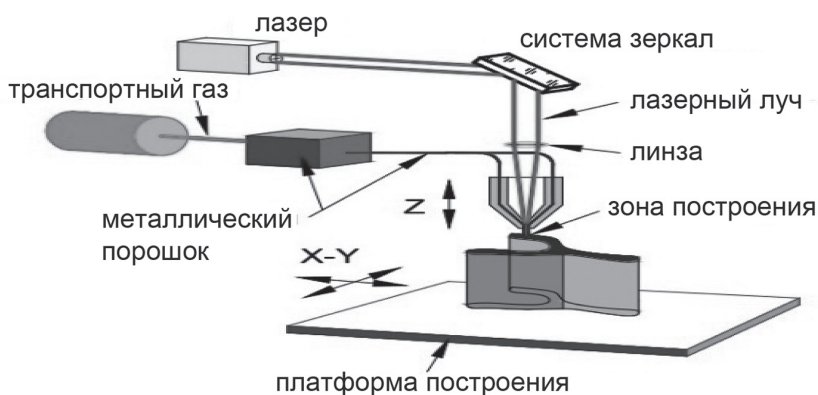


Рис. 2. Технология прямого осаждения материала
 Fig. 2. Technology of direct deposition of materials

щимися, в частности, благодаря росту номенклатуры различных порошковых материалов. Также, анализ и ряд опытов показывают, что во многих случаях применение аддитивных технологий позволяет получать изделия экономически более выгодными, с лучшими показателями качества и с приемлемыми параметрами (масса, сложность формы). Аддитивные технологии предпочтительны, когда, например, требуется восстановить поврежденную форму довольно дорогих изделий, таких как лопатки газотурбинных двигателей.

Но, несмотря на все значительные преимущества аддитивных технологий, существует много проблем, связанных с получением требуемых качеств и свойств деталей. Опыт практических работ, проведенных в РУДН, и данные научно-исследовательских работ показывают низкую технологическую прочность выращиваемых деталей, особенно на основе никеля. Это и трещинообразование, порообразование, наличие дефектов в зависимости от фракционного состава, неоднородностей порошка. Поэтому целью данной работы является выявление технологических особенностей формирования деталей из порошка на основе никеля. Никель и сплавы на его основе являются жизненно важными для современной

промышленности из-за их способности выдерживать широкий спектр операционных нагрузок с участием как агрессивных сред, так и высоких температур, а также комбинации этих факторов [3].

Существует несколько способов получения металlopорошковых материалов на основе никеля, в зависимости, от которых, порошки находят свое применение в разных областях промышленности и машиностроения. К ним относятся:

- карбонильный метод (метод получения порошков путем разложения тетракарбонил никеля NiCO_4);
- гидрометаллургический метод (металлосодержащий материал подвергается процессу восстановления);
- механический метод размол в мельницах;
- механический метод получения порошков атомизацией (диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости);
- электролитический метод (разложение водных растворов соединений никеля) [4].

Карбонильный метод предусматривает получение чистого никеля, который широко применяется в электронике, химических процессах, нефтяной промышленности. Стоит также выделить композиты на его основе. Например, термо-

активные композиции «никель-металл» (Ni-Al, Ni-Ti), «никель-карбид» (Ni-WC), «никель-оксид» (Ni-ZrO₂), и «никель-металлоксид» (Ni-Al-WO₃), используются для нанесения устойчивых износостойких огнеупорных покрытий и теплоизоляционных покрытий. Также, карбонильные никелевые порошки характеризуются свободной текучестью, хорошей сжимаемостью и легкостью для спекания [5].

Гидрометаллургическим методом также получают чистый никель с незначительным содержанием примесей. Этот метод рассчитан на получение никеля из широкого ассортимента сырьевого материала, но, в основном, из материалов с концентрациями сульфидов. Среди композитных порошков на основе никеля можно выделить: Ni-C порошки (50–85% Ni) для турбинных лопаток; Ni-Al (80–82% Ni) порошки с карбидами, нитридами, боридами для нанесения на поверхности плазменных генераторов и производства режущих инструментов и Ni+Cr+Al порошки для клапанов, нагреваемых сопел, сопел турбин, работающих в условиях высоких температур и скоростях потока [4].

Электролитическим методом получают как чистый никель, так и сплавы на его основе такие как: никель-хром, никель-теллур, никель-кобальт, никель-цинк, никель-железо. Этот метод характеризуется невысокой производительностью и высокой себестоимостью получаемого порошка, поэтому, несмотря на чистоту и высокие технологические свойства получаемых порошков, этот метод для аддитивных технологий не применяется.

Указанные выше методы относятся к физико-химическим методам получения никелевых порошков и для них характерно то, что химический состав и структура конечного порошка сильно отличается от исходного материала.

Механические методы наиболее популярны для производства металлопо-

рошковых материалов для аддитивных технологий, за исключением метода размолла в мельницах, так как частицы порошка при этом методе имеют осколочную, неправильную форму, а для аддитивных технологий наиболее подходящая форма частиц порошка — сферическая.

Метод получения никелевых порошков атомизацией является наиболее производительным, экономичным и эффективным методом получения мелких и средних порошков. Распыление (атомизацию) широко применяют при производстве порошков многокомпонентных сплавов, в частности, с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической [6].

К атомизированным никелевым порошкам можно отнести две большие группы порошковых материалов: порошки для твердых сплавов и порошки для так называемых «суперсплавов».

Коммерчески доступные никелевые твердые сплавы могут быть поделены на три группы: боросодержащие сплавы, сплавы, содержащие карбиды и сплавы с фазой Лавеса. В основном, используется состав Ni-Cr-B-Si (порошок серии ПГ-СР), который является самофлюсующимся из-за присутствия бора и кремния. Твердость этих сплавов определяется в зависимости от содержания хрома, бора и кремния. Сплавы содержащие много бора и хрома (Ni-15.5Cr-3.5B-0.8C) имеют высокую стойкость к абразивному изнашиванию, но низкую ударную вязкость. С добавлением к ним таких элементов как молибден или медь повышается коррозионная стойкость и стой-

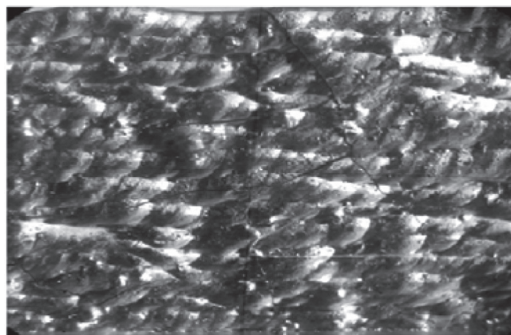


Рис. 3. Характер расположения трещин в наплавленном слое (вертикальная стенка), содержащем 16 валиков (вид сбоку), $\times 40$

Fig. 3. Crack pattern in built-up layer (vertical wall) composed of 16 weld beads (side view)

кость к питтинговой коррозии. Эти порошковые сплавы имеют хорошую абразивную стойкость и износостойкость типа металл-металл, хотя «горячая» твердость и коррозионная стойкость в некоторой степени ниже чем в сплавах на основе кобальта. Из карбидосодержащих никелевых сплавов можно выделить широко применяемый состав Ni-Cr-Mo-C. Сплавы на такой основе имеют хорошую коррозионную стойкость. Карбидосодержащие сплавы системы Ni-Cr-Mo-Co-Fe-W-C привлекательны как дешевая альтернатива сплавам на основе кобальта. Сплавы с фазой Лавеса (нестабильные интерметаллидные фазы Ni-Cr и Ni-V) характеризуются низким значением твердости, чем у сплавов, содержащих карбиды, но сохраняют механические свойства в широком диапазоне температур [4].

Под «суперсплавами» понимают сплавы с высокой прочностью при высоких температурах, которые используются в основном в двигателях турбин самолетов (лопатки газотурбинных двигателей) и генераторов энергии. Эти сплавы на никелевой основе и включают в себя «огнеупорные» элементы, такие как молибден, кобальт, ниобий и тантал. Высокие жаропрочные свойства обеспечивают главным образом не только присутствующие γ' фазы интерметаллидов алюминия и титана, но и ряд упрочня-

ющих элементов, указанных выше. За рубежом существует также альтернатива получения порошков для «суперсплавов» методом механического сплавления композитных металлических порошков с равновесными и неравновесными фазами от «простых» порошков. Содержание алюминия и хрома обеспечивает хорошую сопротивляемость окислению, в то время как титан, тантал и вольфрам обеспечивают сульфидное сопротивление (сопротивление сульфидному растрескиванию). Вольфрам и молибден также повышают прочность [4].

Наиболее распространенной проблемой в применении данного вида технологий является трещинообразование никелевом материале формообразующих слоев получаемых деталей, а точнее, высокая склонность к трещинообразованию. В случае наплавленных слоев, содержащих большое количество единичных валиков, трещины представляют собой разветвленную сетку (рис. 3) [7].

При лазерной плавке, в наплавленном валике могут возникать следующие дефекты: трещины, поры, отслоения, занижения по высоте, трещины после механической обработки (рис. 4).

Образование трещин в накопленных слоях — один из самых распространенных дефектов. Наличие трещин в покрытиях снижает усталостную прочность

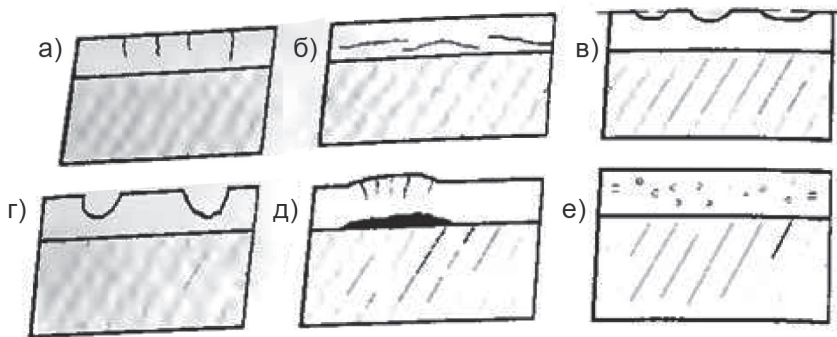


Рис. 4. Возможные виды дефектов в наплавленных покрытиях: трещины (а); отслоения (б); занижение по высоте (в); вырывы (г); вспучивания и трещины после механической обработки (д); пористость (е)

Fig. 4. Potential defects in fused coating: cracks (a); peeling (b); low height (c); tear-out (d); swelling and cracking after physical treatment (e); porosity (f)

деталей более, чем в 10–20 раз, а также может служить причиной преждевременного разрушения и выхода из строя изделия [8].

Так, при восстановлении объемных элементов жаропрочных деталей для избегания трещин рекомендуют уменьшать толщину наплаваемого слоя до 0,2 мм.

В РУДН, в департаменте машиностроения и приборостроения, на протяжении определенного времени проводили работы по объемному выращиванию деталей и по исследованию технологической

прочности сплавов систем легирования Ni-Cr-B-Si [9–10]. Фрактографические исследования поверхности трещин позволяют определить характер разрушения, и установить в каком состоянии находится металл во время образования трещины. Для этого в материале подложки производится надрез под трещиной перпендикулярно валику, затем образец доламывается. После долома на сканирующем электронном микроскопе осуществляется фрактографический анализ изломов. Изучив топографию поверхности трещин, было установлено, что тре-

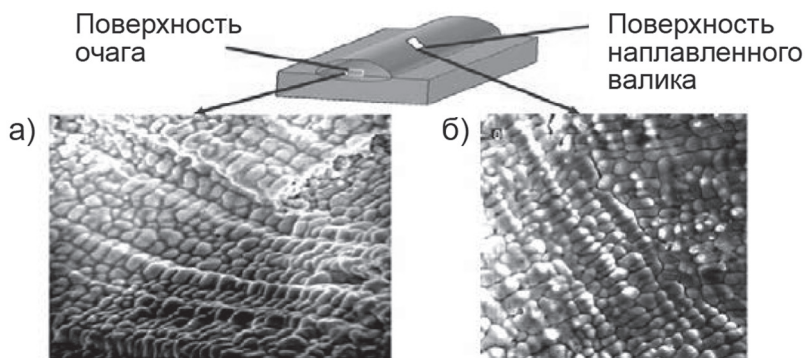


Рис. 5. Топография очага поверхности трещин, возникающих в наплавленных валиках (а) и топография свободной поверхности валика (б), наплавленного с использованием импульсно-периодического излучения порошками системы Ni-Cr-B-Si

Fig. 5. Topography of clustered faces of cracks in weld beads (a) and free surface of weld bead (b) made by pulse-periodic radiation of powders Ni-Cr-B-Si

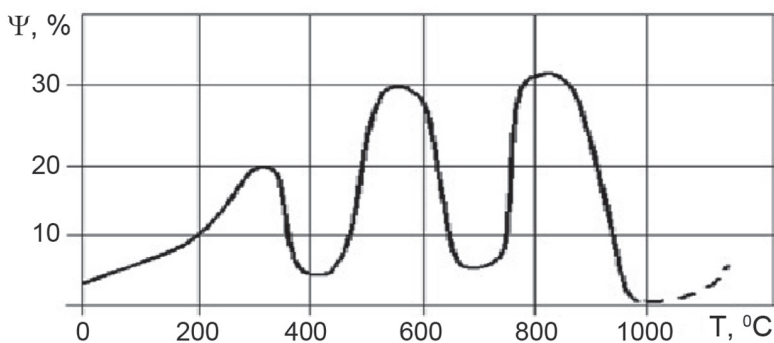


Рис. 6. Характер изменения пластичности (поперечного сужения) от температуры
 Fig. 6. Variation in plasticity (necking) due to temperature

щины носят кристаллизационный характер (рис. 5) [11].

Особенность разрушения наплавленных слоев связана с немонотонным изменением пластичности при охлаждении наплавленного металла (существуют «провалы» пластичности) (рис. 6).

Механизм образования трещин можно описать следующим образом. При затвердевании металла в температурном интервале кристаллизации образуются зародыши разрушения в виде кристаллизационных трещин. По мере остывания металла происходит формирование остаточных напряжений в нем. При температуре порядка 400 °С они имеют уже значительную величину, в то время как деформационная способность резко снижается. Кристаллизационный «надрыв» является концентратором, от которого в условиях высоких напряжений низких пластических свойств металла происходит макроразрушение [12].

Проведенный анализ позволил наметить пути повышения технологической прочности деталей из порошков на никелевой основе. Уменьшения вероятности появления кристаллизационного надрыва можно добиться уменьшением температурного интервала хрупкости (ТИХ), увеличением минимальной пластичности и снижением внешнего темпа деформаций.

Наиболее важной в данном случае является минимальная пластичность, зависящая от схемы кристаллизации и от типа макро- и микроструктуры. На эти характеристики можно влиять изменением режима получения формирующих слоев. Снижение остаточных напряжений связано с уменьшением зоны пластических деформаций, которую можно осуществить, изменяя параметры термического цикла.

Немаловажную роль на склонность к трещинообразованию играет химический состав материала. Так, увеличение содержания углерода в составе металлопорошкового материала увеличивает склонность к трещинообразованию [13].

В заключение стоит отметить важность работ в данном направлении для повышения эффективности применения аддитивных технологий не только с экономической точки зрения, но и со стороны технологических свойств получаемых изделий. Прежде всего, необходимо разработать методику оценки сопротивляемости образованию трещин в процессе формирования изделий переплавом порошкового материала. Возможно, спустя какое-то время, технологии трехмерной печати станут для нас чем-то обыденным, точно так же, как прочно в повседневную жизнь вошли компьютеры, интернет, планшеты, смартфоны и ноутбуки. Од-

нако сейчас это все еще выглядит как подлинный прорыв в науке. Глядя на возможности этих гигантских машин, воспроизводящих сложные детали и конструкции, невольно поражаешься. Иногда даже кажется, что все происходящее — это сюжет очередного футуристического фильма.

Однако это не так, аддитивные технологии существуют и развиваются. Мы наблюдаем настоящую революцию шестого экономического уклада на марше. По всей видимости, это очередной этап в научном развитии человечества и за подобными способами производства стоит большое будущее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимирязев В. А., Схиртладзе А. Г., Мелетьев Г. А., Шебашев В. Е. Основы технологии машиностроения: учебник. — Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. — 424 с.
2. *Voparai K. S., Singh R., Singh H.* Development of rapid tooling using fused deposition modeling. A review // *Rapid Prototyp. J.* 2016, No 22, Pp. 281–299.
3. *Baumann F. W., Eichhoff J. R., Roller D.* Scanned Image Data from 3D-printed Specimens Using Fused Deposition Modeling // *Data* 2017, No 2, P. 3.
4. Логачева А. И., Сентюринна Ж. А., Логачев И. А. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) // *Перспективные материалы.* — 2015. — № 4. — С. 5–16.
5. *Yang C., Shen W., Lin T., Wang X.* A hybrid framework for integrating multiple manufacturing clouds // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, No 86, 895–911.
6. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. — С. 63.
7. Маранц А. В. Сравнение свойств материалов сталь–TiC, полученных методами лазерных технологий и порошковой металлургии // *ПМИФП Известия вузов.* — 2013. — № 1. — С. 22–26.
8. Довбыш В. М., Забеднов П. М., Зеленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла. Режим доступа: http://nami.ru/upload/AT_metall.pdf (дата обращения 10.03.2015).
9. *Mark Curles* German selective laser melting specialist mulls IPO // *Industrial laser solutions.* 15.08.2014.
10. Балякин А. В., Чемпинский Л. А., Смелов В. Г. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.* — 2012. — № 3 (34). — С. 47–52.
11. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Перспективы развития транспортных систем в глубоких карьерах // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2018. — СВ 1. — С. 369–379.
12. Чумаков Д. М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // *Труды МАИ.* — 2014. — № 78. — С. 22.
13. *Conner B. P., Manogharan G. P., Martof A. N., Rodomsky L. M., Rodomsky C. M., Jordan D. C., Limperos J. W.* Making sense of 3D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services // *Addit. Manuf.* 2014, 1–4, Pp. 64–76. **PIAB**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хаба Этьенн¹ — магистр, e-mail: habatino@yahoo.fr,
Тимирязев Владимир Анатольевич¹ — доктор технических наук,
профессор, e-mail: timwa38@mail.ru,

¹ Российский университет дружбы народов.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 136–144.

Application of additive technologies in manufacture of machine parts

Haba Etienne¹, Magister, e-mail: habatino@yahoo.fr,

Timiryazev V.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: timwa38@mail.ru,
¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
113093, Moscow, Russia.

Abstract. Emerged in the late 1980s, the additive technologies are currently the advanced techniques of limited and piece production in different branches of machine building, medicine, aircraft and missilery. The additive technologies are the brand-new methods in manufacture of various articles, including metal items. The technologies can be used both to create a product and to treat a created piece, and the resultant material has the identical mechanical and physical characteristics as the products of conventional blacksmithing or foundry. The article describes two kinds of additive technologies using methods of layer formation. The problems connected with the required qualities and properties of parts are displayed. The methods to produce metal-particle materials from nickel for various branches of industry and machine building are presented. The implemented analysis marks the ways of improving strength of parts made of nickel powders.

Key words: additive technologies, heat experiments, print methods, selective laser sintering, direct deposition of materials, thermal barrier, material extrusion, thermal conduction, conventional technologies, 3D printing.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-136-144

REFERENCES

1. Timiryazev V. A., Skhirtladze A. G., Melet'ev G. A., Shebashev V. E. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: uchebnyk* [Fundamentals of engineering technology: Textbook], Yoshkar-Ola, PGU, 2016, 424 p.
2. Boparai K. S., Singh R., Singh H. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: A review. *Rapid Prototyp. J.* 2016, no 22, Pp. 281–299.
3. Baumann F. W., Eichhoff J. R., Roller D. Scanned Image Data from 3D-printed Specimens Using Fused Deposition Modeling. *Data* 2017, No 2, P. 3.
4. Logacheva A. I., Sentyurina ZH. A., Logachev I. A. Additivnye tekhnologii proizvodstva otvetstvennykh izdeliy iz metallov i splavov (obzor) [Additive technologies for manufacture of critical products from metals and alloys (review)]. *Perspektivnye materialy.* 2015, no 4, pp. 5–16. [In Russ].
5. Yang C., Shen W., Lin T., Wang X. A hybrid framework for integrating multiple manufacturing clouds. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, No 86, 895–911.
6. Valetov V. A. *Additivnye tekhnologii (sostoyanie i perspektivy): uchebnoe posobie* [Additive technologies (current condition and prospects: Educational aid), Saint-Petersburg, Universitet ITM, 2015, p. 63.
7. Marants A. V. Sravnenie svoystv materialov stal'-TiC, poluchennykh metodami lazernykh tekhnologiy i poroshkovoy metallurgii [Comparison of properties of steel-TiC materials produced using laser technologies and powder metallurgy]. *PMiFP. Izvestiya vuzov.* 2013, no 1, pp. 22–26. [In Russ].
8. Dovbysh V. M., Zabednov P. M., Zelenko M. A. *Additivnye tekhnologii i izdeliya iz metalla* [Additive technologies and metal-work], available at: http://nami.ru/upload/AT_metall.pdf (accessed 10.03.2015).
9. Mark Curles German selective laser melting specialist mulls IPO. *Industrial laser solutions.* 15.08.2014.
10. Balyakin A. V., Chempinskiy L. A., Smelov V. G. Primenenie additivnykh tekhnologiy dlya sozdaniya detaley kamery sgoraniya [Application of additive technologies in manufacture of combustion chamber parts], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta.* 2012, no 3 (34), pp. 47–52. [In Russ].
11. Galkin V. I., Sheshko E. E. Perspektivy razvitiya transportnykh sistem v glubokikh kar'erakh [Prospects for development of transport systems in deep open pit mines]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'.* 2018. Special edition 1, pp. 369–379. [In Russ].
12. Chumakov D. M. Perspektivy ispol'zovaniya additivnykh tekhnologiy pri sozdanii aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki [Prospects for application of additive technologies in aeronautical and rocket-and-space engineering]. *Trudy MAI.* 2014, no 78, pp. 22. [In Russ].
13. Conner B. P., Manogharan G. P., Martof A. N., Rodomsky L. M., Rodomsky C. M., Jordan D. C., Limpingos J. W. Making sense of 3D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Addit. Manuf.* 2014, 1–4, Pp. 64–76.

