

УДК 621.373.826

Использование аддитивных технологий для получения деталей машиностроения

*Кулиш А.М., студент
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Мисюров А.И., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
«Лазерные технологии в машиностроении»
mt12@bmstu.ru*

Появившиеся в конце 80-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.

В отличие от традиционных технологий порошковой металлургии аддитивные технологии позволяют:

- изготавливать детали из композиционного материала со 100%-ой 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 [1].

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 [2].

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», создав таким образом 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 (рисунок 1, [2]).

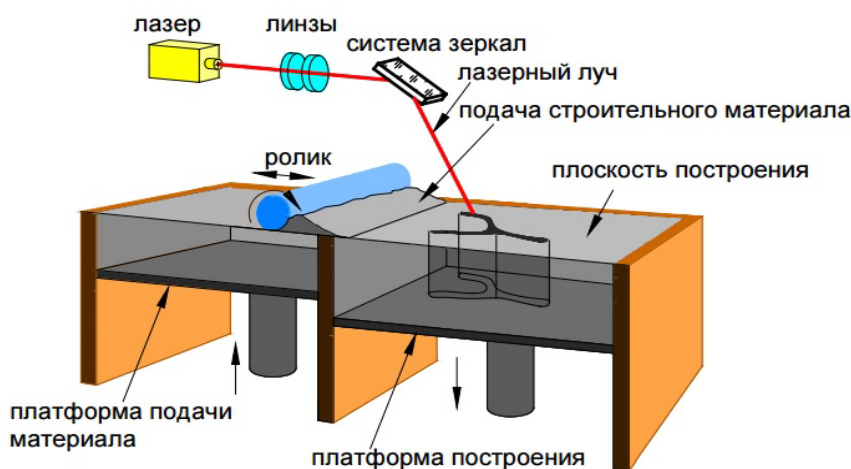


Рис. 1. Технология селективного лазерного спекания

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.

Второй вид можно назвать как "непосредственное (прямое) осаждение материала", в 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 (рисунок 2, [2]).

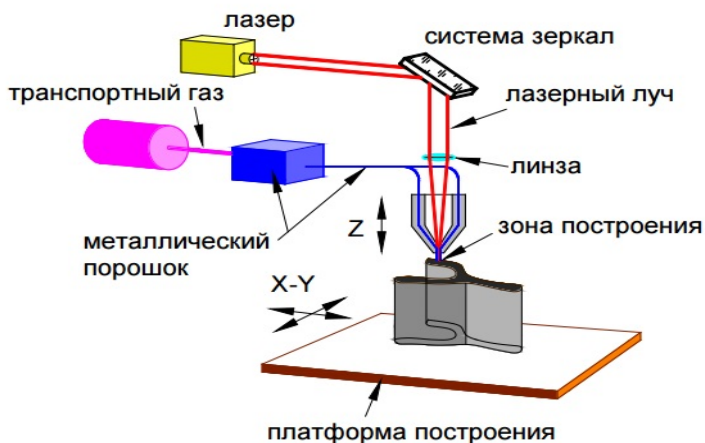


Рис. 2. Технология прямого осаждения материала

В случае, если для технологии применяются не самофлюсующиеся порошки, то процесс "выращивания" целесообразно проводить одновременно с подачей инертного газа, таких как аргон или гелий для защиты материала от окисления на воздухе. В этом случае, газ будет играть роль не только транспортного, но и защитного. На рисунке 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 являются сильно развивающимися в настоящее время для изготовления различного рода деталей, 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 работ в МГТУ и данные многих 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 размолла 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, термоактивные композиции "никель-металл" (Ni-Al, Ni-Ti), "никель-карбид" (Ni-WC), "никель-оксид" (Ni-ZrO₂), и "никель-металл-оксид" (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 [4].

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 для нанесения покрытий на работающие части поршней роторных двигателей; никелевые

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 [4]. 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 [2].

Механические методы наиболее популярны для производства металlopорошковых материалов для аддитивных технологий за исключением метода размол в мельницах, так как частицы порошка при этом методе имеют осколочную, неправильную форму, а для аддитивных технологий наиболее подходящая форма частиц порошка - сферическая [2]. 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 [2].

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 стойкость 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-B) 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, а также включают в себя "огнеупорные" элементы такие как молибден, кобальт, ниобий и тантал. Высокие жаропрочные свойства обеспечивают главным образом присутствующие γ' фазы интерметаллидов алюминия и титана, но и ряд упрочняющих 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 в 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 (рисунок 3, [5]).

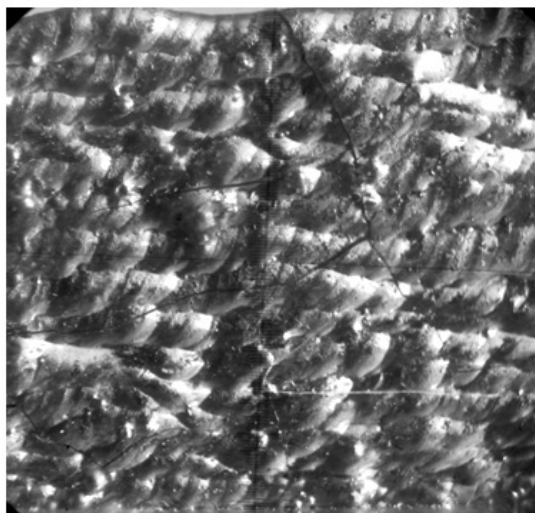


Рис. 3. Характер расположения трещин в наплавленном слое (вертикальная стенка), содержащем 16 валиков (вид сбоку), $\times 40$

Так, при восстановлении объемных элементов жаропрочных деталей для избегания трещин рекомендуют уменьшать толщину наплавляемого слоя до 0,2 мм [5].

В МГТУ имени Н. Э. Баумана на протяжении нескольких лет проводили работы по объемному выращиванию деталей [6-7] и по исследованию технологической прочности сплавов систем легирования Ni-Cr-B-Si [8]. Изучив топографию поверхности трещин, было установлено, что трещины носят кристаллизационный характер (рисунок 4, [5]).

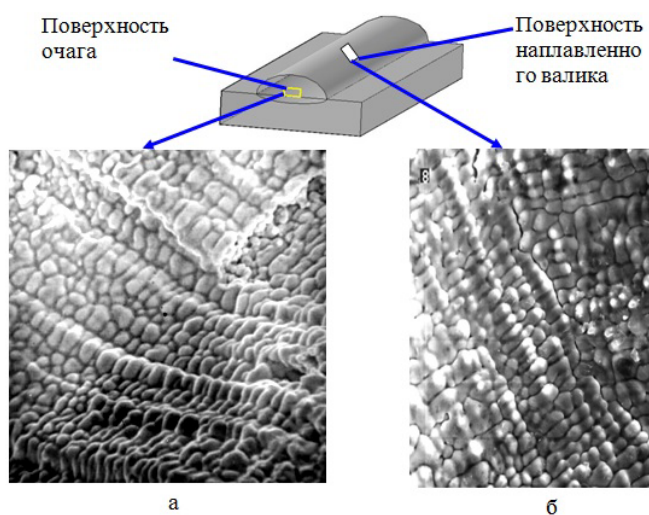


Рис. 4. Топография очага поверхности трещин, возникающих в наплавленных валиках (а) и топография свободной поверхности валика (б), наплавленного с использованием импульсно-периодического излучения порошками системы Ni-Cr-B-Si

Особенность разрушения наплавленных слоев связана с немонотонным изменением пластичности при охлаждении наплавленного металла (существуют "провалы" пластичности) (рисунок 5).

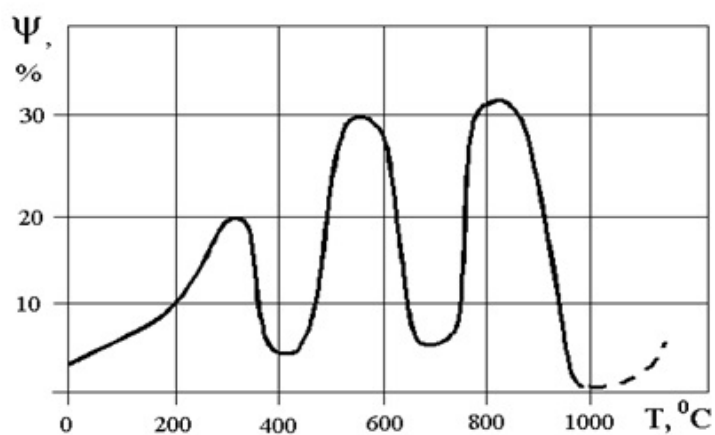


Рис. 5. Характер изменения пластичности (поперечного сужения) от температуры

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°C 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.

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 формообразующих 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 металлпорошкового материала увеличивает склонность к трещинообразованию [5].

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.

Список литературы

1. Новиченко Д.Ю. Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2011. 18 с.
2. 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).
3. Davies J.R. Properties of Nickel Alloys, ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys. Ohio: ASM International, 2000. 413 p.
4. Neikov O.D., Naboychenko S.S., Dowson G. Handbook of non-Ferrous Metal Powders. Technologies and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 616 p.
5. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Чжан Цин. Формирование наплавленных слоев с использованием лазерного импульсно-периодического излучения // Сварочное производство. № 8. 2007. С. 18-21.
6. Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Современные методы и оборудование для объемного формообразования деталей лазерным переплавом металлических порошков // Лазер-Информ. №5-6 (284-285). 2004. С. 1-3.
7. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валиков // Технология машиностроения. № 11. 2011. С. 19-21.
8. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технология машиностроения. № 10. 2005. С. 52-56.