

4. Компоновка проектируемого станка для комплексной обработки должна обеспечивать принятую последовательность выполнения круглого и полигонального точения, а также возможность настройки требуемого относительного расположения инструментов и заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005.
2. Данилов, В.А. Анализ и реализация методов формообразования некруглых поверхностей профильных моментопередающих соединений / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 8-17.
3. Данилов, В.А. Управление профилированием многогранных поверхностей при обработке резанием / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Машиностроение: Республиканский межведомственный сб. научных трудов, Вып. 29. – Мн: БНТУ, 2015 – С. 112-119.
4. Синкевич, В.М. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов / В.М. Синкевич, Е.П. Микитюк // Вестник машиностроения. – 1990.–№11. – С. 60-63.
5. Ворона В. В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей: автореф. дис. канд. техн. наук / В.В. Ворона. –Челябинск, 2008 г. – 19с.
6. Тимченко, А.И. Синтез, анализ и выбор процессов формообразования РК-профильных поверхностей для массового, серийного и единичного (ремонтного) производств / А.И. Тимченко // Вестник машиностроения. – 1991. – № 1.
7. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночного соединения в условиях серийного производства: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Н.В. Зенин. – Москва, МГТУ им Н.Э. Баумана, 2007. – 16 с.
8. Данилов, В. А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер – механик. – 2003. – № 3 (20). – С. 26-31.
9. Данилов, А.А. Синтез и анализ кинематической структуры станка для обработки некруглых валов / А.А. Данилов // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. – 2014, выпуск 75. Промышленность. – С. 84 – 87.
10. Станок для комплексной обработки разнопрофильных поверхностей / Данилов А.А., Данилов В.А. // Решение Национального центра интеллектуальной собственности о выдаче патента на полезную модель по заявке и 20131041 от 12.03.2014 г.

УДК 621.763

Девойно Д.Г., Девойно О.Г., Жарский В.В., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилипчук А.П.

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ СПЕКАНИИ

Белорусский национальный технический университет, ООО «Рухсервомотор»,

УО Военная академия Республики Беларусь

Минск, Беларусь

Для повышения качества слоев, формируемых в процессе селективного лазерного спекания (СЛС) предлагается формировать градиентную структуру из материалов с разными физико-механическими свойствами. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований формирования цилиндрической поверхности из слоев сплавов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01.

Селективное лазерное спекание (СЛС, SLS – Selective Laser Sintering) позволяет создавать уникальные изделия, изготовление которых традиционными методами практически невозможно или требует специальной оснастки (рисунок 1). Например, теплообменники со сложной структурой каналов охлаждения, литейная оснастка для создания корпусов новых двигателей и насосов, фильтрующие элементы, индивидуальные медицинские протезы и др. При помощи данных технологий появилась возможность изготавливать детали с прямоугольной либо любой другой формой внутренних полостей (рисунок 2), а также т.н. градиентные структуры [1-5].



Рис. 1. Схема процесса СЛС



Рис. 2. Металлическая деталь, выращенная СЛС

СЛС имеет большой потенциал для развития возможностей отечественного проектирования и производства единичных и мелкосерийных деталей сложной конфигурации. Среди основных преимуществ данной технологии выделяют то, что СЛС позволяет в автоматизированном режиме фактически строить трехмерные изделия по компьютерной модели [6]. В развитых промышленных странах ведутся исследовательские работы по изучению технологических процессов послойного синтеза металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композиций. Основные направления этих исследований:

- прочность и пластичность синтезированных деталей;
- минимизация пористости;
- создание пористых материалов;
- оптимизация химсостава и поиск новых композиций;
- методы получения функциональных градиентных материалов (ФГМ) (с использованием двух и более видов порошковых металлов);
- создание новых высокопроизводительных лазерных систем для спекания и сплавления металлопорошковых композиций.

Синтез ФГМ является перспективным направлением в машиностроении. ФГМ характеризуются способностью непрерывно изменять свои свойства от одной поверхности материала к другой. К таким свойствам можно отнести градиент химического состава, морфологию или кристаллическую структуру. ФГМ могут быть использованы в микроэлектронике, медицинской имплантологии, в деталях машин аэрокосмической, химической или ядерной индустрии для повышения трещиностойкости, сопротивления износу и коррозии, направленного распределения напряжений, для структурирования и управления тепловыми и/или гидродинамическими потоками и т. п. [1-3].

Постановка задачи исследования

В процессе СЛС происходят сложные металлургические явления, которые сильно зависят от параметров обработки (типа лазера, размера пятна, лазерной мощности, скорости перемещения, толщины слоя порошка), свойств материала и параметров порошков (химического состава, формы частиц, размера частиц и их распределения, сыпучести и плотности укладки порошка). Задача технолога состоит в определении оптимальной взаимосвязи таких параметров, как мощность лазера, фракционный и химический состав порошка, шаг и скорость сканирования лазерным лучом, температура плавления материала. Чем выше скорость перемещения лазерного луча, тем выше производительность машины и тем качественнее поверхности изделия. Особое значение имеет согласование параметров лазерного воздействия и свойств материала для минимизации пористости, противодействия формированию оксидных включений во внутренней структуре строящейся детали и образованию трещин. На рисунке 3 представлен внешний вид образца из сплава ПГ-СРЗ полученного в результате СЛС с использованием разработанного оборудования [7], на рисунке 4 – трещины, причиной образования которых являются высокие скорости нагрева и охлаждения, способствующие образованию внутренних напряжений.

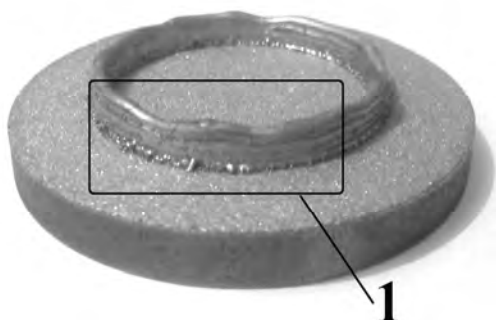


Рис. 3. Внешний вид полученного образца (ПГ-СРЗ)

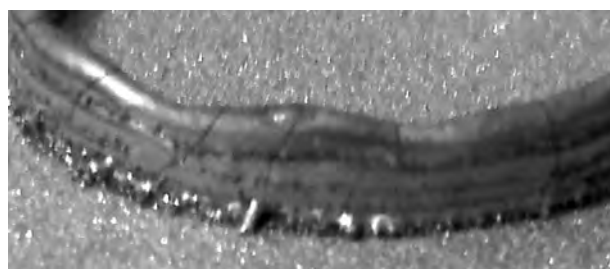


Рис. 4. Трещины в образце (область 1 рис. 3)

Для повышения трещиностойкости и качества слоев в целом, формируемых в процессе СЛС представляется целесообразным формирование градиентной структуры из материалов с разными физико-механическими свойствами. В данном случае, как показывают результаты моделирования [8] возможно снижение уровня остаточных напряжений.

Выбор оптимальных режимов требует проведения натурных исследований, которые требуют существенных затрат времени и технологических ресурсов. Для уменьшения затрат на исследования обосновано применение компьютерного моделирования процесса СЛС. По сравнению с проведением обычных «натурных» экспериментов, компьютерное моделирование требует предварительных усилий для создания моделей в виде программного обеспечения. Известные методики расчета параметров СЛС не всегда дают адекватные количественные оценки, что определяет необходимость разработки математических моделей процесса лазерной обработки при движении лазерного луча по произвольному закону. Знание термических циклов нагрева и охлаждения позволяет прогнозировать ход структурных и фазовых превращений в веществе и конечный результат лазерной обработки.

Цель представленной работы – разработка способа создания материалов с градиентом физико-механических свойств методом селективного лазерного спекания.

Результаты исследования

В качестве материалов для проведения экспериментальных исследований выбран самофлюсующийся сплав ПГ-СРЗ системы Ni – Cr – В – Si – С и порошок бронзовый ПР-19М-01.

Теплофизические свойства порошковых материалов

Наименование порошка	Размер фракции мкм)	Плотность (г/см ³)	Температура плавления (°С)	Теплопроводность материала (Вт/см*К)
Порошок никелевый ПГ-СРЗ,4	50-160	8,9	1200-1400	(6,7-7,4)*10 ⁻¹
Порошок бронзовый ПР-19М-01	50-100	8,4-8,7	885-1020	(8-15)*10 ⁻¹

Для данных материалов характерна низкая температура плавления (1100 °С), значение которой ниже температуры плавления сталей. Наличие в составе бора и кремния, превосходящих никель и железо по химическому родству к кислороду, способствует протеканию восстановительных реакций, что позволяет проводить операции без использования защитной среды. В процессе плавления и последующей кристаллизации данного материала образуются окислы В₂О₃ и SiO₃, расплавляющиеся как стекловидные вещества и выходящие на поверхность в виде шлака, в результате чего после охлаждения получают плотное, не имеющее пор изделие.

В настоящей работе рассматривался процесс формирования детали цилиндрической формы, как наиболее распространенной. Для выполнения эксперимента использовалось приспособление (рисунок 3), состоящее из стойки, неподвижного внешнего цилиндра, подвижного внутреннего цилиндра, механизма перемещения внутреннего цилиндра (зубчатая рейка), индикатора часового типа для контроля перемещения внутреннего цилиндра (цена деления 0,01 мм). Данное приспособление позволяет осуществлять процесс СЛС в следующем порядке:



Рис.5. Приспособление для подачи порошка



Рис. 6. Лазерное спекание слоя

1. Нанесение равномерного слоя порошка определенной толщины.
2. Луч лазера «рисует» на рабочем столе контур текущего слоя (рисунок 4).
3. Платформа рабочей камеры опускается на толщину одного слоя.
4. Процесс повторяется до тех пор, пока изделие не будет окончательно сформировано.
5. Изделие извлекается из приспособления и очищается от порошка.

Данное приспособление вместе с лазерной установкой и оптической системой, обеспечивающей перемещение лазерного луча во взаимноперпендикулярных направлениях образуют установку для СЛС.

Для определения параметров процесса ФГС была использована математическая модель оценки теплового воздействия при движении лазерного луча по траектории соответствующей конфигурации формируемого изделия [9,10], позволяющая определять температурное поле при произвольном законе движения по поверхности и учитывает неравномерность плотности мощности излучения по сечению лазерного луча. Проанализировано влияние параметров траектории движения лазерного луча на температурное поле. Параметры обработки: мощность лазерного луча $P = 1$ кВт, диаметр лазерного луча $d = 1$ мм. В результате расчета определены температурные поля $T(x, y, z, t)$ в теле из сплава ПГ-СРЗ возникающее при движении лазерного луча, имеющего гауссово распределение интенсивности. На рисунках 7, 8 для сравнения представлены результаты расчета по предлагаемой модели, соответствующие положению лазерного луча равной мощности, перемещающегося с одинаковой линейной скоростью по круговой траектории радиусом $R = 2,5$ мм для материалов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01 в плоскости xOz , перпендикулярной вектору скорости.

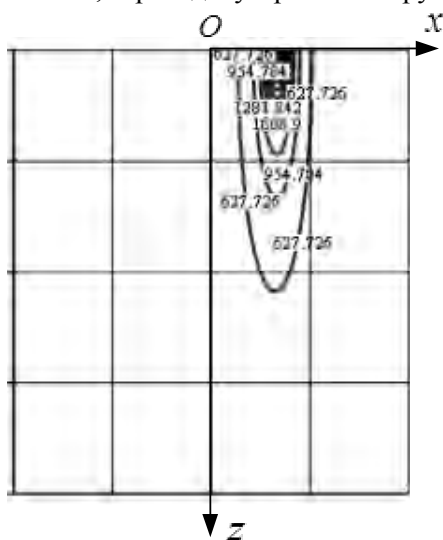


Рис. 7. Температурное поле для материала ПГ-СРЗ

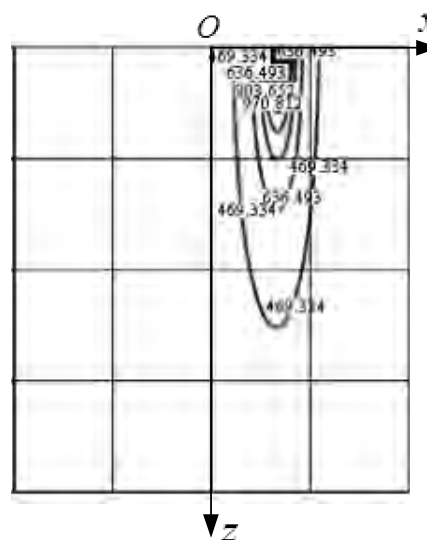


Рис. 8. Температурное поле для материала ПР-19М-01

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о влиянии химического состава на глубину проникновения изотермы. Полученные результаты позволили определить параметры процесса СЛС, обеспечивающие формирование градиентной структуры.

Полученные результаты использованы при построении цилиндрической поверхности. На рисунке 9 представлена фотография образца, полученного чередованием сплавов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01. Исследования структуры выполнены с использованием металлографического комплекса «Autoscan» в составе металлографического поляризационного микроскопа «MDS», видеокамеры «USB 2.0 CMOS-5M» и ПЭВМ с программным обеспечением. На рисунке 10 представлена фотография микроструктуры поперечного сечения образца, полученного чередованием сплавов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01. На данной поверхности практически отсутствуют трещины, что позволяет рекомендовать данный способ формирования поверхностей к практическому применению.



Рис. 9. Внешний вид полученного образца (ПГ-СРЗ, ПР-19М-01)

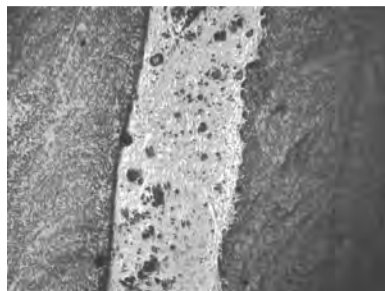


Рис. 10. Микроструктура поперечного сечения образца

Выводы

Выполнено математическое моделирование процесса формирования цилиндрической поверхности образца, полученного чередованием сплавов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01. Определены режимы процесса формирования градиентной структуры.

Методом СЛС построена цилиндрическая поверхность из слоев сплавов ПГ-СРЗ и ПР-19М-01. На данной поверхности практически отсутствуют трещины, что позволяет рекомендовать данный способ формирования поверхностей к практическому применению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2009. – 424 с.
2. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. – С-Пб.: Изд-во политехн. ун - та, 2013. – 222 с.
3. Макаров, М. Промышленные 3D-принтеры - дорогие "игрушки" или реальный путь модернизации машиностроения в России? / Фотоника №5, 2015г. С.20-32
4. Логачева, А. И. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) / А. И. Логачева, Ж. А. Сентюрина, И. А. Логачев // Перспективные материалы. – 2015. – № 5. – С. 5–15.
5. Колесников Л. А., Манжула Г. П., Шелег В. К., Якимович А. М. Состояние и перспективы развития технологии быстрого прототипирования в промышленности / Наука и техника № 5, 2013 С. 3 – 9.
6. Федотов А.В. Новые технологии порошковой металлургии // Материалы в машиностроении. - 2012. - № 1 (76). - С. 53-56.
7. Использование самофлюсующихся сплавов для создания деталей методом селективного лазерного спекания / Девойно О.Г., Луцко Н.И., Грибков Ю.А., Пилипчук А.П, Романов Д.А. // «Вестник Военной академии Республики Беларусь», № 1(50), 2016г.
8. Девойно О. Г., Оценка напряженного состояния при лазерной обработке газотермических покрытий / О. Г. Девойно, А. П. Пилипчук, кочеров А.Л. // Теоретическая и прикладная механика / Междунар. науч.-тех. сб. / – 2014. – Вып.29 – С. –134– 137.
9. Девойно Д. Г. Моделирование процесса поверхностной закалки стальных деталей автомобильной техники сканирующим лазерным излучением / Д. Г. Девойно, О. Г. Девойно, А. П. Пилипчук // Вестн. Воен. Акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 3(48). – С. 64–73.

10. Девойно О. Г. Исследование процесса формирования поверхности методом селективного лазерного спекания из сплава ПГ-СРЗ / Современные методы и технологии создания и обработки материалов / Сб. научных трудов / 2016 С. –404 – 414.

УДК 621.791.72

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВАЛИКОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СЛОЕВ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье рассматриваются возможности лазерной наплавки при формировании мультимодальных полосчатых слоев из разнородных материалов. Показано влияние технологических режимов лазерной наплавки на геометрические размеры наплавочных валиков. Методом полного факторного эксперимента получены зависимости высоты и ширины валиков наплавки от скорости и дистанции наплавки.

Лазерная наплавка имеет целый ряд преимуществ перед другими технологиями нанесения покрытий. Прежде всего, это связано с небольшими размерами наплавляемых валиков, сравнимыми с диаметром лазерного пятна на поверхности наплавки и локальностью нагрева. Благодаря своим особенностям метод лазерной наплавки позволяет проектировать и создавать мультимодальные покрытия, состоящие из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Уникальность метода лазерной наплавки при создании мультимодальных покрытий состоит в том, что покрытия с полосчатой архитектурой могут создаваться из металлургических материалов, что практически трудно осуществить другими способами. Реализация технологии нанесения мультимодальных покрытий методом лазерной наплавки неразрывно связана с использованием системы числового программного управления для осуществления процесса наплавки, что позволяет с высокой точностью создавать архитектуру мультимодальных поверхностных слоев. Технология создания мультимодальных покрытий может быть использована как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления их изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [1,2].

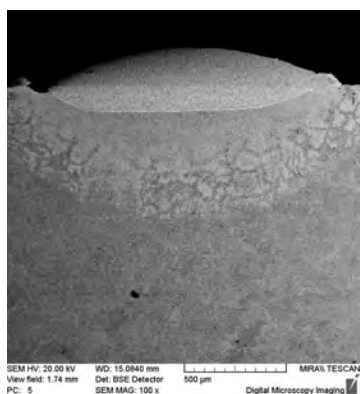


Рис. 1. Поперечный шлиф валика, полученного лазерной наплавкой сплава ПГ-12Н-01 при скорости наплавки $V=40$ мм/мин и дистанции наплавки $L=10$ мм

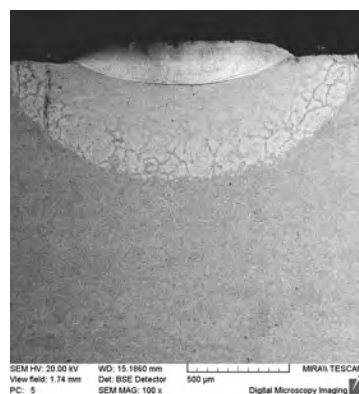


Рис. 2. Поперечный шлиф валика, полученного лазерной наплавкой сплава ПГ-12Н-01 при скорости наплавки $V=60$ мм/мин и дистанции наплавки $L=12$ мм

Прежде чем приступить к созданию мультимодальных покрытий из разнородных металлических материалов должна быть отработана технология лазерной наплавки валиков из со-