

УДК 658.51

## СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

© 2018 А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева, А.В. Сотов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 06.12.2018

В статье приводятся результаты анализа влияния параметров технологического процесса селективного лазерного сплавления (угол наклона относительно платформы построения и толщина слоя) на параметры качества изделия (шероховатость). Приводятся диаграмма Исикавы и пирамида качества, позволяющие выделить основные компоненты системы менеджмента качества аддитивного производства.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, селективное лазерное сплавление, система менеджмента качества.

### ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство играет ключевую роль в развитии четвертой промышленной революции. Развитие методов проектирования и применения новых материалов позволяет производить индивидуальные, кастомизированные изделия. К сожалению, на сегодняшний день одним из недостатков аддитивного производства является качество, а точнее, отсутствие системы менеджмента качества и стандартизации процессов, обеспечивающих требуемое качество изделий [1]. Аддитивное производство регулируется стандартом ISO/ASTM 52900-15 (ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения).

### ЭЛЕМЕНТЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одна из ключевых задач внедрения аддитивных технологий на предприятия – создание системы менеджмента качества. Одним из основных ограничений применения аддитивных технологий является обеспечение повторяемости параметров качества при одинаковых технологических режимах. Обеспечение качества

*Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технологий производства двигателей. E-mail: berill\_samara@bk.ru.*

*Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией аддитивных технологий. E-mail: pdla\_smelov@mail.ru.*

*Кокарева Виктория Валерьевна, научный сотрудник лаборатории аддитивных технологий. E-mail: victoriakokareva@gmail.com.*

*Сотов Антон Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории аддитивных технологий. E-mail: sotovanton@yandex.ru*

аддитивного производства осуществляется на этапе планирования печати и мониторинга процесса печати, взаимосвязи технологических режимов и параметров качества изготавливаемого изделия формируют систему управления с обратной связью. На этапе планирования печати происходит моделирование технологического процесса с целью определения оптимальных режимных параметров для выбранной детали. Во время мониторинга процесса печати при режимных параметрах происходит сравнение параметров процесса и качества с прогнозируемыми значениями [2]. В качестве основы системы менеджмента качества аддитивного производства в работе предлагается пирамида качества (Рис.1), содержащая в себе ключевые элементы системы менеджмента качества.



**Рис. 1.** Пирамида системы качества аддитивных технологий

Конечная цель – качество деталей, находится в вершине пирамиды. Достижение этой цели – ключевые компоненты: планирование печати и мониторинг процесса печати, связанные между собой обратной связью (feedback control). Под-

держка данных процессов - это третий уровень, состоящий из данных по свойствам исходного порошка, системам калибровки, стандартов, параметров процесса. В основе пирамиды лежит база данных, содержащая информацию по режимам печати соответствующих порошковых материалов при выбранных технологиях и оборудовании [3]. Качество изделия, изготавливаемого аддитивными технологиями, определяет не только точность его геометрических параметров и формы, но и обеспечение функциональных свойств. Качество аддитивного технологического процесса можно выразить через точность геометрии, шероховатость поверхности, свойства материала (прочность, долговечность, твердость и т.п.). Каждый из этих параметров качества зависит от режимных параметров печати, в том числе от свойств исходного порошкового материала.

Во время печати детали параметры ее качества формируются под действием различных факторов технологического процесса [4-5]. В основном, проблемы с необеспечением качества изделия возникают при отсутствии понимания влияния температуры, степени охлаждения, толщины слоя на геометрическую точность, отклонение формы, влияния расположения детали на платформе построения, режимных параметров (мощность и скорость) на плотность изделия.

На рисунке 2 приведены факторы, оказывающие влияние на образование дефектов аддитивного производства, на примере селективного лазерного сплавления (СЛС), в виде диаграммы Исикавы.

Так, неоптимальные параметры сплавления, влажность или загрязнение порошка или технологической среды, неправильная пост-

обработка, нарушения или отклонения режимных параметров приводят к образованию пористости. Недостаточное количество порошка, нарушения или изменения в плотности энергии луча, дрейф системы управления оборудованием или проблемы с калибровкой, неравномерное распределение порошка, приводят к образованию внутренних пустот детали. Прерывание подачи порошка, ошибки оптических систем (лазер) или ошибки в данных, загрязнение технологической среды (прерывание подачи инертного газа), смешивание порошков из разных партий или повторное использование порошка приводят к дефектам слоев. Неоптимальные параметры сплавления или отклонения режимных параметров от заданных, нарушения или отклонения точности процесса переноса энергии лазера приводят к несплавлениям. Градиенты температур и напряжений могут приводить к растрескиванию и формированию трещин.

Параметры технологического процесса можно разделить на 2 вида: параметры, которыми управляет оператор установки СЛС, то есть входные параметры, и параметры, определяемые функциональным назначением детали, например, выбор титанового порошка для медицинского применения, то есть параметры граничных условий. Входными параметрами служат: значения атмосферы (уровень содержания кислорода в камере построения), осаждения порошка (толщина слоя), сканирования (мощность лазера, фокус, скорость). Параметрами граничных условий могут быть: свойства материалов, требования получаемой геометрии, а также параметры установки, например, тип лазера. Входные параметры напрямую влияют

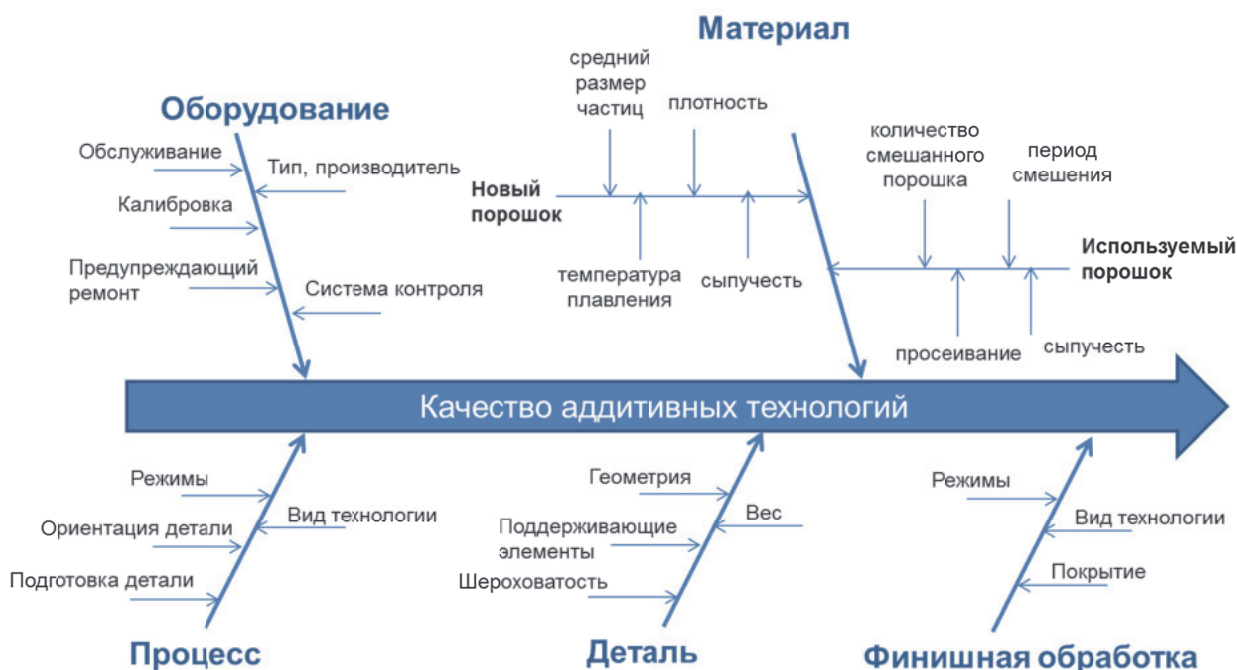


Рис. 2. Факторы, оказывающие влияние на образование дефектов при СЛС



Рис. 3. Система управления качеством СЛС

на процесс сплавления частиц порошка, например при увеличении толщины слоя изменяются размеры бассейна расплава и плотность синтезируемого материала уменьшается, или при увеличении содержания кислорода в камере построения синтезируемый материал становится более хрупким.

На рисунке 3 представлена концептуальная схема управления качеством СЛС.

Для создания надежной системы управления качеством недостаточно контролировать и осуществлять мониторинг технологического процесса, необходимо контролировать входные параметры, определяющие соответствующее поведение селективного лазерного сплавления. При этом необходимо определить влияние входных параметров на характеристики процесса. Обычно, мониторинг технологического процесса осуществляется с использованием алгоритмов управления режимными параметрами (мощность лазера и скорость сканирования).

На данный момент актуальным остается вопрос прогнозирования параметров СЛС на основе распределения температуры, остаточного напряжения и деформаций. Полученные экспериментальным путем значения параметров качества при различных комбинациях входных параметров и граничных условий являются основой для базы знаний цифровой модели управления качеством аддитивных процессов производства.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Параметры качества поверхности являются основными контролируемыми параметрами

ми качества процесса СЛС. Наиболее значимое влияние на качество детали оказывают такие параметры процесса, как толщина слоя, мощность лазера, ориентация детали. Эти параметры контролируются и управляются оператором.

Экспериментальным путем в результате дисперсионного анализа было показано, что шероховатость поверхности зависит от мощности лазера (X1), толщины слоя (X2), угла наклона (X3) следующим образом:

$$y = 38,72 + 5,544X_2 - 5,222X_3 - 6,097X_1^2 + 2,741X_1X_2 - 4,347X_2X_3$$

Из уравнения видно, что шероховатость (Ra) увеличивается при увеличении толщины слоя (положительный эффект) и уменьшается при увеличении угла наклона (отрицательный эффект).

На толщину и шероховатость поверхностей существенно влияет ступенчатый метод выращивания деталей, а также угол расположения детали на платформе построения.

С уменьшением угла наклона детали относительно платформы построения в плоскости X-Z уменьшается геометрическое разрешение и создается эффект лестницы (Рис. 4), что увеличивает толщину образца, шероховатость поверхности и ее отклонение от заданного профиля.

Для исследования влияния направления угла выращивания на толщину и шероховатость, были изготовлены образцы из порошка жаропрочного сплава ВВ751П. Схема расположения образцов на платформе построения представлена на рисунке 5. Расположение образцов на платформе построения представлено на рисунке 6.

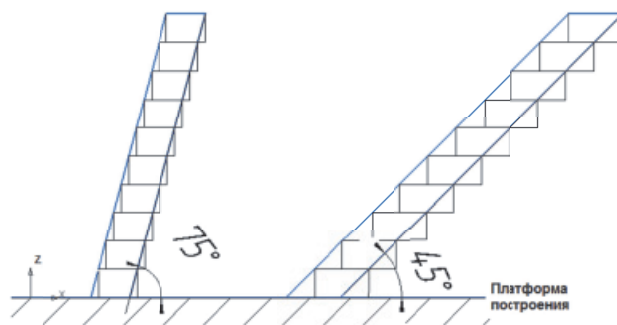


Рис. 4. Ступенчатый вид боковой поверхности

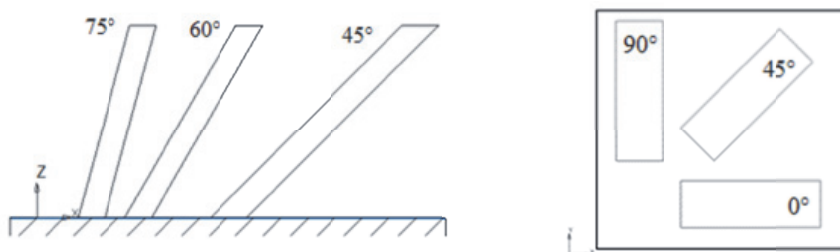


Рис. 5. Схема расположения образцов на платформе построения

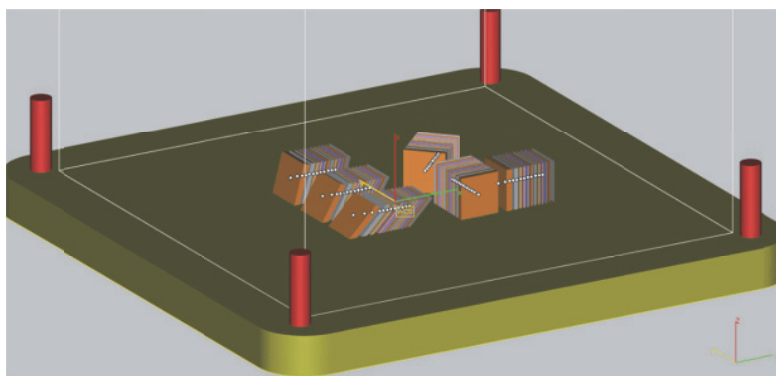


Рис. 6. Расположение образцов на платформе построения

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения толщины выращенных образцов представлены в таблице 1.

Результаты измерений толщины выращенных образцов были сведены в гистограммы (рис. 7 и 8).

Из рисунка 7 видно, что угол расположения образцов относительно платформы построения в плоскости X-Y оказывает влияние на толщину выращенных образцов: при номинальной толщине от 0,1 мм до 0,3 мм измеренная толщина образца не изменяется и равна 0,3-0,35 мм. При увеличении номинальной толщины от 0,4 до 3 мм наблюдается равенство измеренных и номинальных толщин.

Из рисунка 8 видно, что угол наклона образцов относительно платформы построения в плоскости X-Z оказывает существенное влияние на толщину выращенных образцов: толщина образцов увеличивается с уменьшением угла наклона относительно плоскости платформы построения. При номинальной толщине образца от 0,1 мм до

0,4 мм фактическая толщина образца находится в диапазоне 0,4-0,65 мм. При увеличении номинальной толщины с 0,5 до 3 мм наблюдается увеличение толщины от 0,15 до 0,25 с уменьшением угла расположения образцов относительно плоскости платформы построения.

Исследование шероховатости было проведено на образцах, представленных на схеме измерения (рис. 9).

Исследование шероховатости проводилось на профилографе-профилометре БВ-7669.

Профилограмма измерения поверхности образца толщиной 0,5 мм под углом 15° представлена на рисунке 10.

Измерение параметров шероховатости поверхностей производилось по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73. Результаты измерений представлены в таблицах 3-4.

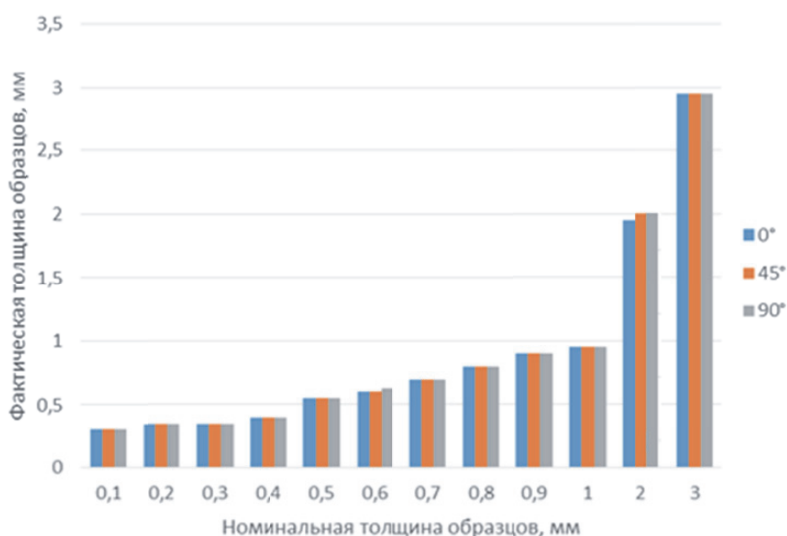
Из рисунка 11 видно, что наименьшая шероховатость достигается при номинальной толщине

**Таблица 1.** Результаты измерения толщины выращенных образцов из жаропрочного сплава ВВ751П в плоскости построения X-Y

Номинал. толщина, мм	Фактическая высота при различных углах построения, мм		
	0°	45°	90°
0,1	0,3	0,3	0,3
0,2	0,35	0,35	0,35
0,3	0,35	0,35	0,35
0,4	0,4	0,4	0,4
0,5	0,55	0,55	0,55
0,6	0,6	0,6	0,63
0,7	0,7	0,7	0,7
0,8	0,8	0,8	0,8
0,9	0,9	0,9	0,9
1	0,95	0,95	0,95
2	1,95	2	2,0
3	2,95	2,95	2,95

**Таблица 2.** Результаты измерения толщины выращенных образцов из жаропрочного сплава ВВ751П в плоскости построения X-Z

Номинал. толщина, мм	Фактическая высота при различных углах построения, мм		
	75°	60°	45°
0,1	0,4	0,4	0,45
0,2	0,4	0,41	0,5
0,3	0,4	0,4	0,6
0,4	0,4	0,55	0,65
0,5	0,5	0,6	0,75
0,6	0,65	0,7	0,85
0,7	0,7	0,8	0,95
0,8	0,8	0,9	1,05
0,9	0,88	1	1,15
1	1	1,08	1,2
2	2	2,05	2,2
3	3	3,08	3,2



**Рис. 7.** Зависимость изменения измеренной толщины от угла расположения образцов на платформе построения в плоскости X-Y



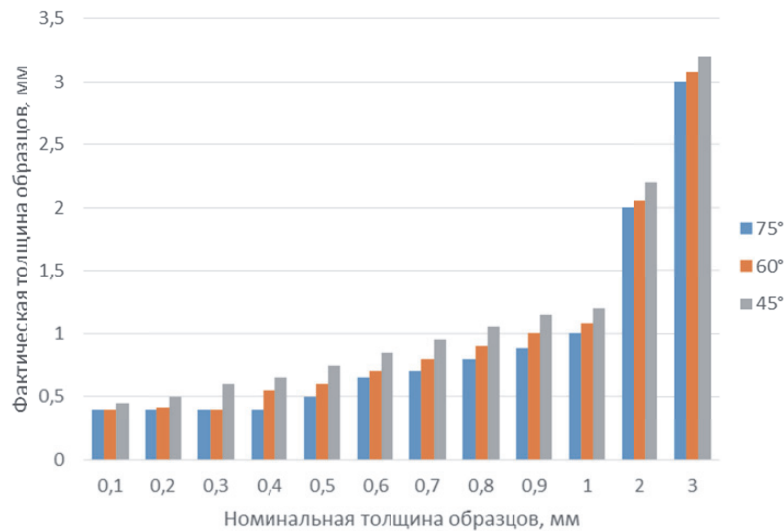


Рис. 8. Зависимость изменения измеренной толщины от угла наклона образцов относительно платформы построения в плоскости X-Z

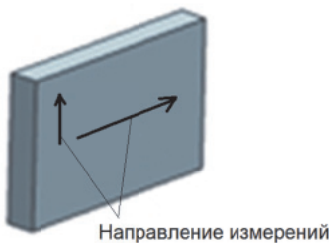


Рис. 9. Траектория измерения шероховатости

не образца в 0,6 мм, расположенного под углом 75° относительно платформы построения. Стоит отметить, что разница в значении шероховатости образцов различной толщины от угла наклона относительно платформы построения в плоскости X-Y не значительна.

Из рисунка 12 видно, что наименьшая шероховатость достигается при номинальной толщине образца в 0,5 мм, расположенного под углом 45° относительно платформы построения. Стоит отметить, что разница в значении шероховатости образцов различной толщины от угла

наклона относительно платформы построения в плоскости X-Z не значительна.

### ВЫВОДЫ

Качество изготавливаемых аддитивными технологиями изделий определяется параметрами технической системы аддитивного производства: оборудование, процесс, порошок. Параметры качества изделия формируются на протяжении всего процесса печати, а также до – при выборе и контроле порошка, и после – при проведении пост-обработки и финишных операций.

Система менеджмента качества аддитивного производства должна учитывать факторы, влияющие на формирование дефектов, содержать методы и средства контроля соответствия реальных параметров процесса заданным условиям, обеспечения параметров качества изделия прогнозируемым свойствам. Основная задача системы контроля качества аддитивного производства - идентифицировать дефекты

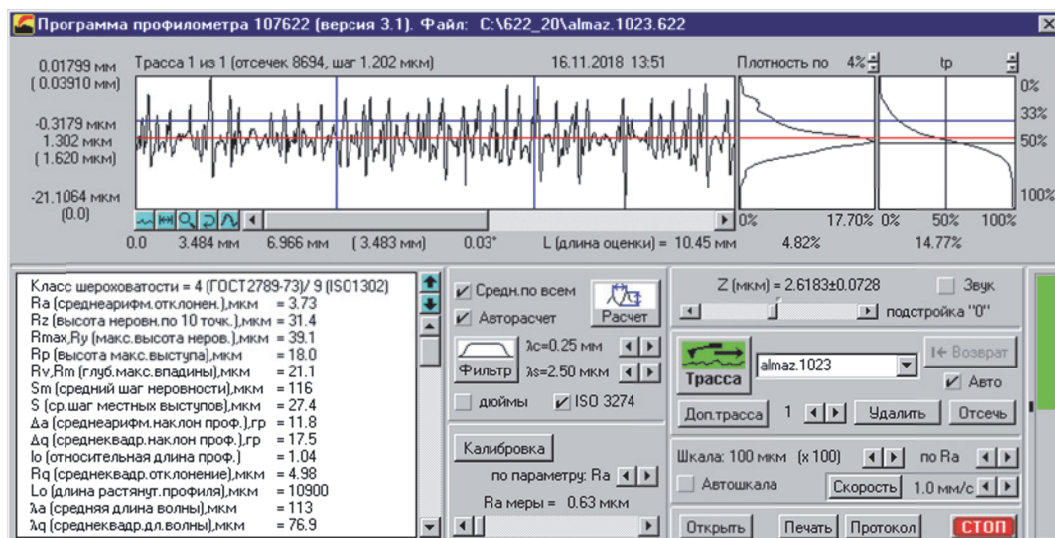


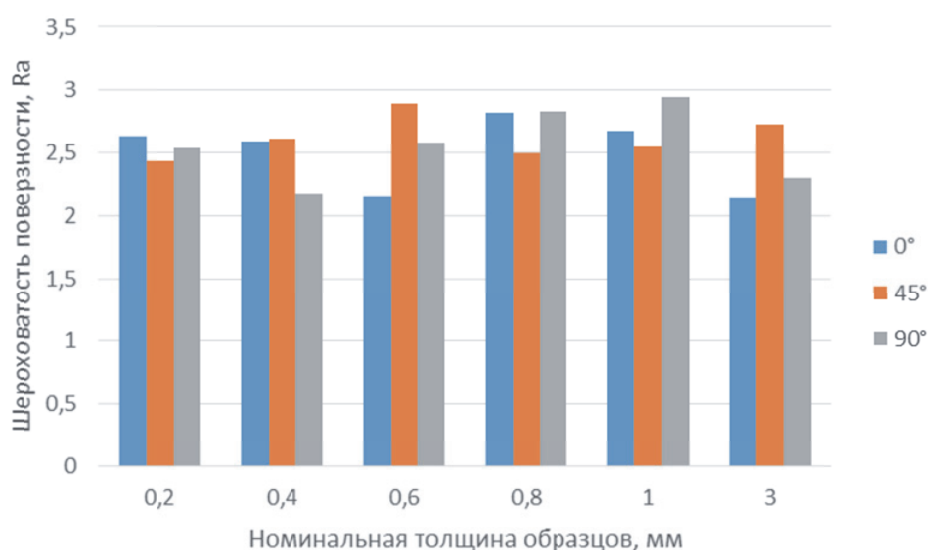
Рис. 10. Профилограмма, полученная при измерении образца толщиной 0,5 мм под углом 15°

**Таблица 3.** Значения параметра шероховатости образцов из жаропрочного сплава ВВ751П

Толщина образца, мм	Направление выращивания в плоскости X-Y					
	0°		45°		90°	
	Измерения вдоль образца	Измерения поперек образца	Измерения вдоль образца	Измерения поперек образца	Измерения вдоль образца	Измерения поперек образца
0,2	2,63	-	2,43	-	2,54	-
0,4	2,59	3,14	2,61	3,20	2,17	3,13
0,6	2,15	3,43	2,89	3,21	2,58	3,39
0,8	2,82	3,56	2,49	2,80	2,83	2,87
1,0	2,67	2,81	2,55	3,01	2,95	3,05
3,0	2,14	3,45	2,73	3,10	2,3	2,89

**Таблица 4.** Значения параметра шероховатости образцов из жаропрочного сплава ВВ751П

Толщина образца, мм	Направление выращивания в плоскости X-Z					
	75°		60°		45°	
	Измерения вдоль образца	Измерения поперек образца	Измерения вдоль образца	Измерения поперек образца	Измерения вдоль образца	Измерения поперек образца
0,2	2,44	-	3,06	-	2,6	-
0,4	3,41	3,89	2,68	3,20	2,31	3,31
0,5	3,49	3,73	2,47	2,52	2,09	2,89
0,7	2,77	3,71	2,66	3,04	3,58	4,18
0,9	2,75	3,17	2,15	2,94	3,21	3,59
2,0	3,35	3,59	2,72	3,06	2,62	2,5
3,0	3,43	3,82	2,45	3,16	2,94	2,96



**Рис. 11.** Зависимость изменения измеренной толщины от угла расположения образцов относительно платформы построения в плоскости X-Y

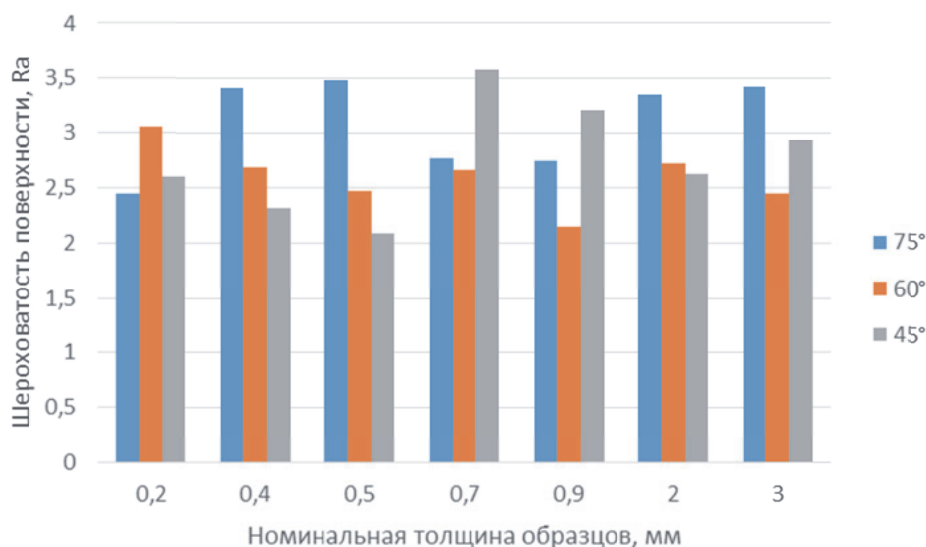


Рис. 12. Зависимость изменения шероховатости поверхности от угла наклона образцов относительно платформы построения в плоскости X-Z

и причины, их обуславливающие, вести онлайн протокол параметров процесса.

В результате анализа влияния основных технологических параметров СЛС на параметры качества изделия предлагается:

Вести учет температуры ванны расплава на протяжении всего процесса печати;

Определять размер частиц порошка и толщину насыпаемого слоя, плотность и пористость;

Во время сплавления отдельного слоя (трека) контролировать зону плавления (ее геометрию и температуру), скорость сплавления, шаг сканирования;

После сплавления слоя вести учет шероховатости верхнего слоя, геометрических отклонений формы трека, пористости слоя, зоны перекрытия;

После печати всей детали контролировать пористость детали, шероховатость поверхности, отклонения формы и геометрических параметров.

Данная работа представляет концепцию разработки системы менеджмента качества аддитивного производства на примере оценки влияния параметров технологического процесса на формируемые значения шероховатости детали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Manfred Schmid, Gideon Levy.* Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS // Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference 2012. doi.org/10.3929/ethz-a-010335931
2. *Tom Craeghs, Stijn Clijsters, Evren Yasa, Jean-Pierre Kruth.* Online quality control of selective laser melting // Proceedings of the 20th Solid Freeform Fabrication (SFF) symposium, Austin (Texas), 8-10 august, pages: 212-226.
3. *Park H. S., Tran N.H. and Nguyen D.S.* Development of a predictive system for SLM product quality // IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 227 (2017). doi:10.1088/1757-899X/227/1/012090.
4. *Khaimovich A.I., Stepanenko I.S., Smelov V.G.* Optimization of selective laser melting by evaluation method of multiple quality characteristics // IOP Conference series: materials science and engineering, "2017 International Conference on Aerospace Technology, Communications and Energy Systems, ATCES 2017" 2018.
5. *Агаповичев А.В., Князева А.Г., Смелов В.Г.* Численное исследование влияния параметров лазерного излучения на теплофизические параметры процесса селективного лазерного сплавления // Высокие технологии в современной науке и технике, Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов [под редакцией А.Н. Яковлева]. 2017.

## QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF SELECTIVE LASER MELTING OF DOMESTIC POWDER COMPOSITIONS

© 2018 A.I. Khaimovich, V.G. Smelov, V.V. Kokareva, A.V. Sotov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article describes the results of analysis of the SLM parameters (angle to the building platform and layer thickness) influence on the product quality parameters (roughness). The article deals with the Ishikawa diagram and the pyramid of quality management system of additive manufacturing, which make it possible to identify the main components.

**Keywords:** additive manufacturing, selective laser melting, quality management system.

*Aleksandr Khaymovich, Doctor of Technics, Associate Professor at the Engine Production Technology Department. E-mail: berill\_samara@bk.ru*  
*Vitaliy Smelov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Engine Production Technology Department, Head at the Laboratory of Additive Manufacturing.*

*E-mail: pdla smelov@mail.ru*  
*Victoria Kokareva, Research Fellow of at the Laboratory of Additive Manufacturing. E-mail: victoriakokareva@gmail.com*  
*Anton Sotov, Candidate of Technics, Research Fellow at the Laboratory of Additive Manufacturing. E-mail: sotovanton@yandex.ru*