Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования
RUDN Journal of Engineering Research

2024;25(3):296–307

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)
journals.rudn.ru/engineering-researches

DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-3-296-307
УДК 005.6
EDN: YYJYVM

Научная статья / Research article

Оценка применимости и шаги внедрения метода «Шесть сигм» в систему менеджмента качества аддитивного производства

И.С. Кушнир ✉, А.П. Адылина, Т.А. Левина

Московский политехнический университет, *Москва, Россия*
✉ kushn1r_ivan@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 6 марта 2024 г.
Доработана: 23 июня 2024 г.
Принята к публикации: 30 июня 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Несмотря на повсеместное внедрение 3D-печати на машиностроительных производствах в рамках Индустрии 4.0, качество изготовленной продукции на данный момент требует регламентации и усовершенствования. Для уменьшения объемов брака и повышения отказоустойчивости продукта, улучшения состояния рабочего места, удобства труда, учета готовых изделий и других немаловажных факторов качественного производственного цикла существует достаточное число методов и практик, применяемых во многих сферах (автомобильная, машиностроение, энергетика и т.д.). Один из этих методов — DMAIC (ОИАСК), предполагающий внедрение в технологическую сферу управления качеством продукции аддитивного производства метода 6 сигм с целью повышения ее качества на данных предприятиях. Цикл «определить — измерить — анализировать — улучшить — контроль» используется автором в контексте данного исследования для проведения анализа возможной оптимизации производственных процедур на предприятиях аддитивного производства методом селективного лазерного плавления (SLM). Анализ производственных практик и предложения по улучшению качества изготовленной продукции, основанные на методе ОИАСК, позволяют усовершенствовать нынешние процессы аддитивного производства на крупных технологических предприятиях и смогут положительно повлиять на качественные характеристики изделий. С помощью технологического подхода на основании цикла DFSS, благодаря применению последовательно каждого из шагов, возможно эффективное изменение в положительную сторону качества как самого процесса производства: вырастает точность изготовления на каждом этапе, процесс модернизируется с каждым новым циклом на основе предыдущих результатов, так и готовой продукции: уменьшается количество брака, улучшаются механические характеристики изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, управление качеством, искусственный интеллект, имитационное моделирование

© Кушнир И.С., Адылина А.П., Левина Т.А., 2024
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode

Вклад авторов

Кушнир И.С. — анализ научных источников, написание текста рукописи, обобщение результатов исследования, подготовка графических материалов, визуализация; *Адылина А.П.* — разработка методологии исследования; *Левина Т.А.* — работа с текстом рукописи, формулирование выводов

Для цитирования

Кушнир И.С., Адылина А.П., Левина Т.А. Оценка применимости и шаги внедрения метода «Шесть сигм» в систему менеджмента качества аддитивного производства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 3. С. 296–307. http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-3-296-307

Assessment of the Applicability and Steps of Implementing the Six Sigma Method in the Quality Management System of Additive Manufacturing

Ivan S. Kushnir, Anna P. Adylina, Tatyana A. Levina

Moscow Polytechnic University, *Moscow, Russia*
✉ kushn1r_ivan@mail.ru

Article history
Received: March 6, 2024
Revised: June 23, 2024
Accepted: June 30, 2024

Conflicts of interest
The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. Despite the widespread introduction of 3D printing in machine-building industries within the framework of Industry 4.0, the quality of manufactured products currently requires regulation and improvement. To reduce the volume of defects and increase the fault tolerance of the product, improve the condition of the workplace, work convenience, accounting for finished products and other important factors of the high-quality production cycle, there are a sufficient number of methods and practices used in many fields (automotive, mechanical engineering, energy, etc.). One of these methods is DMAIC, which involves the introduction of the 6 sigma method into the technological sphere of additive manufacturing product quality management in order to improve its quality at these enterprises. The "define-measure-analyze-improve-control" cycle is used by the author in the context of this study to analyze the possible optimization of production procedures at additive manufacturing enterprises by selective laser melting (SLM). The analysis of production practices and suggestions for improving the quality of manufactured products, based on the DMAIC, method, will improve the current additive manufacturing processes at large technological enterprises and will be able to positively affect the quality characteristics of products. With the help of a technological approach based on the DFSS cycle, through the application of each step sequentially, an effective change in the positive side of quality as the production process itself is possible: the manufacturing accuracy increases at each stage, the process is modernized with each new cycle, based on previous results; as well as finished products: the number of defects decreases, the mechanical characteristics of products improve.

Keywords: additive technologies, quality management, artificial intelligence, simulation modeling

Authors' contribution

Kushnir I.S. — analysis of scientific sources, writing the text of the manuscript, generalization of research results, preparation of graphic materials, visualization; *Adylina A.P.* — development of research methodology; *Levina T.A.* — work with the text of the manuscript, formulation of conclusions.

For citation

Kushnir IS, Adylina AP, Levina TA. Assessment of the applicability and steps of implementing the Six Sigma Method in the quality management system of additive manufacturing. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(3): 296–307. (In Russ.) http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-3-296-307

Введение

Внедрение аддитивного производства (АП) как процесса в нашу жизнь произвело революцию во многих системах производства как в предприятиях, так и при создании мелкосерийных деталей для фундаментальных отраслей. Создание новых продуктов, систем и процессов на производствах подразумевает управление их качеством как ключевой фактор для формирования регламентации для выходного изделия, а также работы предприятия — от производства до цепочки поставок. Основная особенность, которую предлагает АП, заключается в высокой гибкости дизайна и расширенной функциональности, при условии сокращенного времени выполнения работы над деталью. Широкое применение аддитивного производства ограничено из-за технических проблем, связанных с управлением качеством процесса. Для изменений в отрасли АП мы предлагаем использование метода шести сигм (6S), который продемонстрировал прорывной эффект в традиционных производственных отраслях, например в полупроводниковой и автомобильной промышленности [1], благодаря пяти шагам методологии DMAIC, включающего в себя определение, измерение, анализ, улучшение и контроль, которое и является основой для 6S. По мнению *Giovanni Condé* и др. [2], «…концепция бережливого производства „шесть сигм“ считается одним из наиболее эффективных подходов к трансформации. В проекте, описанном в этом исследовании, использовалась методология DMAIC для изучения первопричин дефектов, а также предлагались решения по их устранению для достижения цели проекта, ориентированной на сокращение дефектов в процессах литья под давлением алюминиевых автомобильных деталей и механической обработки. Используя методологию DMAIC, команда разработчиков достигла цели проекта...». В контексте аддитивного производства сосредоточенное использование данной методологии из всевозможных систем управления качеством отсутствует, несмотря успешное внедрение метода в устоявшихся отраслях (производство, здравоохранение, логистика и т. д.). Одними из первых, кто описал пример внедрения 6 сигм качества, были R.R. Delgadillo, K. Medini, T. Wuest [3]. Были приведены структура и шаги реализации метода на основе аддитивного производства и описана практика применения на примере, показавшем, что для создания подобных решений необходима команда аналитиков и сотрудников высшего звена. На основании анализа этих и многих других источников в данной статье постараемся описать основные шаги внедрения метода 6 сигм в 3D-печати, руководствуясь также опытом иностранных компаний из других сфер производства.

1. Метод «Шесть сигм» и его применение в аддитивных технологиях

Препятствием для широкого применения технологии АП в промышленности являются технические проблемы в управлении качеством. Например, сложные и трудно моделируемые технологические явления, такие как термические эффекты и остаточные напряжения, влияют на микроструктуру и механические свойства сборок АП. В результате возникают скрытые внутренние дефекты, которые ухудшают качество деталей и приводят к высокому уровню брака, особенно в случае единичного производства [4]. Реальные примеры показывают, что детали, создаваемые одновременно на одном аддитивном станке с одной и той же CAD-моделью, могут иметь разные результаты качества. На рис. 1 показан пример, где из семи деталей, произведенных одновременно на одном коммерческом аддитивном станке с использованием одной CAD-модели, только две из них не имеют дефектов. Высокий процент отказов в процессе производства деталей АП и связанные с этим затраты препятствуют более широкому использованию данной технологии.

Метод шести сигм (6S) — практика, широко применяемая в традиционных производственных отраслях, таких как полупроводниковая промышленность, планирование качества, обеспечения качества, контроля качества и неп-

рерывных улучшений [5; 6]. Для этого 6S включает методологию DMAIC, основанную на данных, которая состоит из этапов определения, измерения, анализа, улучшения и контроля.

Этап «определение» заключается в формулировке проблемы качества на основе технического задания клиентов. На этапе «измерение» производится сбор данных об основных переменных процесса из производственных систем. «Анализ» — это этап извлечения полезной информации из процесса, связанной с факторами, влияющими на дефекты. «Улучшение» — разработка проектных решений и методов для увеличения качества производственной системы. И на этапе «контроль» создаются планы управления процессами и оптимальной стратегии контроля в случае его потери над производственной системой.

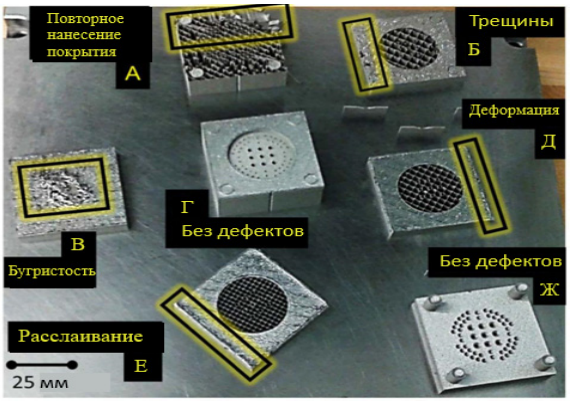

Рис. 1. Семь деталей из нержавеющей стали, построенных на коммерческой системе АП, условия процесса которых идентичны
И с т о ч н и к: выполнено И.С. Кушниром

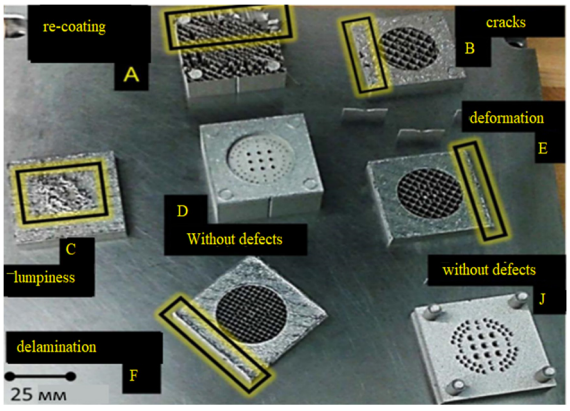

Figure 1. Seven stainless steel parts built on a commercial AP system, the process conditions of which are identical
S o u r c e: made by I.S. Kushnir

Данные шаги направлены на выявление и устранение основных причин дефектов с целью повышения качества конечной продукции. Хотя эта методология добилась значительных успехов во множестве областей, начиная от производства, здравоохранения и логистики, необходимо провести дополнительные исследования, чтобы инициировать практику управления качеством 6S в конкретном контексте АП.

Методы 6S были разработаны для обнаружения и устранения основных причин дефектов с целью улучшения качества конечной продукции. Несмотря на успехи этой методологии в различных областях, включая производство, здравоохранение и логистику, требуется проведение дополнительных исследований для внедрения практики управления качеством 6S в конкретных условиях АП.

Постепенный подход к АП создает серьезные проблемы для обеспечения и контроля качества. В частности, при использовании металлической пудры ее механические и физические параметры (форма и размер частиц) могут варьироваться от партии к партии, различия в интенсивности и диаметре лазерных и электронных лучей даже внутри одной производственной машины могут создавать детали с различными отклонениями от первоначально спроектированной CAD-модели. Поэтому каждый параметр, влияющий на итоговый результат процесса, должен быть адаптирован к используемым материалам [7].

Кроме того, система аддитивного производства может использовать различную толщину слоя при создании деталей. Например, объект высотой 5 см, созданный с использованием слоя толщиной 100 мкм, потребует 500 слоев. Если толщина слоя составляет 50 мкм, то количество слоев будет составлять 1000. Каждый из этих слоев может иметь свои дефекты. Даже если у

одного слоя есть маленькая вероятность наличия дефекта, для общей сборки высока вероятность иметь по крайней мере один дефект. Чтобы проиллюстрировать эффекты и проблемы многослойного производства, рассмотрим следующий пример.

1. Если вероятность наличия дефектов в слое равна 0,0114, то какова вероятность того, что этот слой не будет иметь дефектов?

$$1 - 0,0114 = 98,86\ \%;$$

2. Какова вероятность отсутствия дефектов для сборки со 100 слоями?

$$(1 - 0,0114)^{100} = 31,77\ \%;$$

3. Какова вероятность наличия хотя бы одного дефекта для сборки со 100 слоями?

$$1 - (1 - 0,0114)^{100} = 68,23\ \%;$$

4. Если вероятность того, что сборка будет содержать дефекты, указана как менее 10 %, то какова должна быть вероятность того, что слой будет иметь дефекты?

$$1 - (1 - x)^{100} = 10\ \% \Rightarrow x = 0,0011.$$

Важно отметить, что в данном примере предполагается, что каждый слой является независимым от остальных. Однако аддитивное производство имеет сильную корреляцию между уровнями, т.е. дефекты, образованные в одном слое, могут быть исправлены при обработке последующего слоя либо могут негативно сказаться на верхних уровнях и оказывать влияние на все последующие слои. Это аналогично многоступенчатой сборочной линии в традиционной производственной парадигме. В автомобильной промышленности сборка кузова автомобиля часто включает в себя последовательность сборочных операций. Вариации на одном этапе сборки потенциально могут привести к потоку вариаций на следующих этапах [8]. Однако физика операций многоэтапной сборки отличается от многослойного АП с НДФ в каждом слое.

2. Этапы и внедрение метода DMAIC

На этапе «измерение» производится сбор данных по ключевым переменным, связанным с процессом аддитивного производства. Входные переменные процесса: физические и химические характеристики металлических порошков и параметры конструкции модели CAD. Ситуативные переменные: настройки машины, отображение слоев. Выходные переменные процесса: контрольные точки после сборки. Для устранения высокого уровня сложности в мониторинге качества на протяжении всего процесса на предприятиях АП, а также повышения прозрачности и актуальности информации о ключевых переменных современные производственные отрасли активно инвестируют в передовые системы измерений.

Из-за доступности обширных данных на этапе «Измерение» по аддитивному производству на этапе «Анализ» становится возможным разработать более глубокое понимание текущего состояния и производительности процесса. Эти данные могут быть собраны либо в процессе послойного изготовления, либо в автономном режиме — характеристики материала перед сборкой или компьютерная томография после сборки. Автономные измерения позволяют проводить проверку качества, но имеют ограниченные возможности для исправления или ремонта в процессе, поскольку дефекты часто уже встроены в сборку.

Данные, собранные на этапе «Измерение», могут быть визуализированы различными способами для предоставления наглядной информации о процессе аддитивного производства. Примерами таких визуализаций могут быть стеки изображений, трехмерные облака точек, гистограммы, сетевые представления, а также преобразования Фурье или вейвлет-преобразования. Эффективная визуализация также помогает на этапе «Анализ» оценить и выделить существенные особенности изменчивости процесса или дефектов продукта. Последовательность шагов для реализации этой системы показана на рис. 2.

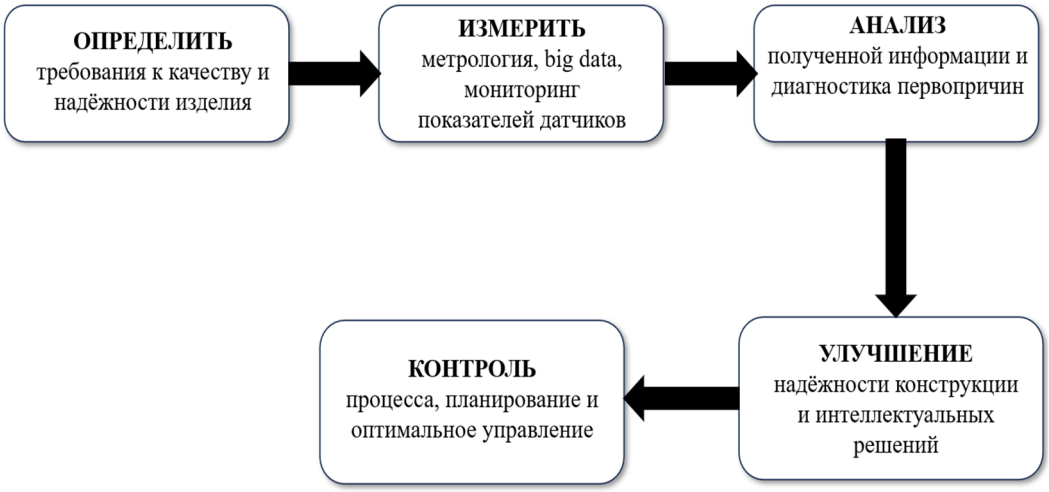

Рис. 2. Шаги по управлению качеством методом 6 сигм
И с т о ч н и к: выполнено И.С. Кушниром

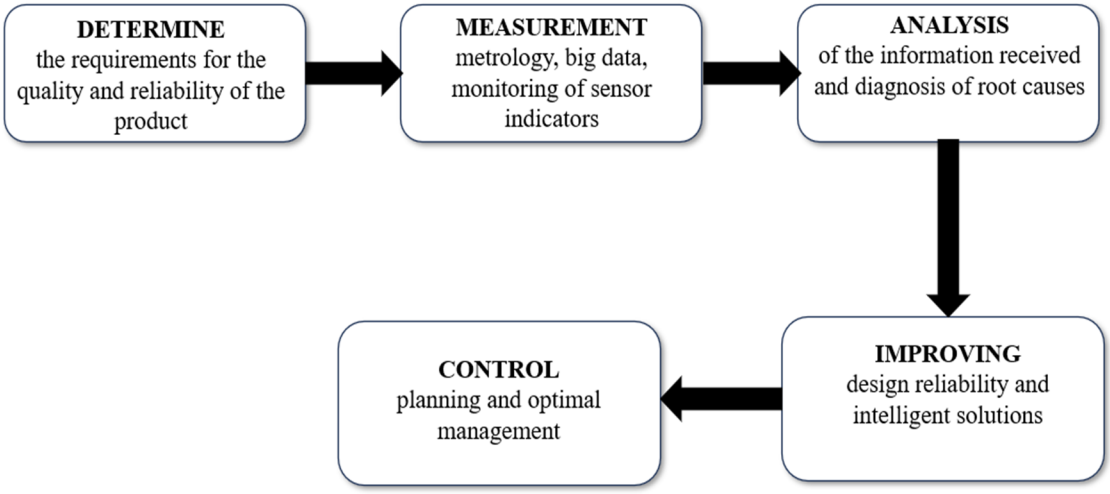

Figure 2. Steps for quality management using the 6 sigma method
S o u r c e: made by I.S. Kushnir

Извлеченная полезная информация из процесса (онлайн- и/или офлайн-данные с датчиков) на этапе «измерение» полномасштабно используется на этапе «анализ». Основная цель данного этапа заключается в исследовании взаимосвязей между ключевыми переменными в процессе (т.е. входными данными процесса, выходными данными и внутрипроцессными переменными), моделировании причинно-следственных связей между этими переменными и проблемами качества, а также разработке нового понимания их влияния на изменчивость процесса и дефекты продукта. Анализ помогает определить случайные и определяемые причины проблем с качеством в процессе моделирования. Если в процессе присутствуют только случайные причины (т.е. неопределяемые факторы, неидентифицируемые), то распределение должно быть нормальным. Однако если есть определяемые причины, то инструменты анализа помогают отследить, когда и как они влияют на производительность процесса, и выявить возможные причины для их устранения, чтобы вернуться к нормальному производству.

Конечные результаты производственного процесса АП, такие как внешний вид и качество сборки, часто зависят от настроек машины, таких как пространство для штриховки, мощность лазера и скорость сканирования. В АП всё чаще используются расширенные датчики для повышения наглядности информации и борьбы со сложностью взаимодействия машины и процесса, что в результате приводит к генерации больших объемов данных, таких как оптические изображения и КТ после сборки. Однако для реализации всего потенциала этих данных датчиков необходимы новые методы статистического контроля качества (Statistical Quality Control — SQC).

Существующие методы SQC, разработанные для традиционных производственных процессов, больше ориентированы на контроль ключевых характеристик готовой продукции, таких как точность размеров и профили, а не на многомерные данные датчиков. Исследования, проводимые в области аддитивной технологии, включают в себя сенсорную метрологию для контроля качества на месте. Также используются традиционные методы, такие как геометрическая метрология поверхности и определение размеров и допусков (GD&T), в основном ориентированные на евклидовы характеристики готовых изделий, а не на контроль внутренних дефектов в деталях АП со сложной геометрией [7].

Статистическое управление качеством для АП — текущие подходы к мониторингу качества являются автономными, основанными исключительно на методах, управляемых данными (нейронные сети, смешанное гауссовское моделирование и статистический анализ), или формулировках с сосредоточенными массами [9]. Изучение управления качеством АП с использованием аналитических моделей на основе датчиков и многоуровневых стратегий АП QA/QC в данный момент всё еще является темой долгих и глубоких исследований. Местный мониторинг предоставляет возможность устранения дефектов АП в процессе, т.е. незаменим для производственных отраслей, требующих строгих стандартов качества и эстетики продукции.

Следовательно, первым шагом является извлечение полезной информации из данных датчиков АП, а затем оценка уровней дефектов детали. На рис. 3 показан верхний слой детали АП в разных масштабах, где в некоторой степени можно наблюдать многомасштабное самоподобие. Другими словами, детализированные изображения построений АП часто могут отображать мультифрактальные характеристики в различных масштабах. Ограниченные возможности обработки фракталов с присутствием нелинейности и нерегулярных узоров на изображениях при традиционных линейных методах являются главным подводным камнем данного способа. При анализе фракталов извлекается лишь одно фрактальное измерение, которое описывает масштабно-инвариантное поведение фрактальных объектов, но не может полностью охарактеризовать мультифрактальные паттерны, которые часто проявляются в объектах реального мира [10].

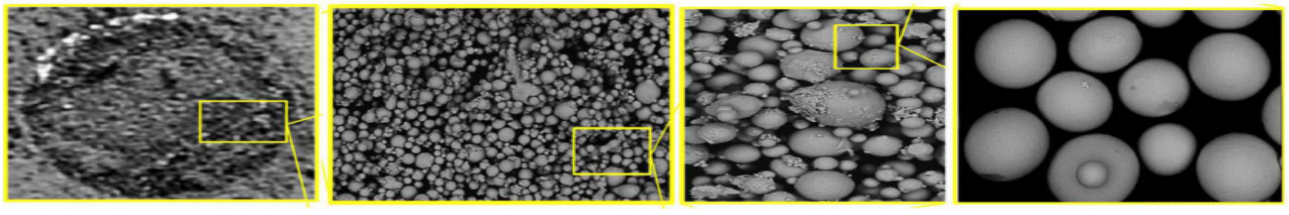

Рис. 3. Мультифрактальные паттерны в профилях изображений детали АП
И с т о ч н и к: выполнено И.С. Кушниром

Figure 3. Multifractal patterns in the image profiles of the AP part
S o u r c e: made by I.S. Kushnir

Шаг «улучшить» использует знания, основанные на данных, для поиска изменений или параметров, которые можно внести в процесс производства, для улучшения производительности. На этапе «Измерения» создается база обширных данных о главных переменных для повышения наглядности информации в процессе производства. На этапе «анализа» из данных извлекается полезная информация и выполняется причинно-следственный анализ между этими ключевыми переменными процесса.

Для изучения и понимания взаимосвязей параметров, элементов и переменных в процессе АП создается единая высокоуровневая карта — онтология. Для описания входных и выходных параметров прожигающего лазера, механических, тепловых и иных микроструктурных свойств деталей аддитивного производства могут быть использованы десятки терминов-наименований внутри этой онтологии. Данные онтологические модели используются для перепроектирования процесса, выбора датчиков и улучшения качества, также они применяются для связи характеристик материалов и параметров процесса.

Для наглядного примера в процессе производства лазер влияет на тепловое поведение и эволюцию микроструктуры детали [11], а тепловое распределение источника оказывает воздействие на поведение ее микроструктуры и механические свойства [12]. Случайные или назначаемые причины изменчивости в процессе производства определяются на этапе «анализа». На этапе «улучшения» появляется возможность экспериментировать с использованием разных уровней факторов с помощью статистических планов (например, случайный план блоков, факторный план и дизайн поверхности отклика), исследовать влияние этих факторов на качество процесса производства деталей. Самое главное, можно определить оптимальные настройки факторов, чтобы гарантировать достижение желаемой производительности процесса АП, который устойчив к неконтролируемым факторам и/или случайным шумам.

Для улучшения производительности процессов и качества деталей приведенные выше эксперименты могут проводиться на физических машинах АП, а также на моделях компьютерного моделирования. Анализ моделирования включает разработку компьютерных экспериментов, которые часто выполняются быстрее и дешевле, чем физические эксперименты. Перед проведением дорогостоящих экспериментов на машинах аддитивного моделирования анализ с помощью моделирования может помочь проверить переменные процесса, уменьшить количество факторов и разработать более экономически эффективные эксперименты на этапе «улучшения». Если процесс АП не соответствует желаемому уровню производительности и приводит к большому количеству дефектных сборок, может потребоваться отказ от старого процесса и перепроектирование нового процесса АП. Таким образом, в подходе DMAIC этап «улучшения» превращается в этап «проектирования».

И на заключительном шаге «контроль» производится изучение и оптимизация стратегий действий для аддитивного моделирования (АМ), когда состояние сборки динамически меняется от одного уровня к другому. Поскольку отделка каждого слоя будет влиять на следующий и все последующие слои, это типичная программа последовательного принятия решений в условиях реальной неопределенности (например, случайных вариаций, возмущений или ошибок измерений, настроек машины, условий окружающей среды и статистических данных).

Крайне важно, чтобы машины АП могли устранять зарождающиеся дефекты. Гибридные машины как с аддитивными, так и с субтрактивными производственными возможностями позволяют предпринимать корректирующие действия и выполнять послойный ремонт, тем самым реализуя новую парадигму бездефектного АП. Например, аналитические методы на основе датчиков помогают охарактеризовать и оценить состояние дефектов в каждом слое сборки АП. Если слой оценивается как имеющий небольшую вероятность содержать дефек-

ты, процесс производства будет продолжаться и не будет предпринимать никаких корректирующих действий. Вместе с тем если слой имеет высокую вероятность, чтобы иметь встроенные дефекты, процесс АП приостановится и предпримет действие по удалению этого дефектного слоя. Количество доступных действий во многом зависит от технологического прогресса гибридных машин. Если после построения каждого слоя доступно больше действий, то динамические переходы между парами состояние–действие станут более сложными. В основном это связано с тем фактом, что уровни аддитивного моделирования не являются независимыми, а скорее сильно взаимосвязаны друг с другом. Кроме того, существуют погрешности в измерениях датчиков, настройках машины, окружающей среде, оценке дефектов и переходах от слоя к слою. Новая структура последовательной оптимизации должна учитывать неопределенность в процессах аддитивного доступа и реализовывать аддитивное управление без дефектов путем минимизации ожидаемых совокупных затрат в конце, когда все уровни будут завершены.

Структура последовательного принятия решений для интеллектуального АП сформулирована как модель марковского процесса принятия решений (Markov decision process — MDP). Метод MDP широко используется и доказал свою эффективность в управлении инженерными системами, однако необходимы соответствующие исследования и эксперименты для проверки работы данного процесса для реализации интеллектуального АП с использованием MDP.

3. Результаты и обсуждение

Существует достаточное количество примеров применения методов шести сигм во многих сферах производства. P.B. Ranade, G. Reddy в своей работе представили показатели, получившиеся в результате применения системы DMAIC к песчаному литью [13]. Исследования проводились в литейном цехе на основе подхода Тагучи для оптимизации параметров процесса литья в песчаные формы. Структурированный подход сигм качества помог решить проблему снижения количества дефектов с помощью таких инструментов качества, как гистограмма, диаграмма Парето, контрольная карта, диаграмма причин и следствий. Результат, полученный в ходе проверочных экспериментов с использованием оптимальной комбинации параметров, показал отличное согласие с прогнозируемыми результатами при проектировке процесса методом шести сигм.

Важно понимать, что не все организации, имеют возможность внедрить метод шести сигм. Нехватка средств, времени и опыта может стать препятствием для внедрения этой методологий. Реальность такова, что интеграция шести сигм не является распространенным явлением среди производств и МСП (малое и среднее предпринимательство) [14]. Вероятно, что нехватка ресурсов является причиной невозможности внедрения метода шести сигм. Тем не менее, некоторые МСП добились успеха в последовательном внедрении данного метода [15]. Фактически S.S. Chakravorty показал, что шесть сигм могут быть успешными, если дополнительно внедряется «бережливое производство» [16]. Однако, как заявили M. Kumar и др. [17], руководство относительно того, с какой методологии начинать и как изначально внедрять методологию, неясно и не содержит подробностей. Неясно, является ли подходящей отправной точкой бережливое производство или шесть сигм, или интегрированная версия того и другого. Это важно, поскольку некоторые организации не уверены в том, какие практики улучшения совместимы с бизнесом и средой организации [18].

Также следует отметить, что существует малое количество исследований, иллюстрирующих успех внедрения шести сигм в систему менеджмента качества аддитивного производства. Следовательно, предприятия, на которых изготавливается продукт способом селективного лазерного сплавления, должны оценить свои ресурсы и критические факторы для выбора данной методологии, эффективного и действенного внедрения в процесс производства,

основываясь на результатах исследователей в смежных отраслях производства.

Необходимо провести планирование качества, чтобы определить потребности клиентов в точности готового изделия, оценить количество дефектов, эстетическую и геометрическую точность продукта, и необходимость проведения планирования качества, основываясь на предпочтениях конечного заказчика.

Заключение

Таким образом, основываясь на вышесказанном, мы делаем вывод, что эффективное управление качеством АП требует реализации ряда мероприятий, ориентированных на качество. Необходимо провести планирование качества, чтобы определить потребности клиентов в продуктах, оценить количество дефектов, эстетическую и геометрическую точность продукта. Учитывая ресурсы, критические факторы и мнение клиентов, производители продукции в сфере аддитивного производства смогут разработать правильный стратегический план для улучшения качества выпускаемой продукции. Обратная связь поможет сэкономить время и снизить затраты на обработку возвратов продукции, гарантийные платежи и жалобы покупателей, а также сфокусироваться на уменьшении изменчивости процесса и гарантировать соответствие качества конечных сборок стандартам и спецификациям.

Рис. 4. Широкое представление потока квалификации АП о материале, процессе и продукте
И с т о ч н и к: выполнено И.С. Кушниром

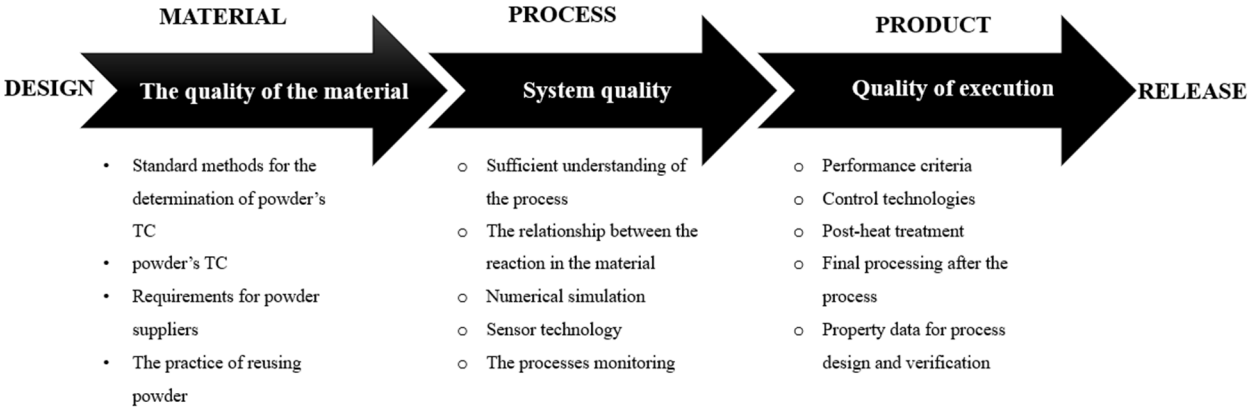

Figure 4. A broad representation of the AP qualification flow about the material, process and product
S o u r c e: made by I.S. Kushnir

Нерешенные проблемы, связанные с качеством АП, приведут к сохранению применения традиционных и хорошо зарекомендовавших себя методов производства. Однако с учетом важности импортозамещения, стратегической выгоды и экономической эффективности возникает всё большая потребность в решении проблемы качества в аддитивном производстве, а также в уменьшении изменчивости процесса и повышении его воспроизводимости. Схематичное представление потока данных при внедрении DMAIC в аддитивное производство представлено на рис. 4.

Подход DMAIC позволяет компании определить факты текущей проблемы и предложить решение, основанное на фактах, а не на предположениях, что последовательно приведет к повышению показателей качества, значительному улучшению перспективы АП в масштабах производства и даст возможность эффективно использовать эту технологию в нашей стране.

Кроме того, структура была изучена только в производственном секторе. Будущие исследования могут также рассмотреть методы интеграции механизмов и моделей DMAIC в существующую структуру для повышения производительности сотрудников на предприятиях АП, вовлечения клиентов и стремления к инвестициям в сообщество для получения качественной и количественной оценки улучшений. Наконец, исследователи и практики могут изучить включение данного метода в структуру в цулях улучшения управления рабочей силой и лучшего контроля/мониторинга процессов безопасности рабочих кадров на производстве.

References / Список литературы

1. Gerger A, Firuzan AR. Taguchi based Case study in the automotive industry: nonconformity decreasing with use of Six Sigma methodology. *Journal of Applied Statistics*. 2021;48(13–15):1837086. http://doi.org/10.1080/02664763.2020.1837086

2. Condé GCP, Oprime PC, Pimenta ML, Sordan JE, Bueno CR. Defect reduction using DMAIC and Lean Six Sigma: a case study in a manufacturing car parts supplier. *International Journal of Quality & Reliability Management.* 2023;40(9):2184–2204. https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2022-0157

3. Delgadillo RR, Medini K, Wuest T. A DMAIC Framework to Improve Quality and Sustainability in Additive Manufacturing — A Case Study. *Sustainability*. 2022;14(1):581. https://doi.org/10.3390/su14010581

4. Levina TA, Safonov EV, To MH. Analysis of methods and means for assessing the quality of the surface layer of products obtained by the ODS method from heat-resistant alloys. *PROM-ENGINEERING proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical conference*. Chelyabinsk; 2021. p. 90–96. (In Russ.) EDN: ZSDJQV

Левина Т.А., Сафонов Е.В., То М.Х. Анализ методов и средств оценки качества поверхностного слоя изделий, получаемых slm-методом из жаропрочных сплавов // Труды VII Всероссийской научно-технической конференции ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ. Челябинск, 2021. С. 90–96. EDN: ZSDJQV

5. Bauereiss A, Scharowsky T, Körner C. Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(11):2522–2528. http://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2014.05.002

6. Box GEP, Woodall WH. Innovation, quality engineering, and statistics. *Quality Engineering*. 2012;24(1):20–29. http://doi.org/10.1080/08982112.2012.627003

7. Brandl E, Leyens C, Palm F. Mechanical properties of an additive made from Ti–6Al–4V using wire and powder-based processes. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. Sheffield, UK, 2011;26(1):012004. http://doi.org/10.1088/1757-899X/26/1/012004

8. Dasgupta T. Using the six-sigma metric to measure and improve the performance of a supply chain. *Total Quality Management & Business Excellence.* 2003;14(3):355–366. http://doi.org/10.1080/1478336032000046652

9. Qian L, Mei J, Liang J, Wu X. Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti–6Al–4V samples. *Materials Science and Technology*. 2005;21(5):597–605. http://doi.org/10.1179/174328405X21003

10. Savio E, De Chiffre L, Schmitt R. Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals*. 2007;56(2):810–835. http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.008

11. Shi J, Zhou S. Quality control and improvement for multistage systems: A survey. *IIE Transactions*. 2009;41(9):744. http://doi.org/10.1080/07408170902966344

12. Tofail S, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A, Bose S, O'Donoghue L, Charitidis C. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*. 2018;21(1):23–38. http://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001

13. Ranade PB, Reddy G. Implementation of DMAIC methodology in green sand-casting process. *Materialstoday: Proceedings*. 2021;42(2):500–507. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.475

14. Alhuraish I, Robledo C, Kobi A. A comparative exploration of lean manufacturing and six sigma in terms of their critical success factors. *Journal of Cleaner Production*. 2017;164(15):325–337. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.146

15. Dora M, Kumar M. Operational performance and critical success factors of lean manufacturing in European food processing SMEs. *Trends in Food Science & Technology*. 2013;31(2):156–164. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.03.002

16. Chakravorty SS. Six sigma programs: an implementation model. *International Journal of Production Economics*. 2009;119(1):1–16 https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.01.003

17. Kumar M, Khurshid KK, Manoj KD, Timas W, Anton J. Lean/six sigma implementation in SMEs: key findings from international research. *4th Joint World Conference on Production & Operations Management/ 19th International Annual European OMA Conference*. Amsterdam; 2012. p. 1–5.

Сведения об авторах

Кушнир Иван Сергеевич, магистрант факультета машиностроения, Московский политехнический университет, Москва, Россия; ORCID: 0009-0002-5032-468X; e-mail: kushn1r_ivan@mail.ru

Адылина Анна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации, метрологии и сертификации факультета машиностроения, Московский политехнический университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 4076-9283, ORCID: 0009-0008-6763-9278; e-mail: annaadylina@mail.ru

Левина Татьяна Анатольевна, кандидат экономических наук, заведующая кафедрой стандартизации, метрологии и сертификации, факультет машиностроения, Московский политехнический университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6554-6019, ORCID: 0000-0001-5471-5632; e-mail: t.a.levina@mospolytech

About the authors

Ivan S. Kushnir, Master's student of the Faculty of Mechanical Engineering of the Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; ORCID: 0009-0002-5032-468X; e-mail: kushn1r_ivan@mail.ru

Anna P. Adylina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Certification of the Faculty of Mechanical Engineering, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 4076-9283, ORCID: 0009-0008-6763-9278; e-mail: annaadylina@mail.ru

Tatyana A. Levina, PhD in Economics, Head of the Department of Standardization, Metrology and Certification of the Faculty of Mechanical Engineering, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6554-6019, ORCID: 0000-0001-5471-5632; e-mail: t.a.levina@mospolytech