

УДК 621.7-51

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕКЦИЙ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ КАЧЕСТВА

© 2020 В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, А.В. Агаповичев, В.В. Кокарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 02.11.2020

В данной работе представлены результаты исследования точности и стабильности изготовления секций соплового аппарата турбины, методом селективного лазерного сплавления, на основе контрольных карт качества. Изготовлены секции соплового аппарата турбины, из материала Inconel 738, методом селективного лазерного сплавления на установке SLM 280HL. Проведён контроль геометрических характеристик секций соплового аппарата турбины, изготовленной по аддитивной технологии, на координатно-измерительной машине. Проведена процедура статистического анализа технологического процесса с использованием контрольных карт для количественных данных и оценка возможностей процесса, и его пригодности для выполнения заданных требований. В качестве характеристики качества изделия выбран показатель - точность геометрии профиля пера лопаток секции соплового аппарата, который существенно влияет на эксплуатационные характеристики продукции. В результате проведенного статистического анализа установлено, что процесс находится в состоянии статистической управляемости в отношении внутренней изменчивости, процесс пригоден для обеспечения заданных требований и обладает достаточным запасом возможностей, необходимым для эффективного управления ходом процесса. Проверка условий обеспечения качества соответствия требованиям указывает на то, что возможно наличие значений, лежащих за границей допуска и как следствие возможен брак продукции.

Ключевые слова: Селективное лазерное сплавление, жаропрочный порошок, структура материала, точность, качество, сопловая секция, стабильность технологического процесса, контрольные карты качества.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-28-35

ВВЕДЕНИЕ

Одним из динамично развивающихся направлений аддитивных технологий является процесс селективного лазерного сплавления/плавления (СЛС) металлического порошка. СЛС позволяет изготавливать детали сложной формы, однако в процессе СЛС в результате многочисленных циклов нагрева-охлаждения происходит изменение распределения температурных нагрузок, что влечёт за собой появление остаточных напряжений, приводящих к искажению формы и короблению деталей, отрыву деталей от платформы построения, трещинам. В результате действия остаточных напряжений

от термических нагрузок при лазерном синтезе тонкостенных и сложнопрофильных деталей, возникают существенные деформации, которые приводят к браку. Основные требования к изделиям, получаемых аддитивными технологиями – это обеспечение заданных показателей качества по геометрической точности, состоянию поверхностного слоя, фазовому составу, структуре на микро- макро и мезоуровнях, а также требований отсутствия дефектов в виде несплавления порошинок, остаточной пористости, термических поводок.

На сегодняшний день большое количество публикаций относится к анализу геометрической точности синтезируемого изделия в зависимости различных параметров, например ориентации, расположении на платформе построения, высоты изделия. Так авторы Franchitti и др. [1] рассмотрели влияние перечисленных выше факторов на точность прямоугольных образцов из Ti6Al4V, точность определялась измерением толщины образцов. Наиболее значимыми факторами оказались ориентация и расположение на платформе построения. Grasso and Colosimo [2] провели обзор современных методов мониторинга процесса сплавления с целью уменьшения вероятности появления дефектов.

Алексеев Вячеслав Петрович, аспирант.

E-mail: alexeev_v.p@mail.ru

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий производства двигателей. E-mail: berill_samara@bk.ru

Смелов Виталий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, исполнительный директор ИДЭУ.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Агаповичев Антон Васильевич, старший преподаватель кафедры технологии производства двигателей.

E-mail: agapovichev5@mail.ru

Кокарева Виктория Валерьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии производства двигателей. E-mail: charming_carrot@mail.ru

В работе [3] проводится анализ точности и отклонение форм тонкостенных деталей, изготавливаемых технологией селективного лазерного сплавления алюминиевого сплава. Одним из самых основных недостатков технологии является температурный градиент, вызывающий остаточные напряжения, которые приводят к образованию трещин и отклонению формы. Как показывают исследования, стратегия сканирования оказывает наибольшее влияние на процесс образования остаточных напряжений.

Каждый производственный процесс управления обладает определенной изменчивостью вследствие наличия большого количества действующих факторов. Поэтому наблюдаемые результаты работы процесса также не-постоянны. Исследование этой изменчивости позволяет достичь понимания ее природы, что обеспечивает возможность управления процессом. Одним из методов управлением производственным или технологическим процессом, который обладает определенной изменчивостью, вследствие действия на него множества факторов, является статистическое управление процессами с использованием контрольных карт качества. Контрольные карты являются основным инструментом статистического управления процессами. Они обеспечивают простой графический метод, позволяющий оценить собственную изменчивость процесса; использовать для управления процессом данные о его изменчивости (наличие тренда серии, циклов и т. п.); определить, ведет ли он себя предсказуемым и стабильным образом и возможна ли оценка соответствия процесса установленным требованиям и т.д. (4).

В конструкцию современных и перспективных ГТД входит большое множество деталей, отличающихся высокими точностными параметрами, использованием специально профилированной конструкцией и часто наличием скрытых полостей, каналов малого размера. Характерной особенностью подобных деталей является, в первую очередь, сложность технологического процесса их изготовления. Среди сложнопрофильных деталей особое внимание в производстве уделяется сопловым лопаткам турбины.

В настоящее время допуски формы пера сопловых лопаток, регламентируемые нормативной технической документацией, достигают $\pm 0,2$ мм. Повышенные требования к точности изготовления лопаток требуют учета влияния технологических факторов на стабильность процесса изготовления. Отмеченное в полной мере относится к технологиям СЛС, которые до конца не исследованы применительно к сопловым лопаткам ГТД.

Целью данной работы является исследование точности и стабильности изготовления секций сопловых аппаратов турбины методом

селективного лазерного сплавления с использованием контрольных карт качества.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования точности и стабильности технологического процесса изготовления секций соплового аппарата турбины ГТД методом СЛС с использованием контрольных карт качества включает в себя следующие этапы: изготовление секций соплового аппарата турбины, из материала Inconel 738, методом СЛС на установке SLM 280HL; проведение контроля геометрических характеристик секций соплового аппарата турбины; проведение процедуры статистического анализа технологического процесса с использованием контрольных карт для количественных данных; оценка возможностей процесса и его пригодности для выполнения заданных требований.

Изготовление секций соплового аппарата турбины, выращенных из металлического порошка (средний диаметр частиц составляет 15...53 мкм) жаропрочного сплава Inconel 738 производилось на установке SLM 280HL. Для соплового аппарата было определено оптимальное положение детали на платформе построения с учетом основных особенностей процесса СЛС, а также требований, предъявляемых к конструкции детали (рис. 1). Расположение детали необходимо задать таким образом, чтобы верхняя и нижняя полки были под углом относительно платформы с построением материала поддержки на входной кромке лопатки. Наличие материала поддержки на спинке и корыте лопатки является недопустим в силу высокой шероховатости после удаления поддерживающих структур. Стоит также отметить, такое расположение секции обеспечивает минимальную площадь сплавления детали в слое порошка, что в, свою очередь, позволяет минимизировать остаточные напряжения, приводящие к искривлению, короблению и возможному отрыву деталей от платформы построения.

Для сплавления порошка в установке используется инфракрасный волоконный лазер с длиной волны 1075 нм и максимальной мощностью 400 Вт, работающий в непрерывном режиме. Для предотвращения окисления и возгорания частиц порошка во время процесса формирования монослоев рабочая камера заполняется инертным газом, при этом содержание кислорода не превышает 0,2%. Основные параметры изготовления тестовых образцов секций соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления из металлического порошка жаропрочного сплава Inconel 738 на установке SLM 280HL: мощность 325 Вт, скорость сканирования 677 мм/с [5]. Изготовленные секции соплового аппарата турбины ГТД представлены на рис. 2.

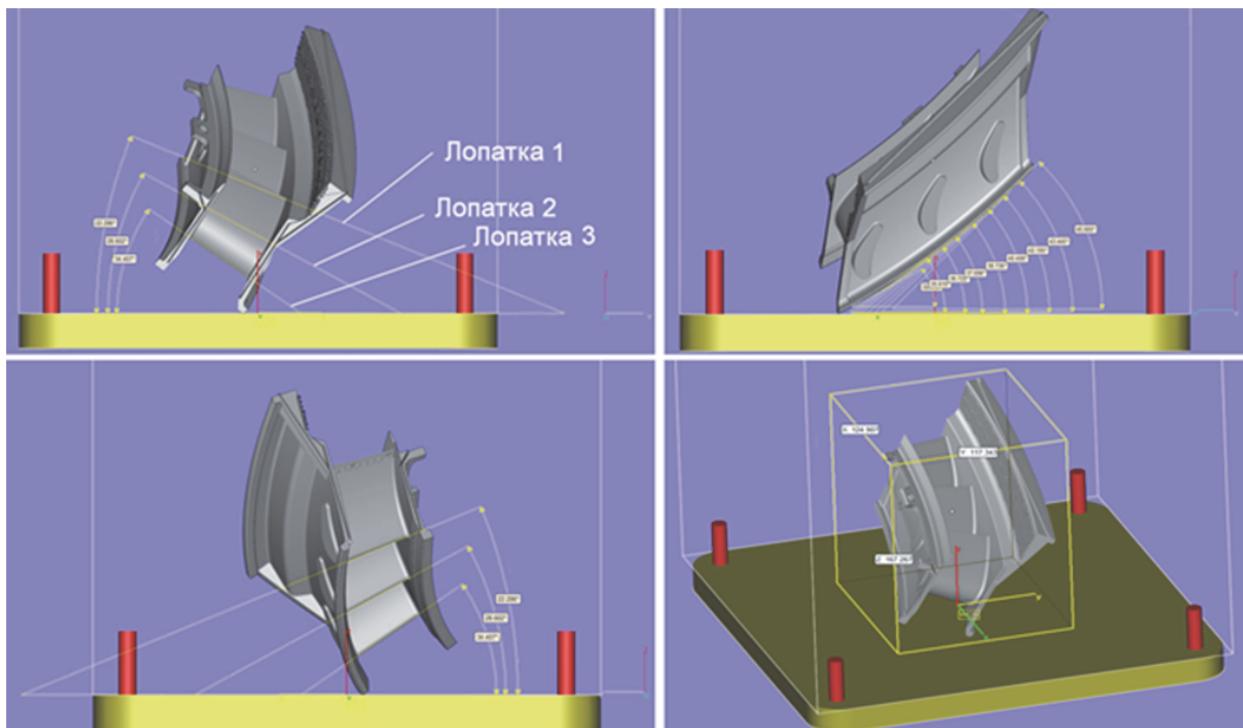


Рис. 1. Расположение модели соплового аппарата на платформе построения 3D принтера



Рис. 2. Тестовая партия заготовок секций соплового аппарата

Контроль секций соплового аппарата турбины ГТД, изготовленной по аддитивной технологии производился на координатно-измерительной машине HERA 15.10.9 при температуре $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 80%. При контроле геометрических параметров лопатки использовалось специализированное программное обеспечение Metrologic Group Metrolog X4 V9. Измерение профиля пера каждой лопатки секции соплового аппарата турбины осуществлялось в трех сечениях. Результат измерений профиля пера одной лопатки соплового аппарата турбины в трех сечениях представлен на рис. 3.

Геометрия профиля пера каждой из лопаток одинакова, но в процессе выращивания лопатки соплового аппарата турбины, за счет разного угла наклона на платформе построения, находятся в разных условиях (условия теплоотвода, высота и время выращивания и т.д.), что сказывается на

точности и стабильности изготовления профиля пера. Вследствие наличия большого количества воздействующих факторов данный процесс обладает определенной изменчивостью. Исследование этой изменчивости позволяет достичь понимания ее природы, определить характерные особенности процесса изготовления и дать оценку пригодности метода СЛС применительно к данным типам деталей.

Статистический анализ данных, полученных по результатам измерений профиля пера каждой из лопаток секции соплового аппарата турбины, проводился с использованием контрольных карт качества для количественных данных. В некоторых ситуациях для оценки или управления процессом невозможно либо не practically использовать выборки (подгруппы) данных. Это связано с ситуациями, когда измерения дорогостоящие (например, при разрушающем контроле) или в случае, когда нельзя получить более одного измеренного значения показателя. В подобных ситуациях управлять процессом можно на основе индивидуальных значений.

Используя метод контрольных карт индивидуальных значений и скользящих размахов, проведем статистический анализ хода процесса и определим его особенности, и основные характеристики.

2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Оценка качества изделия «секция соплового аппарата турбины» производится по количественному признаку. В качестве характеристики

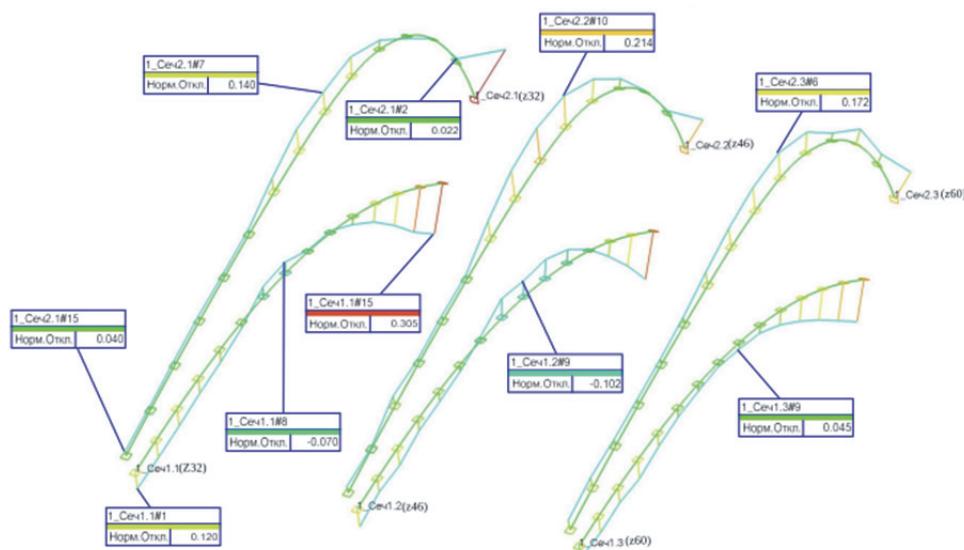


Рис. 3. Результаты измерений профиля пера одной лопатки соплового аппарата турбины в трех сечениях

качества изделия выбран показатель – точность геометрии профиля пера каждой из лопаток секции соплового аппарата, которая существенно влияет на эксплуатационные характеристики продукции. Допуск формы профиля теоретических сечений пера в диаметральном выражении $\pm 0,2$ мм. Отметим, что в данной работе анализи-

руется технологический процесс изготовления каждой отдельной секции соплового аппарата на наличии характерных особенностей процесса.

Воспользуемся программным обеспечением Statistica и построим комплексный график с X-bar и MR картами (рис. 4). Данный вид анализа строит составной график из 6 графиков, вклю-

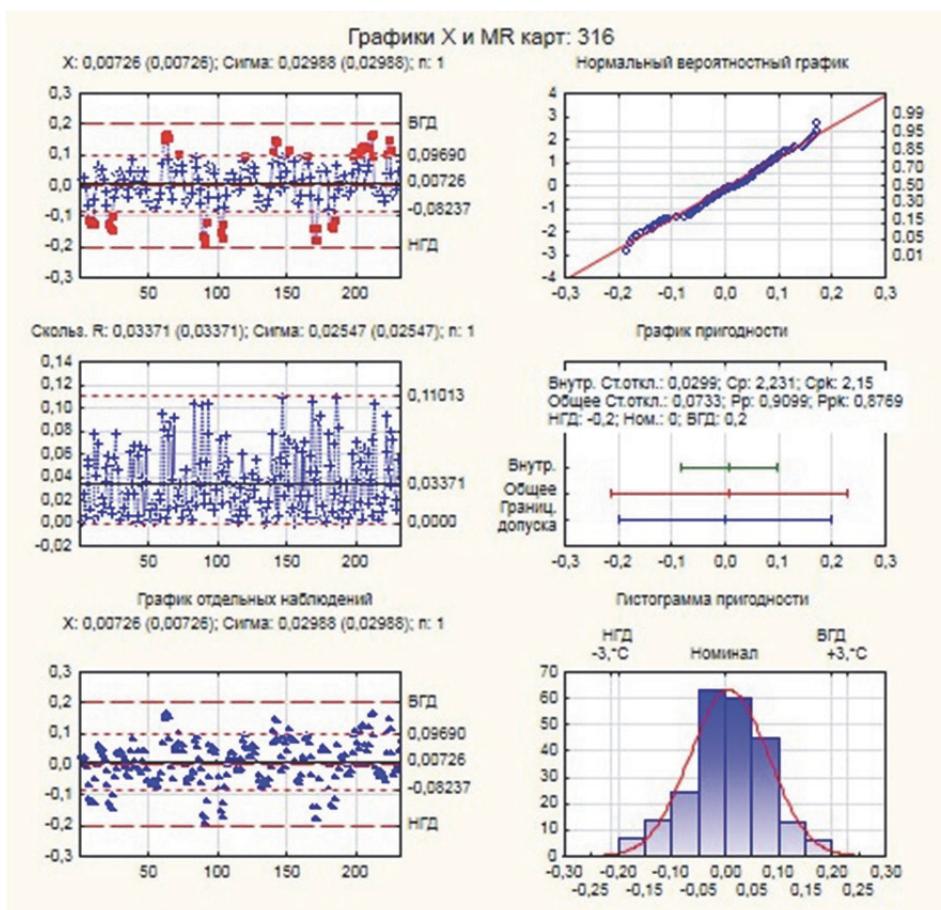


Рис. 4. Комплексный график с X и MR картами

чая X карту (для отдельных наблюдений) и MR карту (скользящих размахов) для контроля над изменчивостью процесса.

Отдельно рассмотрим MR карту (скользящих размахов) для контроля над изменчивостью процесса (рис. 5). При использовании карт индивидуальных значений оценку внутренней изменчивости определяют на основе меры вариации, полученной по скользящим размахам двух последовательных наблюдений.

Скользящий размах MR рассчитывается как модуль разности первого и второго измерений $|X_1 - X_2|$, второго и третьего измерений $|X_2 - X_3|$ и т.д. Число скользящих размахов MR на 1 меньше, чем общее число измеренных значений N, объем выборки n условно рассматривается равным 2-м единицам. На основе скользящих размахов вычисляют средний скользящий размах R, который используют для построения контрольных карт.

Прежде всего, необходимо оценить находится ли процесс в состоянии статистической управляемости в отношении внутренней изменчивости (стабильность процесса по размахам). Оценка производится с использованием

границ UCL_R и LCL_R, границ зон A, B и C, а также восьми признаков [6]. В нашем случае точки выборочных размахов не нарушают границу $UCL_R = 0,011$ и $LCL_R = 0$, т.е. отсутствует признак 1, а также нет присутствия особых структур точек, описанных в признаках 2–8 [6]. Следовательно, процесс находится в состоянии статистической управляемости по скользящим размахам MR, т.е. в отношении внутренней изменчивости.

Знание величины стандартного отклонения внутренней изменчивости σ позволяет вычислить индекс пригодности (индекс возможностей) процесса $C_p = T / 6\sigma$. Если $C_p > 1$, то процесс пригоден для выполнения заданных требований и имеется запас возможностей процесса. Для нашего примера $C_p = 2,231 > 1$, процесс пригоден для выполнения заданных требований и имеется запас возможностей, достаточный для управления ходом процесса по выполнению заданных требований.

Далее по карте индивидуальных значений проведем оценку особенностей процесса (рис. 6а) и определим имеющиеся тренды – тенденции поведения (протекания) процесса во времени (рис. 6б).

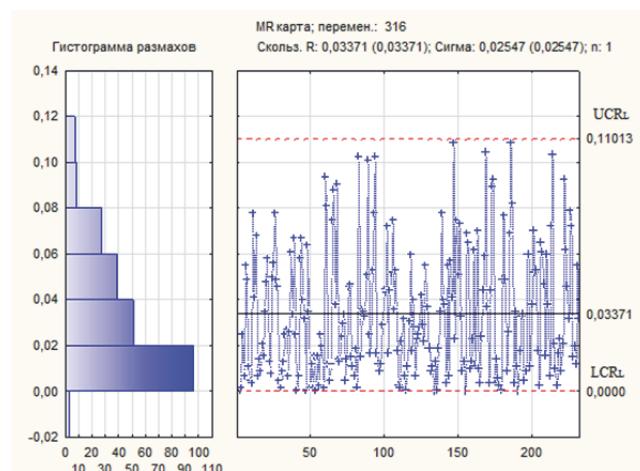


Рис. 5. Карта скользящих размахов (MR- карта)

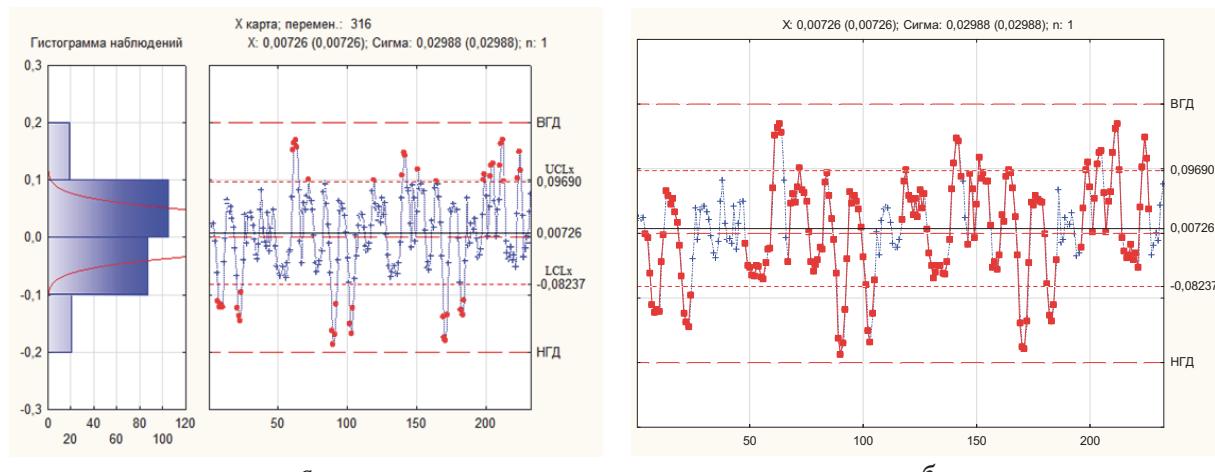


Рис. 6. Карта Шухарта индивидуальных значений X (а) и имеющихся трендов (б)

Анализируя данную карту, наблюдаем признаки присутствия специальных причин:

1) контрольные границы нарушены: 23 точки лежат ниже границы LCL_x и 23 точки лежат выше границы UCL_x . Процесс не стабилен по индивидуальным значениям X.

2) наблюдается тенденция изменения индивидуальных значений во времени: 9 точек по одну сторону от центра, 6 точек в возр./уменьш. ряду, 14 точек в «шахматном порядке», 2 из 3 точек в зоне А или в не ее, 4 из 5 точек в зоне В или в не ее, 15 точек в зоне С и 8 точек вне зоны С. Наблюдается постепенный тренд индивидуальных значений X в направлении верхнего и нижнего пределов допуска;

На рис. 7 представлено сопоставление значений отклонений на контрольной карте индивидуальных значений и графическом представлении результатов измерений на примере профиля пера одной лопатки. Красным цветом выделены характерные вылеты значений отклонений. Области 1, 2 и 3 соответствуют областям со стороны корыта в каждом сечении, а об-

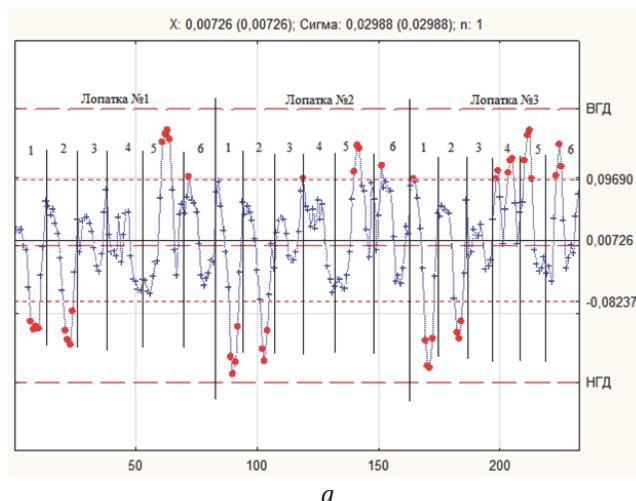
ласти 4, 5 и 6 соответствуют областям со стороны спинки в каждом сечении.

Контрольная карта индивидуальных значений демонстрирует не стабильный процесс. Состояние статистической управляемости в отношении индивидуальных значений X отсутствует.

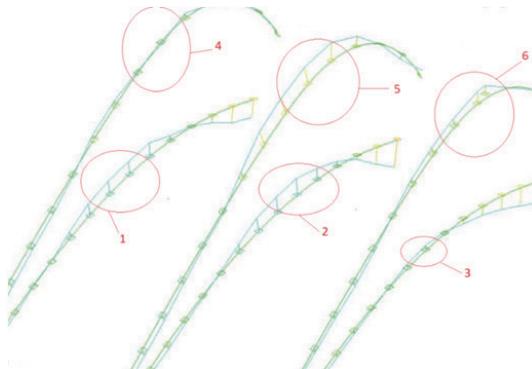
Проведем проверку условий обеспечения качества соответствия требованиям. На рис. 8 представлена схема расположения поля рассеяния результатов по отношению к цели.

На данном рисунке видно, что поле рассеяния результатов процесса $6s = 0,4398$ больше допуска $T = 0,4$. Верхняя и нижняя границы поля рассеяния результатов процесса выходят за границу НГД (Тн) и ВГД (Тв) соответственно. Данный процесс смещен относительно номинала в сторону верхней границы допуска Тв.

Проверка условий обеспечения качества соответствия требованиям указывает на то, что возможно наличие значений X, лежащих за границей допуска и как следствие возможен брак продукции. Поэтому следует сделать вывод, что качество соответствия требованиям не обеспечено.

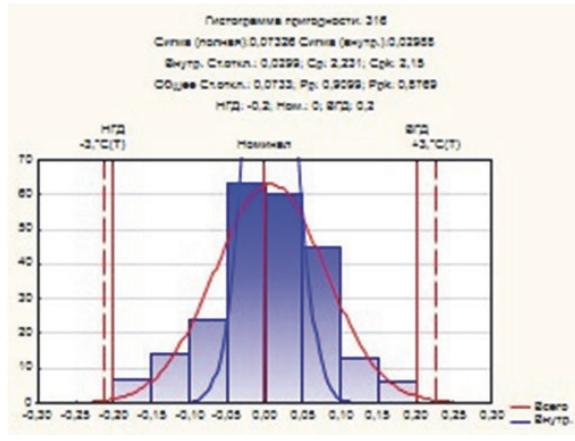


а

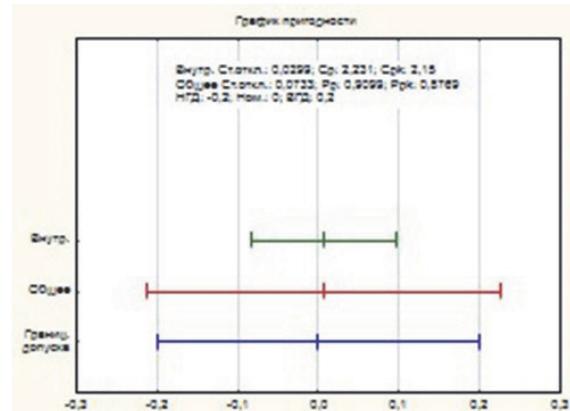


б

Рис. 7. Сопоставление значений отклонений профиля пера на карте Шухарта (а) и на профиле пера одной лопатки (б)



а



б

Рис. 8. Гистограмма (а) и график (б) пригодности процесса

Невыполнение условий обеспечения качества соответствия может быть значительным и незначительным. При значительном нарушении условий обеспечения качества соответствия в исходных данных будут зафиксированы выходы отдельных значений результатов процесса X за границы допуска T_H и/или T_B . По числу таких выходов можно приблизенно оценить брак продукции как относительную частоту появления соответствующих событий.

При незначительном нарушении условий обеспечения качества соответствия выходы отдельных значений результатов процесса X за границы допуска T_H и/или T_B могут отсутствовать. В этом случае с определенной долей риска можно считать, что качество соответствия обеспечено.

Для нашего примера значений X , лежащих за границей T_H и/или T_B , нет и, следовательно, брак отсутствует. Общий вывод может быть сформулирован так: качество соответствия для данного единичного процесса обеспечивается. Незначительное смещение поля рассеяния разбросов результатов процесса за границы верхнего и нижнего допуска не привело к появлению брака.

Проведем сравнительный анализ, на основе контрольных карт по индивидуальным значе-

ниям, результатов измерений трех секций сплового аппарата турбины (рис. 9).

Как показывает анализ рисунка 9, наиболее существенные отклонения профиля пера лопаток наблюдаются в характерных областях для всех трех лопаток каждой из секции. Такое распределение отклонений свидетельствует об относительной стабильности процесса синтеза при данных условиях выращивания.

3. ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного статистического анализа установлено:

1) процесс находится в состоянии статистической управляемости в отношении внутренней изменчивости (стабилен по размахам R);

2) процесс пригоден для обеспечения заданных требований и обладает достаточным запасом возможностей, необходимым для эффективного управления ходом процесса: индекс пригодности (индекс возможностей) $C_p = 2,23$;

3) процесс нестабилен по индивидуальным значениям; наблюдается тенденция изменения индивидуальных значений во времени по некоторым факторам. Наблюдается равномерный

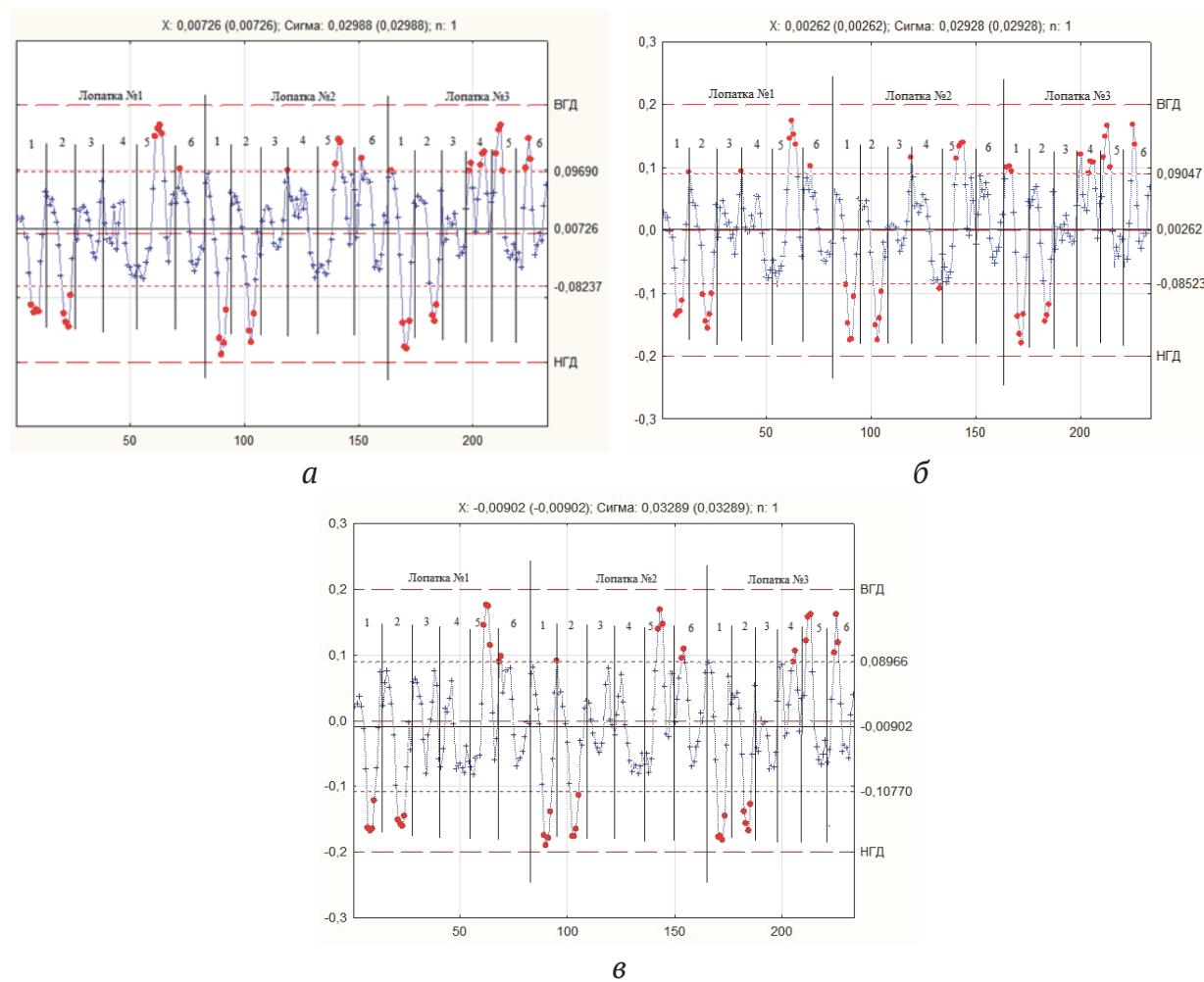


Рис. 9. Сравнительный анализ карт по индивидуальным значениям

тренд индивидуальных значений X в направлении верхнего и нижнего пределов допуска;

4) качество соответствия для данной выборки обеспечивается. Незначительное смещение поля рассеяния разбросов результатов процесса за границы верхнего и нижнего допуска не привело к появлению брака;

5) проверка условий обеспечения качества соответствия требованиям указывает на то, что возможно наличие значений X , лежащих за границей допуска и как следствие возможен брак продукции.

6) существенные отклонения профиля пера лопаток наблюдаются в характерных областях для всех трех лопаток каждой из секции, что свидетельствует об относительной стабильности процесса синтеза при данных условиях выращивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Franchitti, R. Borrelli, C. Pirozzi, L. Carrino, W. Polini, L. Sorrentino, A. Gazzero, Investigation on electron beam melting: dimensional accuracy and process repeatability, Vacuum 157 (2018) 340–348
2. M. Grasso, B.M. Colosimo, Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review, Meas. Sci. Technol. (2017)
3. Altaf Ahmed , Arfan Majeed, Zahid Atta and Guozhu Jia Dimensional Quality and Distortion Analysis of Thin-Walled Alloy Parts of AlSi10Mg Manufactured by Selective Laser Melting, J.Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 51
4. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 7870 - 2 – 2015 Статистические методы Контрольные карты Шухарта (ISO 7870-2:2013, ИОТ Ч2, Стандартинформ, Москва, 2016
5. A.V. Sotov, A.V. Agapovichev, V.G. Smelov, Yu.M. Anurov Investigation of the IN 738 superalloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guidevane by selective laser melting, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 107:2525–2535.
6. Солонин С.И. Метод контрольных карт, электронное текстовое издание. – Екатеринбург: УФУ, 2014.

THE STUDY OF THE ACCURACY AND STABILITY OF GTE NOZZLE GUIDE VANES ASSEMBLY UNITS MANUFACTURING BY THE METHOD OF SELECTIVE LASER MELTING USING QUALITY CONTROL CHARTS

© 2020 V.P. Alekseev, A.I. Khaimovich, V.G. Smelov, A.V. Agapovichev, V.V. Kokareva

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

This paper presents the results of a study of the accuracy and stability of GTE nozzle guide vanes assembly units manufacturing by the method of selective laser melting using quality control charts. The GTE nozzle guide vanes assembly units were made from material Inconel 738 by selective laser melting on an SLM 280HL equipment. The control of the geometric characteristics of the nozzle guide vanes assembly units that manufactured using additive technology was carried out on a coordinate measuring machine. We statistical analyzed the technological process using control charts for quantitative data and an assessment of the SLM process capabilities to meet the specified requirements. The geometry accuracy of guide nozzle blades airfoil was selected as a part quality parameter, which significantly affects the operational part characteristics. As a result of the conducted statistical analysis, it was found that the SLM process is in a state of statistical controllability with respect to internal variability, is suitable for meeting the given requirements and has a sufficient margin of capabilities necessary for effective process control. Checking the quality assurance terms for compliance with the requirements indicates that there may be geometrical parameters values that lie outside the tolerance limit and, as a result, the part may be defective.

Keywords: selective laser melting, heat resistant metal powder, material structure, accuracy, tolerance, quality, stability, technological process, quality control charts, GTE nozzle guide vanes assembly units.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-28-35

Vyacheslav Alekseev, Postgraduate Student.

E-mail: alekseev_v.p@mail.ru

Alexander Khaimovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engine Manufacturing Technologies. E-mail: berill_samara@bk.ru

Vitaly Smelov, Ph.D., Associate Professor, Executive Director of Institute of Engine and Power Plant Engineering.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Anton Agapovichev, Senior Lecturer of the Department of Engine Production Technology. E-mail: agapovichev5@mail.ru

Viktoria Kokareva, Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Engine Production Technology. E-mail: charming_carrot@mail.ru