

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 38-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 38-48.

Научная статья
УДК 621.7.015
doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления

Евгений Петрович Злобин¹, магистрант
Александр Исаакович Хаймович², д.т.н.
Евгений Станиславович Гончаров³, аспирант
Андрей Владимирович Балякин⁴, старший преподаватель
^{1, 2, 3, 4} Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия
¹ ep.smr@mail.ru, <https://orcid.org/000-0001-8419-7653>
² berill_samara@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9935-5703>
³ zekangon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2250-2613>
⁴ balaykinav@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1558-1034>

Аннотация. Представленные в данной статье результаты исследования посвящены изучению влияния режимов вибрационной обработки на поверхностный слой плоских образцов из титанового сплава ВТ-6, полученных при помощи технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). Титановые сплавы являются материалами, которые используются в различных областях промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность и легкость. Однако, при обработке таких материалов возникает ряд проблем, связанных с высокой твердостью и сложностью постобработки изделий после выращивания. Операции постобработки нуждаются в автоматизации для сокращения различных видов затрат. Вибрационная обработка является одним из возможных решений этой задачи. В рамках данного исследования были проведены измерения шероховатости образцов и вычислены величины съема материала в зависимости от параметров вибрационной обработки. Результаты показали, что черновое шлифование плоских поверхностей в виброгалтовочном оборудовании является эффективным методом для достижения требуемых параметров поверхности при обработке изделий из титановых сплавов, полученных методом СЛС. Это может привести к улучшению качества обработки, повышению продуктивности и снижению затрат на производство. Проведенный анализ результатов позволяет составить рекомендации для чернового шлифования поверхностей из титановых сплавов. Процесс необходимо проводить в два этапа: на первом – провести максимальный съем материала с поверхности, на втором – улучшить шероховатость. Таким образом, результаты исследования могут быть полезны для различных промышленных секторов, где используются титановые сплавы, и способствовать дальнейшему развитию технологий обработки изделий из труднообрабатываемых материалов, полученных с помощью технологии СЛС.

Ключевые слова: постобработка, вибрационная обработка, галтовка, поверхностный слой, шероховатость, селективное лазерное сплавление, аддитивные технологии

Благодарности: Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства индустриальных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021 г.).

Для цитирования: Злобин Е.П., Хаймович А.И., Гончаров Е.С., Балякин А.В. Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

The effect of vibration treatment technological parameters on the quality of products, manufactured by using selective laser fusion technology

Evgeny P. Zlobin¹, Master's student
Alexander I. Khaimovich², D. Eng.
Evgeny S. Goncharov³, PhD student
Andrey V. Balyakin⁴, Senior Lecturer

^{1, 2, 3, 4} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,
Samara, Russia

¹ ep.smr@mail.ru

² berill_samara@bk.ru

³ zekangon@gmail.com

⁴ balaykinav@ssau.ru

Abstract. The research results presented in this article are devoted to the study of the vibration treatment effect on the surface layer of flat samples made of titanium alloy VT-6 obtained using selective laser melting (SLM) technology. Titanium alloys are the materials, used in various fields of industry due to their unique properties, namely high strength and lightness. However, when treating such materials, there is a number of problems connected with the high hardness and complexity of post-processing products after their growing. Post-processing operations require automation for driving down various types of costs. Vibration treatment is one of the possible solutions to this problem. Within studies a sample roughness was measured and the material removal rate was calculated based on the vibration treatment criteria. The results showed that rough grinding of flat surfaces into vibrofinishing equipment is an effective method for achieving the required surface parameters when treating products made of titanium alloys obtained by the SLM method. This can result in improved finish, increased productivity and costs saving. The analysis of the results makes it possible to give recommendations for rough grinding of surfaces made of titanium alloys. The process must be carried out in two stages: 1) to have maximum material removal from the surface 2) to improve the roughness. Thus, the results of the study can be helpful for various industrial sectors where titanium alloys are used, also contributing to the further development of technologies for products treatment made from difficult-to-machine materials and obtained by using SLM technology.

Keywords: post-processing, vibration treatment, barrel finishing, surface layer, roughness, selective laser melting, additive technologies

Acknowledgements: The works were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the implementation of a comprehensive project to create a high-tech production on the topic: "Organization of high-tech production of industrial gas turbine engines with an intelligent system of design and technological preparation to improve functional characteristics" (Grant Agreement No. 075-11-2021-042 dated 06/24/2021)

For citation: Zlobin E.P., Khaimovich A.I., Goncharov E.S., Balyakin A.V. The effect of vibration treatment technological parameters on the quality of products, manufactured by using selective laser fusion technology / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

Введение

Аддитивные технологии являются перспективной и активно развивающимися технологиями, которые все чаще встречаются в производстве. На данный момент отрасль насчитывает более 15 видов технологий 3D-печати, по которым производятся детали из различных материалов [1]. Из плюсов данных технологий стоит выделить: сокращение рабочего процесса и значительное уменьшение производственных отходов, вариативность форм, получаемых изделий, изготовление деталей

высокой сложности, улучшенные механические свойства и др. [2]. Но также есть и минусы: высокая стоимость, ограниченность в материале, возникновение внутренних напряжений, ограниченность в размерах. Качество поверхности, полученное после изготовления, является еще одним недостатком аддитивных технологий. Зачастую таким методом нельзя получить уже готовую деталь, т. к. точность не всегда будет соответствовать конструкторским требованиям, поэтому существует потребность в постобработке таких изделий.

Постобработка – это процесс или последовательность операций, которые необходимо совершить с изделием после его изготовления с помощью аддитивных технологий для получения требуемых характеристик [3]. Постобработка может занимать до 70 % времени, затраченного на весь процесс аддитивного производства изделия. Объясняется это тем, что почти все этапы постобработки изделия производятся вручную, являются трудоемкими и длительными процессами.

Ручная постобработка имеет свои ограничения: низкая производительность, трудность в прогнозировании времени обработки, невозможность обработки сложных элементов изделия. Именно эти ограничения являются основной проблемой использования аддитивных технологий в среднесерийном и крупносерийном производстве.

В последнее время появляется все больше технологий и установок для замены ручной постобработки на автоматическую [4].

В данной статье речь пойдет об одном из методов улучшения шероховатости изделий после 3D-печати, а именно, галтовании, который может использоваться при изготовлении средней и крупной серии изделий [5]. Можно выделить четыре основных вида галтовочного оборудования: галтовочные барабаны; виброгалтовки; роторное галтовочное оборудование; «буксирные» галтовки.

Галтование активно применяется в машиностроении для осуществления безразмерной финишной обработки изделий. Благодаря этой технологии возможно удаление облоя, заусенцев, ржавчины, окалины, скругление острых кромок, улучшение качества поверхности и снижение шероховатости. В качестве рабочего инструмента при галтовании используют свободные абразивы, которые изготавливаются из разного рода материалов и имеют различную форму. На рис. 1 показаны основные виды галтовочных абразивов в зависимости от состава, формы, размеров и свойств.

Основные виды галтовочных тел

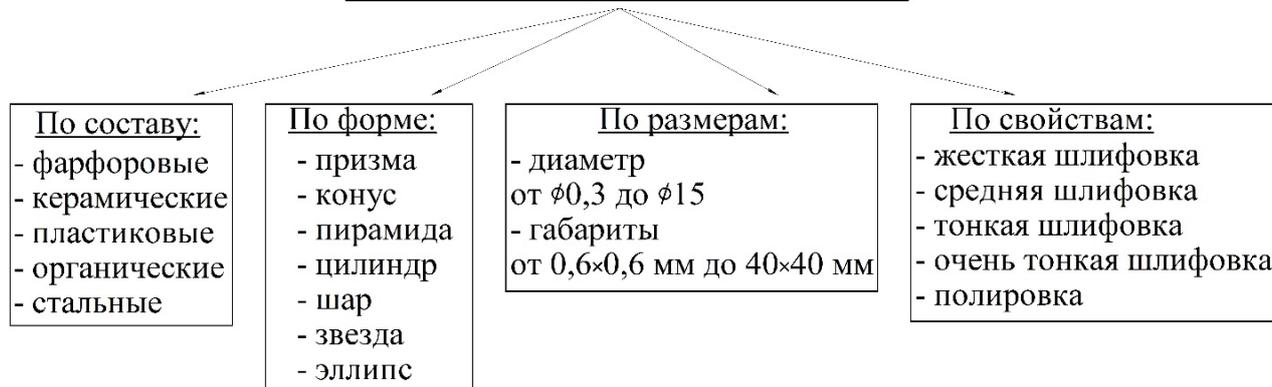


Рис. 1. Основные виды галтовочных тел

В качестве исследуемого оборудования в данной работе рассматривалась виброгалтовочная машина, как один из наиболее популярных типов галтовочного оборудования. При вибрационной обработке поверхность изделия подвергается многочисленным микроударам абразивного материала под действием вибраций, создаваемых рабочей камерой. Металл удаляется в результате механического или химико-механического диспергирования мельчайших частиц металла с обработанной поверхности абразивными телами [6].

Абразивная обработка сопровождается выделением тепла. Средняя температура в рабочей камере не более 40 °С. Динамическое

воздействие галтовочных тел возрастает с увеличением глубины погружения изделия и зависит от расстояния от изделия до стенок камеры, колебательных параметров, размеров и плотности тел. Поэтому в одной партии деталей, обрабатываемых вместе, съем металла может быть неравномерным, а характеристики поверхности могут различаться.

При вибрационной обработке поверхностный слой формируется за счет многочисленных микроударов абразива. Следовательно, качество и физико-механические свойства поверхностного слоя, такие как шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения и структура могут изменяться [7].

Целью данной работы является изучение и подбор рациональных режимов вибрационной обработки, а именно, частоты колебаний рабочей камеры, длительности обработки, интенсивности подачи вспомогательной жидкости и вида абразива для черновой шлифовки заготовок, полученных технологией селективного лазерного сплавления (СЛС) из титанового сплава ВТ6.

Описание эксперимента

Для проведения исследования использовалась галтовочная вибромашина AVALON WR60 mini, предназначенная для массовой (до 5...10 кг) шлифовки и полировки различных деталей (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид галтовочной вибромашины

Данная машина позволяет удалять заусенцы, затупить и округлить кромки, шлифовать, обезжировать, чистить, удалять накипь, ржавчину, нагар, матировать и полировать. Имеется возможность обработки: пластиковыми, керамическими, фарфоровыми наполнителями.

Объектом исследования стали плоские прямоугольные образцы размером $65 \times 8 \times 2$ мм в количестве восьми штук, изготовленные методом СЛС из сферичного титанового порошка ВТ6, часть из которых сплавлялась под углом 0° , а часть под углом 45° [8]. Образцы закреплялись в специальном приспособлении, в котором фиксировалась одна половина и не подвергалась воздействию галтовочных тел, для возможности проведения двух обработок на

одном образце (рис. 3). При таком закреплении процесс обработки крайней части образца не изменится по сравнению с обработкой без данного приспособления. Но в средней части появляется труднодоступное место для воздействия абразивных тел, что негативно сказывается на процесс шлифовки. Протяженности образца достаточно, чтобы измерить его шероховатость, не затрагивая недообработанную зону, поэтому закрепление в приспособлении окажет незначительное влияние на результат.



Рис. 3. Закрепленный образец в приспособлении

В качестве абразива были выбраны пластиковые галтовочные тела от компании Avalon, которые предназначены для грубой шлифовки изделий из цветных сплавов и стали. Исследования проводились с двумя видами тел: конус и пирамида размерами 10×10 мм (рис. 4).



Рис. 4. Галтовочные тела, выбранные для эксперимента

В качестве вспомогательной жидкости использовался компаунд V6 – химическая добавка с концентрацией ионов водорода pH 4,7, которая предназначена для удаления заусенцев, шлифовки и полировки сталей и цветных металлов. Рабочий раствор представляет собой смесь компаунда и воды в соотношении 2:100.

Для процесса галтования возможно изменение следующих параметров обработки: частота обработки (от 1050 до 1950 об/мин); интенсивность подачи вспомогательной

Аддитивные технологии и лазерная обработка Additive technologies and laser processing

жидкости (от 0 до 100 %); время обработки (от 2 до 8 ч). Исходя из этого, был составлен план эксперимента, отображенный в табл. 1,

который включал в себя 16 обработок на разных режимах с использованием двух видов абразива

1. План эксперимента

№ обработки	№ образца (угол вырачивания)	Вид абразива	Частота обработки, об/мин	Время обработки, ч	Интенсивность подачи компаунда, %
1	1 (0°)	конус	1050	2	0
2	2 (0°)	конус	1350	4	33
3	5 (45°)	конус	1650	6	66
4	6 (45°)	конус	1950	8	100
5	7 (45°)	пирамида	1050	4	66
6	8 (45°)	пирамида	1350	2	100
7	3 (0°)	пирамида	1650	8	0
8	4 (0°)	пирамида	1950	6	33
9	1' (0°)	33 % конус + 66% пирамида	1050	6	100
10	2' (0°)	33 % конус + 66% пирамида	1350	8	66
11	5' (45°)	33 % конус + 66% пирамида	1650	2	33
12	6' (45°)	33 % конус + 66% пирамида	1950	4	0
13	7' (45°)	66 % конус + 33 % пирамида	1050	8	33
14	8' (45°)	66 % конус + 3 % пирамида	1350	6	0
15	3' (0°)	66 % конус + 33 % пирамида	1650	4	100
16	4' (0°)	66 % конус + 33 % пирамида	1950	2	66

До и после обработки проводился замер контролируемых параметров каждого образца, а именно толщины и шероховатости поверхности в соответствии с ГОСТ 2789-73, ГОСТ Р ИСО 4287-2014 и ГОСТ 26877-2008. Для этого использовался кронциркуль Mitutoyo 209-406 и профилометр ИШП-210.

Результаты эксперимента

Данные, полученные в ходе проведения эксперимента, показаны в табл. 2. Проводилось шесть замеров толщины и шероховатости обработанной поверхности и вычислялось среднее значение, которые затем заносилось в табл. 2.

2. Результаты эксперимента

№ обработки	До			После		
	Ra продольная, мкм	Ra поперечная, мкм	Толщина S, мм	Ra продольная, мкм	Ra поперечная, мкм	Толщина S, мм
1	12,0	13,3	2,07	9,1	10,9	2,05
2	13,2	13,7	2,09	9,0	10,6	2,06
3	11,7	11,9	2,07	7,3	7,4	2,01
4	11,4	11,7	2,09	6,5	6,7	2,02
5	11,2	11,3	2,04	8,2	8,3	2,00
6	12,0	12,1	2,08	10,1	9,7	2,05
7	12,2	14,1	2,08	8,4	9,8	2,04
8	12,1	13,0	2,07	7,3	8,3	2,02
9	12,0	13,3	2,07	8,7	10,8	2,04
10	12,9	13,5	2,07	10,3	10,6	2,04
11	10,9	10,9	2,03	8,4	8,5	1,99
12	11,5	11,7	2,03	7,5	7,5	1,99
13	11,0	10,9	2,07	8,7	8,6	2,03
14	12,0	11,9	2,05	8,6	8,4	2,01
15	14,2	15,1	2,10	11,4	12,1	2,05
16	11,5	12,4	2,05	9,6	10,3	2,03

Для удобства анализа результатов, подсчитаем такие величины как изменение шероховатости ($\Delta Ra = Ra_{до} - Ra_{после}$), толщина

съем материала ($\Delta S = S_{до} - S_{после}$), съем материала в единицу времени ($Q = \frac{\Delta S}{t}$) и сведем их в табл. 3.

3. Обработанные результаты эксперимента

Номер обработки (тело/ частота обработки/время/ подача компаунда)	Изменение шероховатости ΔRa , мкм		Толщина съема материала, мм	Время, ч	Съем материала в единицу времени, мм/ч
	Продольная	Поперечная			
1 (конус/1050/2/0)	3,0	2,5	0,02	2	0,008
2 (конус/1350/4/33)	4,2	3,0	0,03	4	0,008
3 (конус/1650/6/66)	4,5	4,5	0,07	6	0,011
4 (конус/1950/8/100)	4,9	5,0	0,07	8	0,008
5 (пирамида/1050/4/66)	3,0	2,9	0,03	4	0,008
6 (пирамида/1350/2/100)	1,9	2,4	0,03	2	0,013
7 (пирамида/1650/8/0)	3,8	4,3	0,04	8	0,006
8 (пирамида/1950/6/33)	4,7	4,7	0,05	6	0,008
9 (конус 33 %-пирамида 66%/1050/6/100)	3,2	2,5	0,03	6	0,005
10 (конус 33 %-пирамида 66%/1350/8/66)	2,6	2,9	0,03	8	0,004
11 (конус 33 %-пирамида 66%/1650/2/33)	2,5	2,4	0,04	2	0,018
12 (конус 33 %-пирамида 66%/1950/4/0)	3,9	4,2	0,05	4	0,012
13 (конус 66 %-пирамида 33%/1050/8/33)	2,3	2,3	0,04	8	0,005
14 (конус 66 %-пирамида 33%/1350/6/0)	3,4	3,4	0,04	6	0,006
15 (конус 66 %-пирамида 33%/1650/4/100)	2,7	3,0	0,05	4	0,013
16 (конус 66 %-пирамида 33%/1950/2/66)	1,9	2,2	0,03	2	0,013

Наилучшие показатели были получены при обработке на следующих режимах: вид галтовочного тела – конус; частота обработки – 1950 об/мин; время – 8 ч; подача компаунда – 100 %, что видно из табл. 3. Но на данных режимах расход компаунда и электроэнергии будет максимальным, а обработка займет длительное время, поэтому необходимо провести анализ изменения каждого параметра, определить их влияние и понять, какие из них можно уменьшить для повышения экономичности обработки.

Анализ результатов

С помощью программы Statistica был проведен статистический анализ полученных результатов, определена зависимость

шероховатости и съема материала от изменяемых параметров. Для этого была выполнена оценка корреляционных зависимостей выходных данных, оценка степени влияния категориальных факторов, а также оценка взаимного влияния групп факторов на отклики в плоскости двух факторов.

Оценка корреляционных зависимостей выходных параметров

Коэффициент корреляции Пирсона r представляет собой меру линейной зависимости двух переменных. Предполагается, что две рассматриваемые переменные измерены, по крайней мере, в интервальной шкале, которая, в частности, используется в методе робастного планирования по Тагучи. Если r возвести его в

квадрат, то полученное значение коэффициента детерминации r^2 представляет долю вариации, общую для двух переменных. Чтобы оценить зависимость между переменными, нужно знать, как «величину» корреляции, так и ее значимость. Уровень значимости, вычисленный для каждой корреляции, представляет собой главный источник информации о надежности корреляции. Критерий значимости

основывается на предположении, что распределение остатков для зависимых переменных ΔRa и «Съем материала» является нормальным с постоянной (своей) дисперсией для всех значений каждого независимого фактора.

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона для данного исследования, показана в табл. 4.

4. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона

Параметр	ΔRa продольная	ΔRa поперечная	Съем материала в единицу времени
Вид абразива	-0,584418	-0,449720	0,076188
Обороты в мин	0,396015	0,603172	0,429657
Время экспозиции, час	0,458019	0,513072	-0,742701
Интенсивность подачи компаунда	-0,166151	-0,142489	0,151857
Угол выращивания	0,022870	0,135745	0,295524
ΔRa продольная	1,000000	0,900536	-0,263535
ΔRa поперечная	0,900536	1,000000	-0,161475
Съем материала в единицу времени	-0,263535	-0,161475	1,000000

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Между откликами « ΔRa продольная» и « ΔRa поперечная» существует устойчивая корреляционная связь ($r = 0,9$), т. е. эти параметры реагируют на изменчивость факторов статистически одинаково.

2. Влияние вида абразива является значимым для « ΔRa продольная» и существенным для « ΔRa поперечная» с $r = -0,58$ и $r = -0,45$ соответственно.

3. Наибольшее влияние на « ΔRa поперечная» оказывает фактор «Обороты» с $r = 0,6$ и «Время экспозиции» с $r = 0,51$. Следует отметить, что увеличение этих факторов приводит к уменьшению изменения шероховатости, что, скорее всего, связано с увеличенным временем обработки. Остальные факторы не оказывают существенное влияние на значение этого отклика.

4. Поскольку между « ΔRa поперечная» и « ΔRa продольная» существует устойчивая линейная зависимость, влияние вышеперечисленных факторов на « ΔRa продольная» сказывается аналогичным образом.

5. Фактор «Угол выращивания», исходя из корреляционного анализа, не является статистически значимым и его влияние на шероховатость минимально. Для подтверждения

этого вывода следует прибегнуть к непараметрическому тесту сравнения Манна-Уитни двух групп экспериментов (с углом построения – 0° и 45°).

6. Наибольшее влияние на отклик «Съем материала» оказывает фактор «Время экспозиции» с $r = -0,74$ и «Обороты» с $r = 0,43$. Собственно говоря, оба эти фактора отвечают за производительность и выработку процесса. Отрицательный знак корреляции между «Съем материала» и «Время экспозиции» говорит о том, что время обработки явно преувеличено и основной съем материала происходит в первые часы галтования.

7. Для дополнительного анализа совместного влияния наиболее значимых факторов на отклики следует воспользоваться факторным анализом в плоскости двух групповых факторов.

Оценка взаимного влияния групп факторов на отклики в плоскости двух факторов

Для оценки взаимного влияния факторов был использован факторный анализ в плоскости влияния двух главных групповых факторов с использованием метода Главных компонент и вращением факторной системы координат по методу Варимакс (рис. 5).

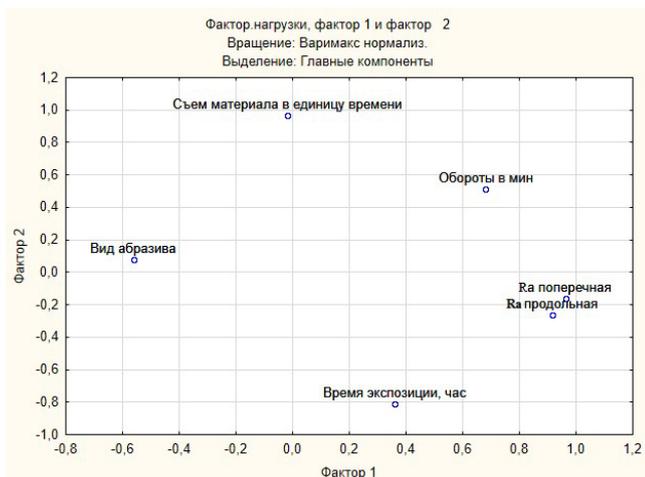


Рис. 5. Факторный анализ для двух группирующих факторов

Анализ факторного плана показывает, что «Съем материала» зависит только от факторов активных в группирующем факторе 2, т. е. зависит от совместного действия факторов «Время экспозиции» (в существенно большей степени) и «Обороты в минуту». Для откликов шероховатости « ΔRa поперечная» и « ΔRa продольная» главным группирующим фактором будет фактор 1, который выявляет влияние «Вид абразива» (в значительной степени), «Обороты в минуту» и в существенно меньшей степени – «Время экспозиции». Эти выводы хорошо согласуются с результатами корреляционного анализа.

Для анализа влияния главных факторов и определения оптимальных параметров были применены робастные планы Тагучи [9]. Процедура количественной оценки робастности заключается в

вычислении отношения С/Ш (сигнал-шум) и чувствительности при оценке робастности. Факторы шума – это те факторы, которые находятся вне контроля процесса. Итак, цель усилий по улучшению качества заключается в установке наилучших значений управляющих факторов, которые включены в производственный процесс для того, чтобы максимизировать отношение С/Ш. Вывод из предыдущего состоит в том, что цель усилий по совершенствованию качества может рассматриваться как попытка максимизировать отношение сигнал/шум (С/Ш) соответствующего продукта [10].

Для факторов «Изменение шероховатости ΔRa » и «Съем материала» было использована целевая функция «чем больше, тем лучше» (larger the better – LTB). Этот тип соответствует желательным характеристикам, чьи значения должны быть как можно больше.

$$C/Ш = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right). \quad (1)$$

Результаты анализа для отклика «Съем материала» материала приведены в табл. 5 (ожидаемое соотношение С/Ш при оптимальных условиях) и рис. 6, на котором представлена динамика изменения соотношения С/Ш в зависимости от вариации управляющих факторов. На рис. 7 представлены зависимости соотношения С/Ш для отклика « ΔRa поперечная» от вариации управляющих факторов, а в табл. 6 – ожидаемое соотношение С/Ш при оптимальных условиях для этого отклика.

5. Оптимальные значения факторов по Тагучи для отклика «Съем материала»

Фактор	Ожидаемое отношение С/Ш для отклика «Съем материала» при оптимальных условиях (Среднее значение -41,406; Сигма 3,62354)		
	Уровень	Эффект Размер	Планируемая Ошибка
{1} Вид абразива	Конус	0,2802	1,21
{2} Обороты в минутах	1650	2,2708	1,21
{3} Время экспозиции, ч	2	3,4351	1,21
{4} Интенсивность подачи компаунда	100	0,8712	1,21
Ожидаемое С/Ш		-34,5482	

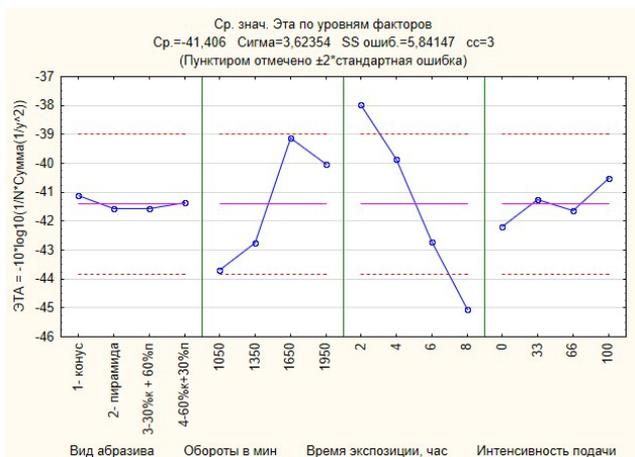


Рис. 6. Зависимость изменения соотношения С/Ш для отклика «Съем материала» от вариации управляющих факторов

Дисперсионный анализ уровней ЭТА (анализ дерева событий) (см. табл. 6) показывает, что наибольшее влияние на отклик «Съем материала» оказывают факторы «Время экспозиции» и «Обороты в минуту». Этот вывод хорошо согласуется с результатами факторного и корреляционного анализов. Фактор «Время экспозиции» оказывает доминирующее влияние на отклик «Съем материала» с относительно высоким уровнем достоверности по отношению к остальным факторам. Интенсивность подачи компаунда фактически не влияет на результат. Наибольший съем материала обеспечивается при 1650 об./мин в течение двух часов при незначительном влиянии остальных факторов (рис. 7).

б. Оптимальные значения факторов по Тагути для отклика «Изменение шероховатости ΔRa»

Фактор	Ожидаемое отношение С/Ш для отклика ΔRa при оптимальных условиях (Среднее значение 4,78840; Сигма 2,50569)		
	Уровень фактора	Эффект Размер	Планируемая Ошибка
{1} Вид абразива	Конус	1,70185	0,422584
{2} Обороты в минутах	1950	1,48269	0,422584
{3} Время экспозиции, час	6	1,63111	0,422584
{4} Интенсивность подачи компаунда	0	1,00542	0,422584
Ожидаемое С/Ш		10,60948	

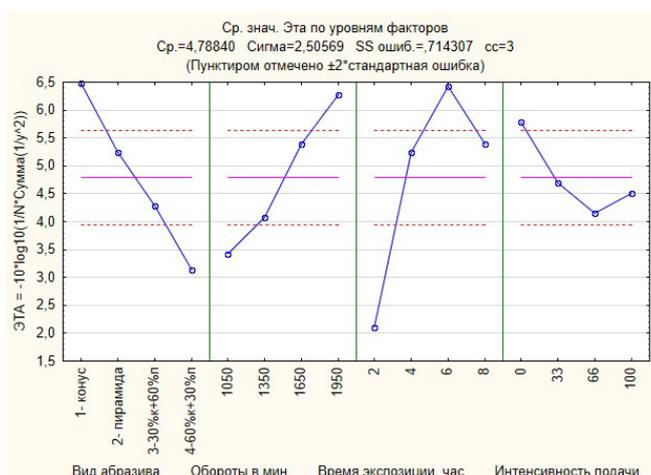


Рис. 7. Зависимость изменения соотношения С/Ш для отклика «Изменение шероховатости ΔRa» от вариации управляющих факторов

оказывают факторы «Время экспозиции» и «Вид абразива». Фактор «Обороты в минуту» менее значим. Интенсивность подачи компаунда фактически не влияет на результат. Кроме того, степень достоверности оценки влияния этого фактора крайне низкая – вероятность ошибки составляет более 21 %

Наилучший результат по уменьшению шероховатости материала обеспечивается при 1950 об./мин в течение шести часов с применением абразивного наполнителя типа «конус» при незначимом влиянии фактора «Интенсивность подачи компаунда» (см. табл. 6 и рис. 7). После шести часов обработки шероховатость резко ухудшается. По-видимому, этот процесс связан с началом абразивной эрозии обрабатываемой поверхности.

Основываясь на проведенном анализе, учитывая оптимальные значения факторов и

Дисперсионный анализ уровней ЭТА (см. табл. 6) показывает, что наибольшее влияние на отклик «Изменение шероховатости ΔRa»

размерный эффект каждого из них, можно подобрать параметры для наиболее экономичного и эффективного черного шлифования

плоских поверхностей, которые показаны в табл. 7.

7. Рекомендуемые технологические режимы виброгалтовки

Фактор	Уровень	Эффект фактора
1 этап		
{1} Вид абразива	Конус	существенный
{2} Обороты в минутах	1650	существенный
{3} Время экспозиции, ч	2	существенный
{4} Интенсивность подачи компаунда	100	несущественный
2 этап		
{1} Вид абразива	Конус	существенный
{2} Обороты в минутах	1950	существенный
{3} Время экспозиции, ч	3...4	существенный
{4} Интенсивность подачи компаунда	0...20	несущественный

Выводы по результатам исследования

После подробного анализа результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Вибрационное галтование является эффективным методом черного шлифования для улучшения качества поверхностного слоя изделий, полученных технологией СЛС.

2. Во время обработки происходит равнозначное изменение продольной и поперечной шероховатости.

3. Наибольшее влияние на изменение шероховатости и съем материала оказывают два фактора: частота и время обработки.

4. Влияние угла выращивания изделий на обработку поверхности минимально и в последующих экспериментах данным фактором можно пренебречь.

5. Наиболее интенсивный съем материала происходит в первые два часа обработки.

6. Подача компаунда во время обработки оказывает положительное влияние на её эффективность, но процентная величина подачи не показала значимого эффекта.

7. Черновую обработку плоских поверхностей рекомендовано проводить в два этапа на следующих режимах:

1 этап: вид абразива – конус; частота обработки – 1650 об./мин; время экспозиции – 2 ч; интенсивность подачи компаунда – 100 %;

2 этап: вид абразива – конус; частота обработки – 1950 об./мин; время экспозиции – 4 ч; интенсивность подачи компаунда – 20 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения (Переиздание). Введ. 2017-12-01. М.: Стандартинформ, 2020.

2. **Чемодуров А. Н.** Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 210–217. EDN WLXVCZ.

3. **W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, M. Revilla-León.** 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review // Journal of Dentistry. 2021. Vol. 107. – P. 103630. DOI 10.1016/j.jdent.2021.103630. EDN ISRCTC.

4. **Бабичев А.П., Зеленцов Л.К., Самодумский Ю.М.** Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1981. 160 с.

5. **Ющенко А. В., Флек М. Б.** Исследование процесса съёма металла при абразивной галтовке // Вестник Донского государственного технического университета. 2013. Т. 13, № 3-4(72-73). С. 125–133. EDN RFUKBL.

6. **Tarasovskii V. P.** Surface Machining of Corundum-Ceramic Components by Free Abrasive // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. No 9. P. 793–796. DOI 10.3103/S1068798X20090191. EDN NGRCFV.

7. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д, 1999. 621 с.

8. **Назарова Т. И.** Микроструктура и механические свойства на растяжение сплава ВТ6, полученного методом селективного лазерного плавления / Т. И. Назарова, В. М. Имаев, Р. М. Имаев, С. П. Павлинич // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 6. С. 25–29. EDN UBXJDD.

9. **Paо С.** Методы Тагути: эволюция, концепция и межотраслевое применение / С. Рао, П. Самант, А.

Кадампатта, Р. Шеной // Методы менеджмента качества. 2016. № 6. С. 50–57. EDN VZYDFL.

10. Ramón V. León, Anne C. Shoemaker & Raghu N. Kacker (1987) Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios, *Technometrics*, 29:3, 253–265, DOI: 10.1080/00401706.1987.10488231

REFERENCES

1. State Standard R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions (Reissue). Introduction. 2017-12-01. Moscow: Standartinform, 2020.

2. Chemodurov A. N. Application of additive technologies in the production of mechanical engineering products // *Proceedings of the Tula State University. Technical sciences*. 2016, no. 8-2. pp. 210–217. EDN WLXVCZ.

3. W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, M. Revilla-León. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review // *Journal of Dentistry*. 2021. Vol. 107. P. 103630. DOI 10.1016/j.jdent.2021.103630. EDN ISRCTC.

4. Babichev A.P., Zelentsov L.K., Samodumsky Yu.M. Design and operation of vibrating

machines for parts treatment. Rostov: Publishing House of the Rostov University, 1981, 160 p.

5. Yushchenko A.V., Fleck M. B. Investigation of the process of metal removal with abrasive barrelling // *Bulletin of the Don State Technical University*, 2013, vol. 13, no. 3-4(72-73), pp. 125–133. EDN RFUKBL.

6. Tarasovskii V. P. Surface Machining of Corundum-Ceramic Components by Free Abrasive // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40. No 9. P. 793–796. DOI 10.3103/S1068798X20090191. EDN NGRCFV.

7. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology. Rostov-na-Donu, 1999, 621 p.

8. Nazarova T. I. Microstructure and mechanical tensile properties of VT6 alloy obtained by selective laser melting / T. I. Nazarova, V. M. Imaev, R. M. Imaev, S. P. Pavlinich // *Izvestiya vuzov. Physics*. 2015, vol. 58, no. 6, pp. 25–29. EDN UBXJDD.

9. Rao S. Taguchi methods: evolution, concept and intersectoral application / S. Rao, P. Samand, A. Kadampatta, R. Shennoy. *Methods of quality management*, 2016, no. 6, pp. 50–57. EDN VZYDFL.

10. Ramón V. León, Anne C. Shoemaker & Raghu N. Kacker (1987) Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios, *Technometrics*, 29:3, 253–265, DOI: 10.1080/00401706.1987.10488231

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 11.04.2023

The article was submitted 17.03.2023; approved after reviewing 24.03.2023; assepted for publication 11.04.2023

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.06.2023. Выход в свет 30.06.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16