

Е. П. Злобин, А. И. Хаймович, Е. С. Гончаров, А. В. Балякин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ
ОТВЕРСТИЙ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ***

**Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева**

E-mail: ep.smr@mail.ru

В статье рассмотрена возможность использования вибрационной обработки глухих отверстий в изделиях, полученных методом СЛС. Результаты экспериментов показали, что наиболее эффективная обработка происходит при диаметре отверстия, превышающем размер абразивного тела на 1–2 мм, но не более чем в 2 раза. Также было отмечено, что скругление кромки отверстия размером, не превышающим номинальное значение абразива, происходит быстрее, чем у отверстия с большим размером. Максимальное время грубой обработки изделий из нержавеющей стали – 4 часа, при этом наиболее эффективная обработка происходит в первые 2–3 часа. На основании результатов даны рекомендации по обработке напечатанных изделий с глухими отверстиями.

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

E. P. Zlobin, A. I. Khaimovich, E. S. Goncharov, A. V. Balyakin

**INVESTIGATION OF VIBRATION TREATMENT OF HOLES
OF VARIOUS DIAMETERS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING**

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev

The article considers the possibility of using vibration treatment of blind holes in products obtained by the SLS method. The experimental results showed that the most effective treatment occurs when the hole diameter exceeds the size of the abrasive body by 1-2 mm, but does not exceed it by 2 times. It was also noted that the rounding of the edge of the hole with a size not exceeding the nominal value of the abrasive occurs faster than that of a hole with a larger size. The time of rough processing of stainless steel products should not exceed 4 hours, while the most effective processing occurs in the first 2-3 hours. The results obtained allow us to give recommendations on the processing of printed products with blind holes made by the SLS method.

Keywords: post-processing, vibration treatment, tumbling, surface layer, roughness, selective laser sintering, additive technologies.

© Злобин Е. П., Хаймович А. И., Гончаров Е. С., Балякин А. В., 2023.

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

Введение

Одной из главных задач современного машиностроения является повышение производительности труда и качества изделий. Данную задачу можно решить с помощью применения усовершенствованных методов слесарной обработки деталей, основанных на автоматизации процесса [1]. Особенно актуально найти решение для оптимизации современных технологий изготовления, в частности для селективного лазерного сплавления. В настоящее время детали, полученные по технологии СЛС, как правило, имеют достаточно большую шероховатость поверхности (до $Ra=15$ мкм), что зачастую не удовлетворяет конструкторским требованиям, предъявляемым к ним [2].

Одним из эффективных способов улучшения качества поверхностного слоя является вибрационная обработка, которая была рассмотрена в данном исследовании на примере обработки отверстий [3].

Целью работы было изучение возможности вибрационной обработки отверстий различных диаметров образца из нержавеющей стали, изготовленного методом СЛС, а также процесса скругления кромок отверстий и контроль их шероховатостей.

Описание эксперимента

Объектом исследования стал образец, изготовленный на установке селективного лазерного сплавления 3DLAM Mid, с шестью глухими отверстиями диаметрами 8 мм, 10 мм, 11 мм, 12 мм, 14 мм и 20 мм (рис. 1). Перед началом эксперимента он был рассечен на две половины путем электроэрозионной резки для того, чтобы на разных временных промежутках обработки

была возможность контролировать шероховатость отверстий и скругление их острых кромок. Перед обработкой две половины образца соединялись с помощью болтов и гаек.



Рис. 1. Изготовленный образец с отверстиями различного диаметра

Образец изготовлен из сферического порошка ПР-07Х18Н12М2 (нержавеющая сталь, аналог 316L). Порошок имеет высокую чистоту и среднюю фракцию, которая идеально подходит для производства деталей с толстыми стенками и гладкими поверхностями [4].

На образце присутствуют различные виды дефектов после печати: поры, переплавы, несплавления, прилипшие металлические порошинки (рис. 2). Большинство из них можно избежать путем подбора оптимальных режимов сплавления, проведения морфологического анализа порошка, проведения его входного контроля и правильного разбиения геометрии детали. Но даже при этом будет присутствовать волнистость поверхности и грубая шероховатость, которая не всегда соответствует требуемой [5]. В данном образце нас интересует лишь профили отверстий, качество печати которых близко к оптимальному, за исключением налипаний в виде порошинок.



Рис. 2. Дефекты изготовленного образца

В силу особенности технологии при печати острых граней методом селективного лазерного сплавления появляется небольшой радиус

скругления острых кромок. На данном образце радиус грани отверстий после печати приблизительно равен $R0,1$ мм. Измерения скруглений

производились на микроскопе AmScope ME 1400TC-INF, а затем обрабатывались в программе КОМПАС-3D путем наложения линейки на увеличенное изображение кромки и его дальнейшее образмеривание.

Далее с помощью профилометра ИШП-210 была определена шероховатость отверстий после печати. Результаты измерений занесены в таблицу.

Измеряемая величина	Диаметр отверстия, мм					
	Ø8	Ø10	Ø11	Ø12	Ø14	Ø20
Ra отв., мкм	14,3	13,5	13,3	12,9	10	9,6

Для проведения данного исследования использовалась галтовочная вибромашина AVALON WR60 mini, предназначенная для шлифовки и полировки различных деталей. Используя рекомендации, полученные для плоских образцов, был составлен новый план, в котором на тех же режимах производилась обработка образца и по прошествии каждого получаса осуществлялся контроль шероховатости его отверстий. При этом каждый час обработки контролировались скругления кромок.

Обработка производилась на следующих режимах:

1-й этап – вид абразива – конус 10×10 мм для черновой обработки, частота обработки – 1650 об/мин, время экспозиции – 4 обработки по 30 мин, интенсивность подачи СОЖ – 100 %;

2-й этап – вид абразива – конус 10×10 мм для черновой обработки, частота обработки –

1950 об/мин, время экспозиции – 8 обработок по 30 минут, интенсивность подачи СОЖ – 20 %.

Данные режимы были получены на основании результатов обработки образцов из титанового сплава, но, вероятнее всего, они актуальны и для нержавеющей стали, за исключением времени обработки, которого понадобится меньше для достижения максимального результата.

Результаты эксперимента

После первых 30 минут было замечено, что в полости отверстий Ø10 и Ø20 застревают абразивные тела, за счет чего эффективность процесса снижается. Представим результаты измерений в виде графиков, чтобы наглядно показать изменение контролируемых параметров во время обработки (рис. 3, 4).

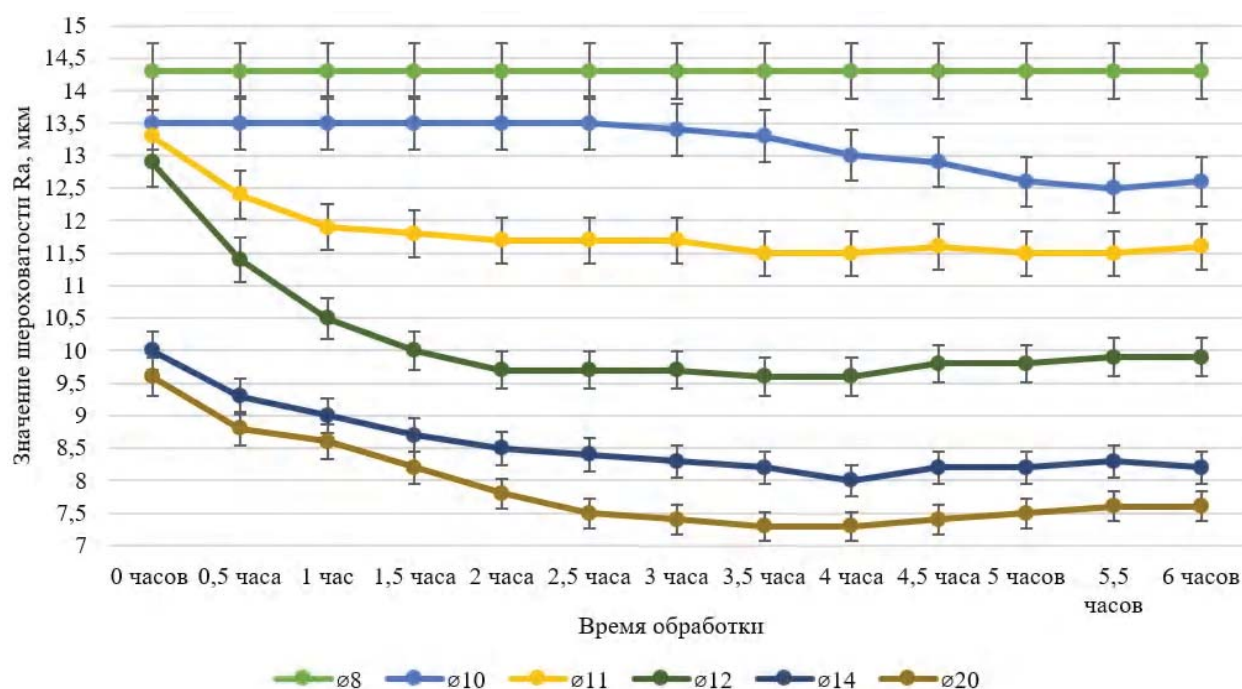


Рис. 3. График изменения шероховатости отверстий

Как видно из результатов, улучшение шероховатости глухих отверстий происходит не так эффективно, как на плоских образцах. Но все же динамика снижения некоторых отверстий значительно выше по сравнению с другими. Так, например, Ø11 и Ø12 обрабатывается лучше остальных. Связано это с тем, что одно абразивное тело размером 10×10 мм может без застреваний проникать в отверстия близкого, но не номинального диаметра и при этом интенсивно взаимодействовать со стенками, улучшая их шероховатость.

Отверстия Ø14 и Ø20 обрабатываются менее эффективно, что объясняется меньшей контактной поверхностью при обработке. Также в отверстия Ø20 может помещаться два абразива, что приводит к их застреванию и затруднению процесса галтования, а после окончания обработки появляется необходимость извлечения этих тел, что является дополнительной и трудоемкой операцией.

Процесс обработки отверстия Ø10, размер

которого совпадает с размером абразивных тел, первые 3 часа не имел никакого эффекта и его шероховатость оставалась неизменной. По прошествии этого времени за счет взаимного трения галтовочные тела потеряли свое номинальное значение и начали проникать в данное отверстие, как следствие, началось изменение шероховатости, что видно на графике. Но все же этот процесс нельзя назвать эффективным, и при подборе тел это стоит учитывать.

Как и ожидалось, отверстие Ø8 не обрабатывалось и в данном исследовании имело место лишь для контроля скругления острой кромки.

График показывает, что эффективность обработки со временем снижается, а после 4 часов и вовсе начинает демонстрировать отрицательную динамику. Для достижения максимально возможного результата первичной обработки изделия из нержавеющей стали понадобится меньше времени, чем для титана, что подтвердилось полученными результатами.

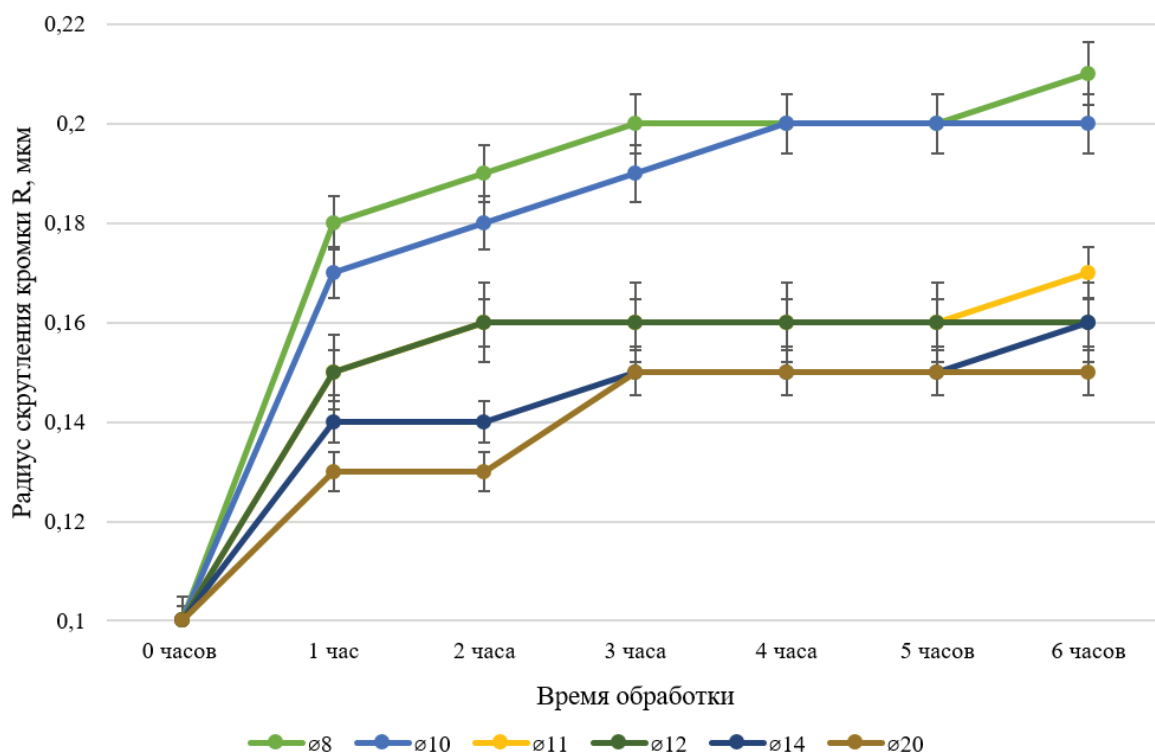


Рис. 4. График скругления кромок отверстий

После анализа графика скругления можно сделать вывод о том, что отверстия меньшего диаметра, имеющие низкую пропускную способность или ее отсутствие, скругляются заметно быстрее других. Острая кромка отверстий Ø8 и Ø10 достигла скругления R0,21 мм

и R0,2 мм соответственно, в то время как значения остальных не превышало R0,17 мм. Так же, как и в предыдущем графике, наибольшая эффективность процесса скругления наблюдается в первые часы обработки, что говорит о необходимости сокращения длительности процесса.

Выводы по результатам эксперимента

На основании проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы и дать определенные рекомендации:

1. При наличии грубых дефектов после печати рекомендуется провести пескоструйную или гидроабразивную обработку, так как с помощью вибрационной их устранить не удастся.

2. Для эффективной обработки глухих отверстий их диаметр должен превышать размер абразивного тела на 1–2 мм, но не более чем в 2 раза, так как в таком случае тела могут застрять в обрабатываемой полости.

3. Скругление кромки отверстия размером, не превышающего номинальное значение абразивного тела, происходит быстрее, чем у отверстия с большим размером. При этом чем больше эта разница, тем меньше интенсивность скругления его грани.

4. Время грубой обработки изделий, изготовленных из порошка ПР-07Х18Н12М2, не должно превышать 4 часа, так как по прошествии этого времени появляется отрицательная динамика изменения шероховатости. Наиболее эффективная обработка происходит в первые 2–3 часа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тамаркин, М. А.* Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия / М. А. Тамаркин, Е. В. Смоленцев, Е. Н. Колганова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15, № 1. – С. 122–129.

2. *Сухов, Д. И.* Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства / Д. И. Сухов, С. В. Неруш, С. В. Беляков, П. Б. Мазалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 9(690). – С. 73–84.

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

4. *Киришина, А. А.* Сравнительная оценка эксплуатационных характеристик (окисление, коррозия) порошковых и литейных сплавов / А. А. Киришина, А. Ю. Кишин, М. Л. Князьков, А. З. Bagerman // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 2 (384). – С. 81–86.

5. *Воробьев, Е. С.* Проблема чистоты поверхностей агрегатов, созданных методом селективного лазерного плавления / Е. С. Воробьев, П. Д. Рекадзе, В. М. Решетов // Международная молодежная научная конференция «ХV королевские чтения», посвященная 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова : тез. докл., Самара, 08–10 октября 2019 года. Том 1. – Самара : АНО «Издательство СНЦ», 2019. – С. 339–340.