

УДК 621.7

Исследование процесса лазерной полировки изделий, полученных с помощью аддитивных технологий

Гебеш Алина Владиславовна

gebesh@bmstu.ru

SPIN-код: 9836-6117

Мельников Дмитрий Михайлович

melnikovd@bmstu.ru

SPIN-код: 7046-5680

Фунтиков Владислав Анатольевич

vladislav.funt@bmstu.ru

SPIN-код: 7744-1459

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследована эффективность лазерной полировки для снижения шероховатости поверхности образцов из нержавеющей стали 316L, полученных методом селективного лазерного плавления. Экспериментально изучено влияние количества проходов лазера и мощности излучения на параметры шероховатости Ra и Rz. Установлено, что оптимальным является четырехкратный проход, позволяющий достичь улучшения качества поверхности до 94 %. Наилучшие результаты получены при совпадении направления сканирования лазера с направлением выращивания валиков. Показано, что лазерная полировка является эффективным методом финишной обработки аддитивных деталей со сложной геометрией.

Ключевые слова: лазер, аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, лазерная полировка

Study of the process of laser polishing of products obtained using additive technologies

Gebesh Alina Vladislavovna

gebesh@bmstu.ru

SPIN-code: 9836-6117

Melnikov DmitryMihailovich

melnikovd@bmstu.ru

SPIN-code: 7046-5680

Funtikov Vladislav Anatolievich

vladislav.funt@bmstu.ru

SPIN-code: 7744-1459

BMSTU, Moscow, Russian

Abstract. The paper studies the efficiency of laser polishing for reducing the surface roughness of 316L stainless steel samples obtained by selective laser melting. The effect of the number of laser passes and the radiation power on the roughness parameters Ra and Rz is experimentally studied. It is established that a four-pass is optimal, allowing for an improvement in surface quality of up to 94 %. The best results are obtained when the laser scanning direction coincides with the direction of bead growth. It is shown that laser polishing is an effective method for finishing additive parts with complex geometry.

Keywords: laser, additive technologies, selective laser melting, laser polishing

Введение. Аддитивные технологии в настоящее время — это одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Она позволяет на порядок ускорить НИОКР, уменьшить стоимость производства, возможность избегать сварных конструкций, что влечет повышение надежности детали [1, 2].

Аддитивные технологии получают все большее распространение в таких сферах как: строительство, машиностроение, авиастроение, судостроение, космонавтика, ракетостроение и др. Однако современные лазерные аддитивные технологии, такие как селективная лазерная наплавки и коаксиальной лазерной наплавки имеют ряд существенных недостатков. И один из них — это большая шероховатость получаемых изделий [2]. И для использования изготавливаемых изделий в отраслях, где внешние показатели крайне важны, необходимо добиваться высокого качества поверхности с помощью полировки.

Существует ряд технологий полировки, но применительно к деталям, получаемым аддитивными технологиями [3], актуальной является лазерная полировка благодаря широким возможностям по обработке сложной криволинейной геометрии [4].

Технология процесса лазерной полировки основана на переплаве тонкого поверхностного слоя с помощью лазерного излучения. Благодаря эффекту поверхностного натяжения ванны расплавленного материала, происходит затвердевания слоя уже без трещин, пор и скрытых дефектов. Тем самым происходит полировка поверхности.

Достоинства процесса лазерной полировки [2, 5]:

- высокий уровень автоматизации процесса;
- практически отсутствуют расходные материала при проведении обработки;
- при обработке можно контролировать толщину обрабатываемого материала;
- не изменяется форма детали при обработке;
- возможность обрабатывать деталь любого размера и в любом расположении.

Недостатки данного вида обработки:

- достаточно низкая производительность, по сравнению с химической или электрохимической полировкой;
- необходимость защиты ванны расплава защитными газами;
- при плохо подобранных параметрах обработки, возможно появление волнистости на поверхностном слое обрабатываемой детали.

Цель данной работы — исследование процесса лазерной полировки для улучшения шероховатости деталей, получаемых аддитивными технологиями.

При проведении лазерной полировки главными параметрами, что оказывают влияние на проведения процесса, являются мощность лазерного излучения и время обработки. От времени обработки в прямой зависимости будет скорость движения головы. В данной работе в дальнейшем именно скорость основным влияющим фактором. Два эти показателя очень зависят друг от

друга. Невозможно уменьшить один из них, не увеличивая другой. При лазерной полировке необходимо сообщить определенное количество энергии, чтобы расплавить верхний слой.

Материалы и методы. Исследованию подвергались плоские образцы из нержавеющей стали марки 316L, полученные методом селективного лазерного плавления (СЛП). Процесс выращивания проводился на установке в атмосфере аргона. Для формирования каждого слоя использовалось однонаправленное стратегия сканирования, что привело к образованию выраженной слоистой структуры с регулярными валиками расплавленного материала.

Эксперименты по лазерной полировке проводились на технологическом комплексе на основе волоконного лазера IPG с максимальной выходной мощностью 3,5 кВт и длиной волны 1070 нм. Для управления геометрией и движением пятна использовалась лазерная головка Scansonic, оснащенная коллиматором и фокусирующей линзой. Лазерная головка была установлена на 6-осевом роботе-манипуляторе.

Полировка выполнялась в режиме плавления без проникновения в защитной атмосфере аргона, подаваемой через сопло лазерной головы для предотвращения окисления поверхности. Перед проведением основных экспериментов был выполнен ряд тестовых проходов для подбора оптимальных параметров, включающих мощность лазера, скорость сканирования, диаметр пятна и шаг между проходами.

Количественная оценка эффективности лазерной полировки проводилась путем измерения параметров шероховатости поверхности до и после обработки. Измерения выполнялись на контактном профилометре Taylor Hobson Surtronic S-100.

Для получения репрезентативных данных измерения проводились в двух перпендикулярных направлениях относительно направления сканирования при лазерной полировке (которое совпадало с направлением валиков от СЛП). Серия образцов 1: вдоль валиков (параллельно направлению сканирования лазера при полировке). Серия образцов 2: поперёк валиков (перпендикулярно направлению сканирования).

Для каждого состояния поверхности и направления измерений проводилась серия из не менее пяти замеров в различных зонах образца. В качестве основных оценочных параметров были выбраны:

Среднее арифметическое отклонение профиля (R_a). Интегральный параметр, характеризующий среднюю высоту неровностей.

Высота неровностей по десяти точкам (R_z). Параметр, более чувствительный к отдельным пикам и впадинам на поверхности.

Результаты представлены в виде среднего арифметического значения для каждой серии измерений и стандартного отклонения.

Экспериментальная часть. При проведении лазерной полировки переплавлением, одним из параметров являлась толщина обрабатываемого слоя. Данная величина не может быть меньше максимальной шероховатости, то есть все впадины должны быть меньше, чем толщина. Однако, неизвестно

насколько толщина должна быть больше, чем шероховатость. От того, сколько материала будет расплавлено будет зависеть ход застывания толщины ванны расплава. И для того, чтобы определить, в каком случае шероховатость будет лучше необходимо провести опытную часть.

При проведении механической полировки традиционно используют поэтапную обработку. За каждый этап снижается шероховатость на некоторое число. В других методах полировки поэтапный метод не используют. Есть предположение, что с постепенным уменьшением первоначальной шероховатости, можно добиться лучших показателей. Для подтверждения или опровержения данной идеи были проведено несколько опытов. Опыты были проведены для двух типов образцов, в зависимости от направления выращивания. Скорость полировки была принята 300 мм/с. Характеристики данных методов представлены в таблице.

Результаты измерения шероховатости обработанных образцов

№	Количество проходов	Продольное сечение			Поперечное сечение			По диагонали		
		R_{a0} , мкм	R_a , мкм	% улуч.	R_{a0} , мкм	R_a , мкм	% улуч.	R_{a0} , мкм	R_a , мкм	% улуч.
Серия образцов 1										
1	1	9,90	5,70	42	9,00	5,40	40	8,10	4,60	43
2	2	6,70	1,40	79	7,40	2,90	61	7,90	2,00	75
3	4	7,00	0,60	91	6,60	1,80	73	7,80	0,50	94
4	6	6,30	1,20	81	8,20	2,80	66	8,40	2,30	73
Серия образцов 2										
5	1	7,60	5,20	32	9,00	7,20	20	8,50	6,60	22
6	2	6,70	2,00	70	7,40	3,00	59	7,90	1,60	80
7	4	7,00	1,70	76	6,60	2,20	67	7,80	1,90	76
8	6	6,30	1,50	76	8,20	4,20	49	8,40	3,70	56

По табличным значениям видно, что есть единая тенденция улучшения качества поверхности при прохождении поверхности в несколько раз. Данная тенденция сохраняется до 4 проходов включительно. При 6 проходах, процент улучшения поверхности меньше, чем при 4 проходах.

При рассмотрении данных опытов также возможно оценить, как влияет изначальное направление выращивания на итоговую топографию. Поскольку начальная шероховатость у образцов почти одинаковая, представляется возможным сравнивать также процентное улучшение поверхности. Зависимость изменения шероховатости поверхности в зависимости от количества проходов при разных направлениях обработки представлена на рис. 1.

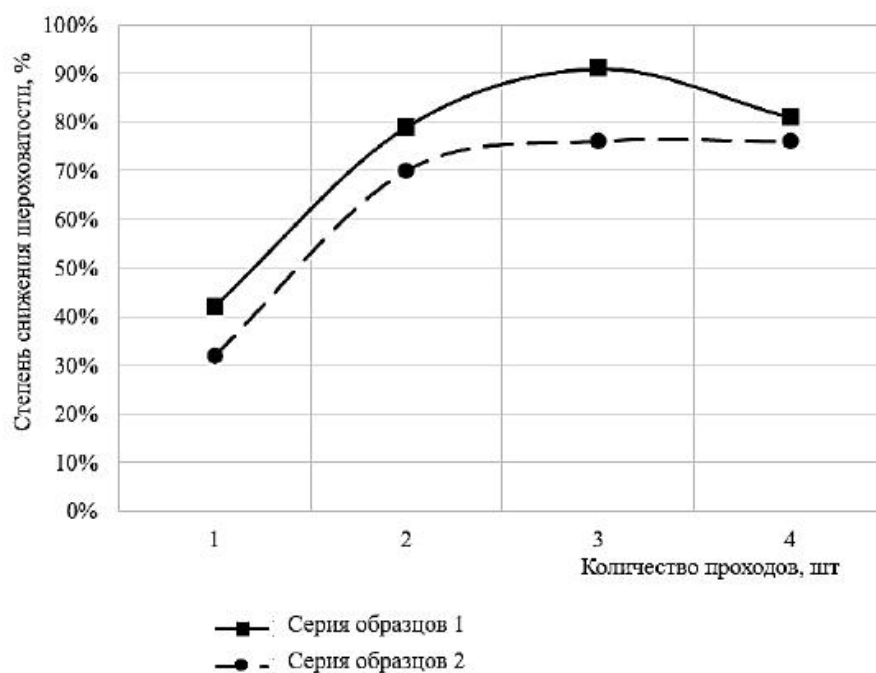


Рис. 1. Зависимость улучшения поверхности от разного количества проходов (продольное сечение)

Согласно данным таблицы и рис. 1 видно, что эффективнее всего полировка будет происходить при наличии нескольких проходов, а именно 4, и при продольном направлении выращивания (серия 1). Данное направления выращивания образцов совпадает с направлением проведения полировки.

Также было исследовано влияние мощности лазерного излучения на шероховатость поверхности, которое показано на рис. 2. Показано, что при слишком низкой мощности шероховатость снижается слабо. При увеличении мощности удаётся получать приемлемую шероховатость в широком диапазоне параметров.

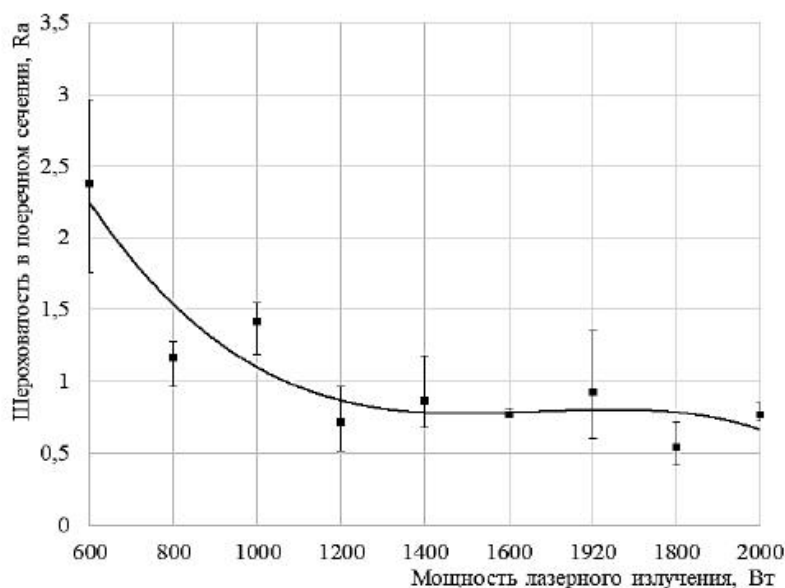


Рис. 2. Зависимости шероховатости в поперечном сечении в зависимости от мощности лазерного излучения

Выводы. Экспериментально подтверждена эффективность лазерной полировки как метода для значительного снижения шероховатости поверхности образцов из нержавеющей стали 316L, полученных методом селективного лазерного плавления с однонаправленной стратегией сканирования.

Установлено, что ключевым фактором, влияющим на конечное качество поверхности, является количество проходов лазерного излучения. Наибольшее улучшение параметров шероховатости наблюдалось после четырех проходов. Шестикратная обработка не дала дополнительного улучшения, а в некоторых случаях привела к ухудшению результата по сравнению с четырехпроходной, что свидетельствует о существовании оптимума.

Выявлена зависимость эффективности полировки от направления обработки относительно направления выращивания образца. Наилучшие результаты были достигнуты при совпадении направления сканирования лазера при полировке с направлением валиков (продольное сечение).

Мощность лазерного излучения является критически важным параметром процесса. Слишком низкая мощность недостаточна для эффективного переплава неровностей, в то время как существует широкий диапазон мощностей, позволяющих достичь приемлемого качества поверхности.

Лазерная полировка продемонстрировала способность эффективно сглаживать поверхность как в продольном, так и в поперечном направлении относительно валиков, хотя степень улучшения варьировалась в зависимости от направления измерения

Список источников

- [1] Мельникова М.А., Медведева Н.А., Голованова И.В. Промышленная революция 4.0 и вызовы образования для поколения Z. *Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Симферополь, Издательство Типография «Ариал», 2025, с. 701–707.
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. *Лазерные аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 278 с.
- [3] Ramos J.A., Murphy J., Wood K., Bourell D.L., Beaman J.J. Surface roughness enhancement of indirect-SLS metal parts by laser surface polishing. *Konferenz-Einzelbericht: Solid Freeform Fabrication Proceedings, Proceedings of the SFF Symp.*, 2001, pp. 28–38.
- [4] Липкин Я.Н. Бершадская Т.М. *Химическое полирование металлов*. Москва, Машиностроение, 1988, 112 с.
- [5] Johannes Preussner J., Oeser S., Pfeiffer W., Temmler A., Willenborg E. Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 996, pp. 1–7.