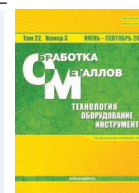




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование возможности чистовой лазерной обработки заготовок из алюминиевого сплава Д16

Антон Кисель^{1, а, *}, Дмитрий Белан^{2, б}, Георгий Тодер^{2, с}

¹ Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

² Омский государственный университет путей сообщения, пр. К. Маркса, 35, г. Омск, 644046, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>,  kisel1988@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-7168-103X>,  Baltazar.13@mail.ru,

^с  <https://orcid.org/0000-0001-5000-7137>,  georgyt@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.01:621.373.826

История статьи:

Поступила: 12 июня 2020

Рецензирование: 22 июня 2020

Принята к печати: 30 июля 2020

Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Лазерная обработка

Шероховатость поверхности

Чистовая обработка

Алюминиевый сплав

Плотность линий

Мощность лазера

АННОТАЦИЯ

Введение: Одна из важнейших задач при производстве металлических деталей – обеспечение необходимого качества обработанной поверхности. Существует множество способов достижения требуемого качества, но наименее исследованным является лазерная микрообработка. **Цель работы** – экспериментальное определение возможности снижения шероховатости поверхности заготовки с помощью лазерной обработки. **Методы.** Лазерная обработка в данных исследованиях выполнялась с помощью системы лазерной маркировки (СЛМ) «ТурбоМаркер-В20». Идея исследований состоит в том, что с помощью лазерной обработки с рациональными режимами возможно уменьшить шероховатость поверхности заготовки за счет удаления вершин микронеровностей. При проведении исследований в качестве режимов лазерной обработки выбраны плотность линий ρ , описываемых лазером при обработке, линий/мм, и мощность лазера N , %. **Результаты и их обсуждение.** В результате проведенных экспериментов и выполненных расчетов была построена поверхность отклика и установлена формула зависимости $Ra_{cp} = f(\rho; N)$. Оценка установленной зависимости показала, что снижения шероховатости можно достичь при следующих режимах: $\rho = 120$ линий/мм; $N = 1 \dots 5$ %. Затем выполнена лазерная обработка предварительно фрезерованных и шлифованных заготовок с полученными режимами. Основываясь на результатах экспериментальных исследований, представленных в данной статье, можно сделать следующие выводы: 1) лазерная обработка может быть применена с целью окончательной (финишной) обработки, так как позволяет снизить шероховатость поверхности фрезерованной заготовки из сплава Д16 на 23,8 %, а шлифованной – на 6,6 %; 2) несмотря на то что снижение шероховатости после обработки шлифованной заготовки незначительно, возможным является то, что применяемые режимы не были оптимальными для данных условий. Поэтому дальнейшие исследования следует направить на определение таких режимов, а также на установление физических процессов в зоне обработки и их влияния на заготовку.

Для цитирования: Кисель А.Г., Белан Д.Ю., Тодер Г.Б. Исследование возможности чистовой лазерной обработки заготовок из алюминиевого сплава Д16 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 33–43. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-33-43.

Введение

Одной из важнейших задач при производстве металлических деталей всегда было и остается обеспечение необходимого качества обработанной поверхности. Требуемое качество достигается следующими способами:

1) за счет применения рациональных режимов резания и режущих инструментов, а также

современного станочного оборудования (станки повышенной жесткости обеспечивают уменьшение вибраций технологической системы, а рациональные режимы и режущий инструмент – снижение возникающих сил и получаемой формы детали и шероховатости поверхности) [1–4];

2) за счет рационального выбора смазочно-охлаждающих жидкостей (это обеспечивает снижение температуры в зоне обработки, снижение силы трения и силы резания, в результате чего уменьшаются температурные и механические деформации заготовки и увеличивается точность получаемых размеров) [5–8];

*Адрес для переписки

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент
 Омский государственный технический университет
 пр. Мира, 11,
 644050, г. Омск, Россия
 Тел.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

3) доводочных операций (это дополнительные операции, при которых с заготовки снимается припуск малого размера – сотые доли миллиметра – до достижения требуемого размера детали и шероховатости поверхности – обработка свободным и закрепленным абразивом) [9–12];

4) комбинированных методов обработки (к ним относятся традиционные методы механической обработки, но с применением дополнительных физических воздействий, таких как электрический ток, магнитное поле, вибрации, пластическая деформация, ультразвук и другое, что нацелено на снижение шероховатости и волнистости поверхности, а также на увеличение ресурса получаемой детали) [13–16].

В настоящее время в машиностроении находят все большее применение лазерные технологии, используемые при следующих операциях обработки металлических заготовок:

- 1) сверление и перфорирование [17];
- 2) термическая обработка [18];
- 3) лазерная резка [19, 20];
- 4) гравировка и маркировка [21];
- 5) микрообработка [22];
- 6) спекание [23, 24];
- 7) модификация поверхности [25, 26];
- 8) селективная лазерная абляция [27, 28];
- 9) лазерная сварка [29, 30].

Из перечисленных способов микрообработка предполагает обработку деталей малых размеров (применяемых, например, в электронике) и отличается величиной снимаемого припуска за один проход от 10 мкм и более. Наличие большого числа публикаций по лазерной обработке за последние годы говорит об актуальности данной тематики. Однако несмотря на это, в литературе практически не освещен вопрос о зависимости качества получаемой поверхности от параметров лазерной обработки. Поскольку речь идет о микрообработке, принятым параметром качества должна быть шероховатость. Предполагается, что другие параметры качества обеспечиваются при обработке, предшествующей лазерной. Следует отметить, что необходимо выбирать так называемые «щадящие» режимы лазерной обработки, в результате чего на поверхности заготовки не возникает высокая температура, а значит, не происходят изменения структуры и свойств материала заготовки. Таким образом, **целью**

данной работы является экспериментальное определение возможности снижения шероховатости поверхности заготовки с помощью лазерной обработки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**: 1) экспериментально установить шероховатость поверхности после лазерной обработки с различными режимами; 2) установить зависимость шероховатости поверхности от режимов лазерной обработки; 3) расчетным путем определить режимы, при которых возможно уменьшение шероховатости поверхности; 4) экспериментально установить шероховатость поверхности при рассчитанных режимах и сделать вывод об эффективности лазерной обработки.

Методика исследований

Лазерная обработка в данных исследованиях выполнялась с помощью системы лазерной маркировки (СЛМ) «ТурбоМаркер-В20» производства ООО «Лазерный Центр» (рис. 1). Основные технические характеристики применяемой системы следующие:

- тип лазера – иттербиевый импульсный волоконный;
- длина волны основного излучения – 1055...1075 нм;
- длительность импульса – 100...110 нс;
- максимальная выходная мощность излучения – 20 Вт;
- диапазон регулирования частоты модуляции – 20...100 кГц.

Идея исследований состоит в том, что с помощью лазерной обработки с рациональными режимами возможно уменьшение шероховатости поверхности заготовки за счет удаления вершин микронеровностей. Применяемая СЛМ предназначена для нагрева, плавления и испарения части металла из зоны воздействия, что может негативно сказываться на качестве поверхности. Следовательно, для чистовой обработки необходимы такие режимы, при которых не будет возникать высоких температур на поверхности заготовки, а значит, не будет и изменений свойств материала. На начальном этапе требуется установить эмпирическую зависимость шероховатости как основного параметра качества от режимов лазерной обработки. Это позволит с определенной погрешностью прогнозировать

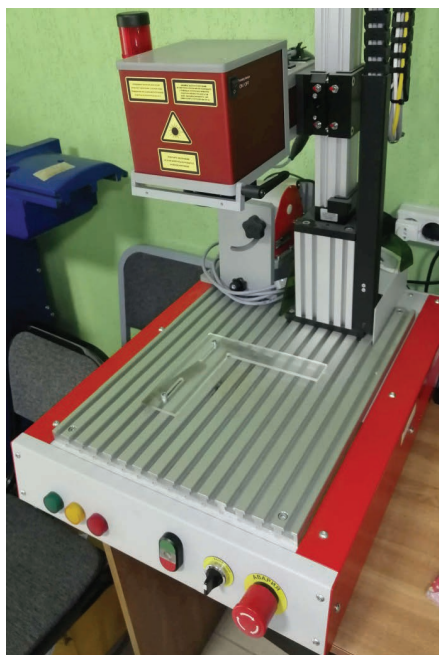


Рис. 1. Общий вид СЛМ
«ТурбоМаркер-V20»

Fig. 1. General view of the LMS
“TurboMarker-V20”



Рис. 2. Внешний вид
обработанной заготовки

Fig. 2. Appearance of the
processed billet

качество обработанной поверхности, а значит, сузить зону поиска рациональных режимов.

При проведении исследований в качестве режимов лазерной обработки выбраны следующие два наиболее значимых (эксперимент двухфакторный):

- плотность линий, описываемых лазером при обработке, линий/мм;
- мощность лазера, % (от максимальной мощности, которая для данной модели СЛМ составляет 20 Вт).

При этом неизменными были частота модуляции (40 кГц) и скорость маркировки (800 мм/с).

В качестве материала обрабатываемой заготовки принят алюминиевый сплав Д16, так как алюминиевые сплавы являются одними из наиболее распространенных в машиностроении и, в частности, в авиа- и ракетостроении. Поэтому к обработке таких сплавов предъявляют высокие требования по качеству получаемой поверхности и точности размеров.

Эксперименты проводились на шлифованных заготовках (рис. 2) со средней шероховатостью Ra 0,076 мкм при следующих режимах:

- плотность линий лазера ρ , линий/мм: 20, 60, 100;
- мощность лазера N , %: 10, 15, 20.

Плотность линий выбрана в достаточно широком диапазоне с целью увеличения вероятности нахождения оптимальной величины. Значения мощности приняты на основе предварительных экспериментов такие, при которых не происходит видимых изменений поверхности заготовки. Обработанная при каждом режиме область заготовки пронумеровывалась и обводилась с помощью СЛМ, для того чтобы в дальнейшем производить измерения шероховатости. Размеры обработанных областей составляли 15×15 мм. На каждом режиме лазерной обработки производился один проход.

Результаты и их обсуждение

Результаты лазерной обработки оценивались с помощью профилометра PS1 Mahr (рис. 3). Измерения шероховатости производились под углом 90° к линиям, описываемым лазером. На каждой обработанной области (т. е. для каждого из режимов обработки) шероховатость определялась 5...7 раз и рассчитывалось ее среднее арифметическое значение (Ra_{cp} , мкм). Полученные данные представлены в табл. 1.

Обработка результатов исследований выполнялась методом полного факторного экспери-



Рис. 3. Измерение шероховатости обработанной заготовки

Fig. 3. Measurement of the processed workpiece roughness

Таблица 1

Table 1

Результаты измерений шероховатости заготовок после лазерной обработки

The results of measuring the workpieces roughness after laser processing

Номер опыта	ρ , линий/мм	N , %	Ra_{cp} , мкм
1	20	10	0,122
2	20	15	0,151
3	20	20	0,226
4	60	10	0,156
5	60	15	0,233
6	60	20	0,376
7	100	10	0,188
8	100	15	0,305
9	100	20	0,450

мента и также с помощью программы STATISTICA v12.0. В результате было установлено, что погрешность относительно экспериментальных данных при расчетах по формуле, полученной методом полного факторного эксперимента, превышала 17 %. Погрешность при расчетах по формуле, полученной с помощью программы STATISTICA v12.0, не превысила 6,7 %. Поэтому дальнейшие расчеты выполнялись по формуле, полученной в данной программе:

$$Ra_{cp} = 0,1885 + 5,9028 \cdot 10^{-6} \rho - 0,0201N - 9,2187 \cdot 10^{-6} \rho^2 + 0,0002\rho N + 0,0009N^2.$$

Установленная таким образом поверхность отклика представлена на рис. 4.

Несмотря на то что при испытаниях установлено увеличение шероховатости поверхности после лазерной обработки, полученное выражение дает возможность прогнозировать тенденцию изменения шероховатости поверхности.

Оценка поверхности отклика (рис. 4) показала, что для уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности необходимо устанавливать мощность лазера менее 10 %. Если рассматривать зависимость шероховатости от плотности линий при постоянной мощности, равной 10 %, то расчет показал, что на выбранном ранее диапазоне есть точка экстремума, соответствующая плотности 108,80 линий/мм, т. е. для уменьшения шероховатости необходимо устанавливать плотность либо менее 20 линий/мм, либо более 108,80 линий/мм. Однако очевидным является то, что при снижении плотности линий снижа-

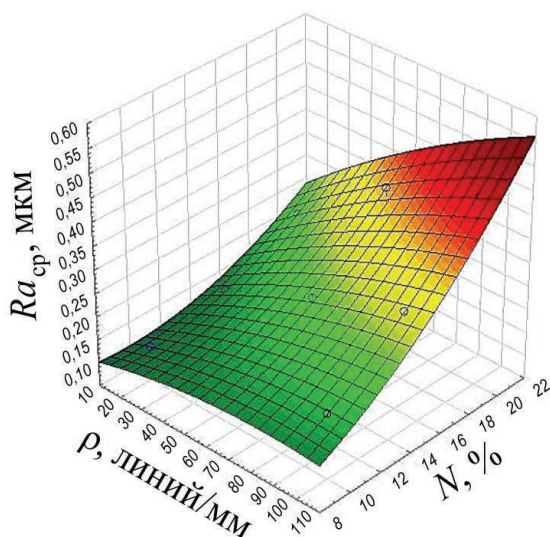


Рис. 4. Поверхность отклика зависимости

$$Ra_{cp} = f(\rho; N)$$

Fig. 4. The response surface of the dependency

$$Ra_{av} = f(\rho; N)$$

ется также и площадь фактически обработанной поверхности заготовки. Поэтому для расчетного определения режима лазерной обработки, при котором возможно снижение шероховатости, было принято решение снижать мощность лазера менее 10 % и увеличивать плотность линий более 108,80 линий/мм. Путем подбора варьируемых факторов расчетным путем по формуле (1) было установлено, что снижения шероховатости поверхности заготовки можно достигнуть при следующих режимах лазерной обработки:

- $\rho = 120$ линий/мм;
- $N = 1 \dots 5$ %.

Установленные таким образом режимы нуждаются в экспериментальной проверке. С этой целью была выполнена обработка заготовки из сплава Д16 методом торцового фрезерования. Установленная описанным выше методом средняя шероховатость поверхности Ra_{cp} составила 1,348 мкм. Затем производилась лазерная обработка полученной поверхности с режимами, при которых было ранее спрогнозировано снижение шероховатости. На фрагменте заготовки (рис. 5) представлены обработанные области: первая слева область соответствует мощности 1 %, вторая – 3 %, третья – 5 %.

При визуальной оценке заготовки (см. рис. 4) видимых изменений после лазерной обработки не было установлено, что говорит об отсутствии возникновения высоких температур и сохра-



Рис. 5. Фрагмент фрезерованной заготовки с областями, подвергшимися лазерной обработке

Fig. 5. A fragment of a milled billet with laser-treated areas

нения свойств материала. Однако в результате измерений шероховатости было зафиксировано изменение по сравнению с поверхностью, не подвергавшейся лазерной обработке. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Оценка табл. 2 показала, что лазерная обработка при $\rho = 120$ линий/мм и $N = 1$ % позволяет снизить шероховатость поверхности фрезерованной заготовки из сплава Д16 на 23,8 %. Полученные результаты подтверждают высказанную ранее гипотезу о возможности снижения шероховатости заготовки методом лазерной обработки. Однако исходная шероховатость заготовки была достаточно высокой и соответствовала седьмому классу чистоты поверхности.

Интересной является возможность снижения шероховатости поверхности более высокого класса чистоты, например, после шлифования. Поэтому далее была выполнена лазерная обработка шлифованной заготовки, образец которой представлен на рис. 2, с установленными режи-

Таблица 2

Table 2

Результаты измерений шероховатости фрезерованных заготовок после лазерной обработки с установленными режимами
The results of measurements of the milled workpieces roughness after laser processing with the established modes

ρ , линий/мм	N , %	Ra_{cp} , мкм
0 (до лазерной обработки)	0 (до лазерной обработки)	1,348
120	5	1,302
120	3	1,204
120	1	1,027

мами. Исходная средняя шероховатость заготовки Ra_{cp} , как было сказано ранее, составляла 0,076 мкм. Результаты измерений шероховатости заготовок приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты измерений шероховатости шлифованной заготовки после лазерной обработки с установленными режимами

The results of measurements of the grounded workpiece roughness after laser processing with established modes

ρ , линий/мм	N , %	Ra_{cp} , мкм
120	5	0,077
120	3	0,071
120	1	0,093

Оценка табл. 3 показала, что лазерная обработка при $\rho = 120$ линий/мм и $N = 3$ % позволяет снизить шероховатость поверхности шлифованной заготовки из сплава Д16 на 6,6 %. Полученные результаты еще раз подтверждают высказанную ранее гипотезу о возможности снижения шероховатости методом лазерной обработки, и данное явление справедливо для шлифованных заготовок.

Выводы

В результате проведенных исследований доказана гипотеза о возможности снижения шероховатости заготовки методом лазерной обработки за счет удаления вершин микронеровностей и решены все поставленные задачи: 1) экспериментально установлена шероховатость поверхности после лазерной обработки с различными режимами; 2) с помощью программы STATISTICA v12.0 установлена эмпирическая зависимость шероховатости поверхности от режимов лазерной обработки; 3) расчетным путем определены режимы, при которых возможно уменьшение шероховатости поверхности; 4) экспериментально установлена шероховатость поверхности при рассчитанных режимах и сделан вывод об эффективности лазерной обработки.

Так как лазерная обработка позволяет снизить шероховатость поверхности фрезерованной

заготовки из сплава Д16 на 23,8 %, а шлифованной – на 6,6 %, она может быть применена с целью окончательной (финишной) обработки. Несмотря на то что снижение шероховатости после обработки шлифованной заготовки незначительно, возможным является то, что применяемые режимы не являлись оптимальными для данных условий. Поэтому дальнейшие исследования следует направить на определение таких режимов, а также на установление физических процессов в зоне обработки и их влияния на заготовку.

Список литературы

1. Machining of directed energy deposited Ti6Al4V using adaptive control / O. Oyelola, A. Jackson-Crisp, P. Crawforth, D.M. Pieris, R.J. Smith, R. M'Saoubi, A.T. Clare // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 54. – P. 240–250. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.004.
2. A closed-loop error compensation method for robotic flank milling / G. Xiong, Z.L. Li, Y. Ding, L.M. Zhu // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Vol. 63. – P. 101928. – DOI: 10.1016/j.reim.2019.101928.
3. Friction improvement via grinding wheel texturing by dressing / M.G. Moreno, J.A. Ruiz, D.B. Azpeitia, J.I.M. Gonzalez, L.G. Fernandez // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107, iss. 11–12. – P. 4939–4954. – DOI: 10.1007/s00170-020-05350-6.
4. Surface integrity and corrosion performances of hardened bearing steel after hard turning / R. Bertolini, V. Bedekar, A. Ghiotti, E. Savio, R. Shivpuri, S. Bruschini // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 108. – P. 1983–1995. – DOI: 10.1007/s00170-020-05352-4.
5. Liao Y.S., Li T.H., Liu Y.C. An approach to improve cutting performance in micromilling of titanium alloy // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*. – 2020. – Vol. 8, iss. 2. – P. 024503. – DOI: 10.1115/1.4046560.
6. Jebaraj M., Kumar M.P., Anburaj R. Effect of LN2 and CO(2) coolants in milling of 55NiCrMoV7 steel // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 53. – P. 318–327. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.040.
7. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids / Z. Said, M. Gupta, H. Hegab, N. Arora, A.M. Khan, M. Jamil, E. Bellos // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 105, iss. 5–6. – P. 2057–2086. – DOI: 10.1007/s00170-019-04382-x.

8. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication / J.C. Lopes, C.E.H. Ventura, L.D. Fernandes, A.B. Tavares, L.E.A. Sanchez, H.J. de Mello, P.R. de Aguiar, E.C. Bianchi // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 102, iss. 1–4. – P. 333–341. – DOI: 10.1007/s00170-018-3174-4.

9. Реченко Д.С. Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 18–25. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25.

10. Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В., Толмачев А.И. Исследование влияния дефектов точения на формирование микрорельефа поверхности стали при ультразвуковой финишной обработке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 1 (54). – С. 14–18.

11. Chen S.T., Chen Y.Y. Microgroove grinding of monocrystalline diamond using medium-frequency vibration-assisted grinding with self-sensing grinding force technique // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 282. – P. 116686. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116686.

12. Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond / F.S.F. Ribeiro, J.C. Lopes, M.V. Garcia, L.E.D. Sanchez, H.J. de Mello, P.R. de Aguiar, E.C. Bianchi // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 108. – P. 931–941. – DOI: 10.1007/s00170-020-05500-w.

13. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing / M. Bambach, I. Sizova, B. Sydow, S. Hemes, F. Meiners // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 282. – P. 116689. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116689.

14. On the turning of electron beam melted gamma-TiAl with coated and uncoated tools: a machinability analysis / S. Anwar, N. Ahmed, S. Pervaiz, S. Ahmad, A. Mohammad, M. Saleh // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 282. – P. 116664. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116664.

15. Study on subsurface damage and surface quality of silicon carbide ceramic induced by a novel non-resonant vibration-assisted roll-type polishing / X.Y. Chen, Y. Gu, J.Q. Lin, A. Yi, M.S. Kang, X.Y. Cang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 282. – P. 116667. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116667.

16. Improving the effectiveness of combined grinding processes for processing superhard materials / J. Kundrak, V. Fedorovich, I. Pyzhov, A.P. Markopoulos // *Journal of Manufacturing Processes*. –

2019. – Vol. 43 (A). – P. 270–275. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.004.

17. Surface morphology and wall angle comparison of microchannels fabricated in titanium alloy using laser-based processes / S. Bhandari, N. Martinez-Prieto, J. Cao, K. Ehmann // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*. – 2020. – Vol. 8, iss. 2. – P. 021001. – DOI: 10.1115/1.4046283.

18. Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices / A. Rottger, J. Boes, W. Theisen, M. Thiele, C. Esen, A. Edelmann, R. Hellmann // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 108. – P. 769–783. – DOI: 10.1007/s00170-020-05371-1.

19. Laser cutting optimization model with constraints: maximization of material removal rate in CO2 laser cutting of mild steel / M. Madic, S. Mladenovic, M. Gostimirovic, M. Radovanovic, P. Jankovic // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2020. – Vol. 234 (10). – P. 1323–1332. – DOI: 10.1177/0954405420911529.

20. Голышев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Оптимальный выбор технологии лазерной резки толстых стальных листов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3 (72). – С. 15–22. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-15-22.

21. Microstructure and hydrothermal ageing of alumina-zirconia composites modified by laser engraving / L. Gremillard, L. Cardenas, H. Reveron, T. Douillard, A. Vogl, K. Hans, T. Oberbach // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2020. – Vol. 40, iss. 54. – P. 2077–2089. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.01.027.

22. Surface analysis and electrochemical characterization on micro-patterns of biomedical Nitinol after nanosecond laser irradiating / Z.Q. Cui, S. Li, J. Zhou, Z.H. Ma, W. Zhang, Y.C. Li, P. Dong // *Surface & Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 391. – P. 125730. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125730.

23. Ha S., Park E., Kim N. Analysis of shape deformation from densification of additive manufacturing parts in selective laser sintering // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2020. – Vol. 21. – P. 1571–1580. – DOI: 10.1007/s12541-020-00359-z.

24. Сапрыкина Н.А. Исследование влияния режимов лазерного спекания на толщину спеченного слоя порошка DSK-F75 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 1 (66). – С. 27–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-27-32.

25. Modification of surface characteristics and electrochemical corrosion behavior of laser powder bed fused stainless-steel 316L after laser polishing / L. Chen, B. Richter, X.Z. Zhang, X.D. Ren, F.E. Pfefferkorn // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 32. – P. 101013. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.101013.

26. Получение упрочняющих покрытий из аморфизуемых сплавов Fe-Cr-Si-B-C лазерно-плазменными методами / М.Н. Хомяков, П.А. Пинаев, П.А. Стаценко, И.Б. Мирошниченко, Г.Н. Грачев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 21–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-21-34.

27. Pabst L., Ebert R., Exner H. Selective ablation of thin nickel-chromium-alloy films using ultrashort pulsed laser // *Physics Procedia*. – 2016. – Vol. 83. – P. 104–113. – DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.019.

28. Сапрыкина Н.А. Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. – № 3 (76). – С. 6–16. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-3-6-16.

29. Microstructure and mechanical properties of CLF-1/316 L steel dissimilar joints welded with fiber laser welding / Y.L. Shi, S.K. Wu, H.B. Liao, X.Y. Wang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 54. – P. 318–327. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.022.

30. Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М. Исследование микроструктуры высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов авиационного назначения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 50–62. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-50-62.

Конфликт интересов

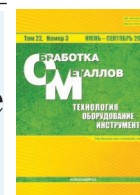
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Investigation of the Possibility of Finishing Laser processing of Aluminum Alloy D16 Workpieces

Anton Kisel'^{1, a, *}, Dmitriy Belan^{2, b}, Georgij Toder^{2, c}

¹ Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

² Omsk State Transport University, 35 Prospekt K. Marksa, Omsk, 644046, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>,  kisel1988@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-7168-103X>,  Baltazar.13@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-5000-7137>,  georgyt@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 June 2020

Revised: 22 June 2020

Accepted: 30 July 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

Laser processing
Surface roughness
Finishing
Aluminum alloy
Density of lines
Laser power

ABSTRACT

Introduction: One of the most important tasks in the production of metal parts is to ensure the necessary quality of the processed surface. There are many ways to achieve the required quality, but one of the least studied is laser micro-processing. **The purpose of the work** is to experimentally determine the possibility of reducing the roughness of the workpiece surface using laser processing. **Methods:** Laser treatment in these studies is performed using a laser marking system (LMS) "Turbomaster-B20". The idea of the research is that using laser processing with rational modes it is possible to reduce the roughness of the workpiece surface by removing the vertices of micro-irregularities. The density of lines (ρ , lines/mm), described by the laser during processing, and the laser power (N , %) are selected as the laser processing modes. **Results and Discussion:** As a result of the experiments and calculations, the response surface is constructed and the formula for the dependence of $Ra_{av} = f(\rho; N)$ is established. Evaluation of the established dependence showed that the reduction of roughness can be achieved by the following this modes: $\rho = 120$ lines/mm; $N = 1...5$ %. Then, laser processing of pre-milled and grounded workpieces with the obtained modes is performed. Based on the results of experimental studies presented in this paper, the following conclusions can be made: 1) laser processing can be applied for the purpose of final (finishing) processing, because it reduces the surface roughness of the milled billet made of D16 alloy by 23.8 %, and the ground one – by 6.6 %; 2) despite the fact that the decrease in roughness after processing the grounded workpiece is insignificant, it is possible that the applied modes were not optimal for these conditions. Therefore, further research should be directed to the definition of such modes, as well as to the establishment of physical processes in the processing zone and its impact on the workpiece.

For citation: Kisel' A.G., Belan D.Yu., Toder G.B. Investigation of the possibility of finishing laser processing of aluminum alloy D16 workpieces. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 33–43. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-33-43. (In Russian).

References

1. Oyelola O., Jackson-Crisp A., Crawforth P., Pieris D.M., Smith R.J., M'Saoubi R., Clare A.T. Machining of directed energy deposited Ti6Al4V using adaptive control. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 54, pp. 240–250. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.004.
2. Xiong G., Li Z.L., Ding Y., Zhu L.M. A closed-loop error compensation method for robotic flank milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 63, p. 101928. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101928.
3. Moreno M.G., Ruiz J.A., Azpeitia D.B., Gonzalez J.I.M., Fernandez L.G. Friction improvement via grinding wheel texturing by dressing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, iss. 11–12, pp. 4939–4954. DOI: 10.1007/s00170-020-05350-6.

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Omsk State Technical University
 11 Prospekt Mira,
 644050, Omsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

4. Bertolini R., Bedekar V., Ghiotti A., Savio E., Shivpuri R., Bruschi S. Surface integrity and corrosion performances of hardened bearing steel after hard turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 1983–1995. DOI: 10.1007/s00170-020-05352-4.
5. Liao Y.S., Li T.H., Liu Y.C. An approach to improve cutting performance in micromilling of titanium alloy. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2020, vol. 8, iss. 2, p. 024503. DOI: 10.1115/1.4046560.
6. Jebaraj M., Kumar M.P., Anburaj R. Effect of LN2 and CO(2) coolants in milling of 55NiCrMoV7 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 53, pp. 318–327. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.040.
7. Said Z., Gupta M., Hegab H., Arora N., Khan A.M., Jamil M., Bellos E. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, iss. 5–6, pp. 2057–2086. DOI: 10.1007/s00170-019-04382-x.
8. Lopes J.C., Ventura C.E.H., Fernandes L.D., Tavares A.B., Sanchez L.E.A., Mello H.J. de, Aguiar P.R. de, Bianchi E.C. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, iss. 1–4, pp. 333–341. DOI: 10.1007/s00170-018-3174-4.
9. Rechenko D.S. Issledovanie protsessa rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov na mikrourovne [The study of the process of difficult-to-machine materials cutting at the micro-level]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 18–25. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25.
10. Kovalevskaya Zh.G., Uvarin P.V., Tolmachev A.I. Issledovanie vliyaniya defektov tocheniya na formirovanie mikrorel'efa poverkhnosti stali pri ul'trazvukovoi finishnoi obrabotke [Investigation of the influence of turning defects on the formation of the surface micro relief of steel at ultrasonic finishing treatment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 14–18.
11. Chen S.T., Chen Y.Y. Microgroove grinding of monocrystalline diamond using medium-frequency vibration-assisted grinding with self-sensing grinding force technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 282, p. 116686. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116686.
12. Ribeiro F.S.F., Lopes J.C., Garcia M.V., Sanchez L.E.D., Mello H.J. de, Aguiar P.R. de, Bianchi E.C. Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 931–941. DOI: 10.1007/s00170-020-05500-w.
13. Bambach M., Sizova I., Sydow B., Hemes S., Meiners F. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 282, p. 116689. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116689.
14. Anwar S., Ahmed N., Pervaiz S., Ahmad S., Mohammad A., Saleh M. On the turning of electron beam melted gamma-TiAl with coated and uncoated tools: a machinability analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 282, p. 116664. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116664.
15. Chen X.Y., Gu Y., Lin J.Q., Yi A., Kang M.S., Cang X.Y. Study on subsurface damage and surface quality of silicon carbide ceramic induced by a novel non-resonant vibration-assisted roll-type polishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 282, p. 116667. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116667.
16. Kundrak J., Fedorovich V., Pyzhov I., Markopoulos A.P. Improving the effectiveness of combined grinding processes for processing superhard materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 43 (A), pp. 270–275. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.004.
17. Bhandari S., Martinez-Prieto N., Cao J., Ehmann K. Surface morphology and wall angle comparison of microchannels fabricated in titanium alloy using laser-based processes. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2020, vol. 8, iss. 2, p. 021001. DOI: 10.1115/1.4046283.
18. Rottger A., Boes J., Theisen W., Thiele M., Esen C., Edelmann A., Hellmann R. Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 769–783. DOI: 10.1007/s00170-020-05371-1.
19. Madic M., Mladenovic S., Gostimirovic M., Radovanovic M., Jankovic P. Laser cutting optimization model with constraints: maximization of material removal rate in CO2 laser cutting of mild steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2020, vol. 234 (10), pp. 1323–1332. DOI: 10.1177/0954405420911529.
20. Golyshev A.A., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Optimal'nyi vybor tekhnologii lazernoi rezki tolstykh stal'nykh listov [Optimal choice of the technology of thick steel sheets laser cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 3 (72), pp. 15–22. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-15-22.

21. Gremillard L., Cardenas L., Reveron H., Douillard T., Vogl A., Hans K., Oberbach T. Microstructure and hydrothermal ageing of alumina-zirconia composites modified by laser engraving. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, iss. 54, pp. 2077–2089. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.01.027.

22. Cui Z.Q., Li S., Zhou J., Ma Z.H., Zhang W., Li Y.C., Dong P. Surface analysis and electrochemical characterization on micro-patterns of biomedical Nitinol after nanosecond laser irradiating. *Surface & Coatings Technology*, 2020, vol. 391, p. 125730. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125730.

23. Ha S., Park E., Kim N. Analysis of shape deformation from densification of additive manufacturing parts in selective laser sintering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, vol. 21, pp. 1571–1580. DOI: 10.1007/s12541-020-00359-z.

24. Saprykina N.A. Issledovanie vliyaniya rezhimov lazernogo spekaniya na tolshchinu spechennogo sloya poroshka DSK-F75 [The research of the effect of laser sintering modes on the thickness of the sintered cobalt-chromium-molybdenum powder layer]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 1 (66), pp. 27–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-27-32.

25. Chen L., Richter B., Zhang X.Z., Ren X.D., Pfefferkorn F.E. Modification of surface characteristics and electrochemical corrosion behavior of laser powder bed fused stainless-steel 316L after laser polishing. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, p. 101013. DOI: 10.1016/j.addma.2019.101013.

26. Khomyakov M.N., Pinaev P.A., Statsenko P.A., Miroshnichenko I.B., Grachev G.N. Poluchenie uprochnyayushchikh pokrytii iz amorfiziruemykh splavov Fe-Cr-Si-B-C lazerno-plazmennymi metodami [Formation of hardening coatings based on Fe-Cr-Si-B-C alloys with high glass-forming ability by laser-plasma methods]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 21–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20-4-21-34.

27. Pabst L., Ebert R., Exner H. Selective ablation of thin nickel-chromium-alloy films using ultrashort pulsed laser. *Physics Procedia*, 2016, vol. 83, pp. 104–113. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.019.

28. Saprykina N.A. Analiz, modelirovanie i prognozirovanie sherokhovatosti poverkhnosti medi, poluchennoi metodom selektivnogo lazernogo plavleniya [Analysis, modeling and prediction of surface roughness of copper, obtained by selective laser melting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 3 (76), pp. 6–16. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-3-6-16.

29. Shi Y.L., Wu S.K., Liao H.B., Wang X.Y. Microstructure and mechanical properties of CLF-1/316 L steel dissimilar joints welded with fiber laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 54, pp. 318–327. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.022.

30. Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M. Issledovanie mikrostruktury vysokoprochnykh lazernykh svarnykh soedinenii alyuminievo-litievnykh splavov aviatsionnogo naznacheniya [Investigation of the microstructure of high-strength laser welded joints of aluminum-lithium aeronautical alloys]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 50–62. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20-2-50-62.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).