

УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 316L, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2016 Д.К. Федорова, Д.В. Иволга, В.П. Алексеев, А.В. Балякин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 12.12.2016

В данной работе представлены результаты исследований влияния направления послойного лазерного сплавления (selective laser melting - SLM) на механическую обработку образцов из нержавеющей стали 316L. Поставлена серия экспериментальных исследований по определению силы резания, возникаемых в процессе обработки. Представлены результаты измерения микротвердости выращенных образцов из нержавеющей стали 316L. По экспериментальным данным построены зависимости усилия резания от скорости, глубины резания и подачи. Зависимости получены с использованием регрессионных моделей, увязывающих усилия резания с технологическими параметрами. Проведен анализ и обсуждение результатов эксперимента.

Ключевые слова: технология селективного лазерного сплавления, механическая обработка, экспериментальные исследования, усилия резания, нержавеющая сталь, регрессионная модель, микротвердость.

Одним из наиболее перспективных направлений развития современного машиностроения является разработка новых технологий быстрого производства изделий [1]. Суть подобных технологий заключается в послойном выращивании изделий из порошкового материала на основе трёхмерной модели (CAD-модели). Одной из таких технологий является технология послойного лазерного сплавления (selective laser melting - SLM). Суть технологии СЛС заключается в послойном изготовлении детали, где тепловым источником служит лазерное излучение. Из года в год растет интерес к данной технологии, ведь селективное лазерное сплавление открывает широкие возможности в производстве сверхлегких металлических конструкций, упрощении производства деталей сложной формы, ускоряет процесс изготовления опытных образцов [2].

Аустенитные нержавеющие стали (ASSS) имеют широкое применение из-за высокой устойчивости к коррозии и окислению. Тем не менее, эти материалы считаются труднообрабатываемыми, так как имеют высокую механическую и микроструктурную чувствительность к деформации и скорости деформации.

Известен целый ряд работ, посвященный созданию материалов и изделий с использова-

Федорова Дарья Константиновна, студентка группы 2201 Б 424 кафедры технологий производства двигателей. E-mail: sprwaspinc@gmail.com

Иволга Дмитрий Викторович, студент группы 2214 Б 423 кафедры технологий производства двигателей.

Алексеев Вячеслав Петрович, аспирант кафедры технологии производства двигателей.

E-mail: alexeev_v.p@mail.ru.

Балякин Андрей Владимирович, ассистент кафедры технологии производства двигателей.

E-mail: a_balik@mail.ru

нием методов послойного лазерного сплавления [3-8], однако в настоящее время ряд вопросов, касающихся постобработки технологии СЛС, еще не исследован, в частности мало изучен вопрос механической обработки деталей, полученных методом СЛС. В литературе, в основном, имеются многочисленные исследования по определению силы резания и температуры в процессе токарной обработки [9, 10]. В данной работе сосредоточимся на ортогональном процессе фрезерования.

Целью данной работы является исследование обрабатываемости заготовок из нержавеющей стали 316L, полученных методом селективного лазерного сплавления.

1. ПОСТАНОВКА НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

Для определения силы резания была использована методика ранее проведенных экспериментальных исследований [11]. В качестве режущего инструмента использовалась концевая твердосплавная фреза фирмы Seco, диаметром 10 мм, количество зубьев – 4. Объектами исследования являются образцы, полученные из порошка нержавеющей стали 316L. Химический состав порошка представлен в табл. 1. Средний диаметр частиц 15...60 мкм. Российским аналогом стали 316L является нержавеющая сталь 03X16H15M3.

Для создания образцов из стали 316L по технологии послойного лазерного сплавления использовалась 3D машина SLM 280HL. Для сплавления порошка в установке используется инфракрасный волоконный лазер с длиной волны 1075 нм и максимальной мощностью 400 Вт, работающий в непрерывном режиме. Для предотвращения окисления и возгорания частиц порошка

Таблица 1. Химический состав 316L (% к массе)

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
AISI 316 L	≤0,030	≤0,75	≤2,0	≤0,045	≤0,030	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0

во время процесса формирования монослоев рабочая камера заполняется инертным газом, при этом содержание кислорода не превышает 0,2%. Образцы размещались на платформе построения горизонтально (образец №2) и вертикально (образец №1) (рис. 1а). По периметру нижней поверхности построены дополнительные к материалу поддержки точки крепления толщиной 1 мм, которые дополнительно служат теплоотводами (рис. 1б). Схема выращивания образцов представлена на рис. 1в.

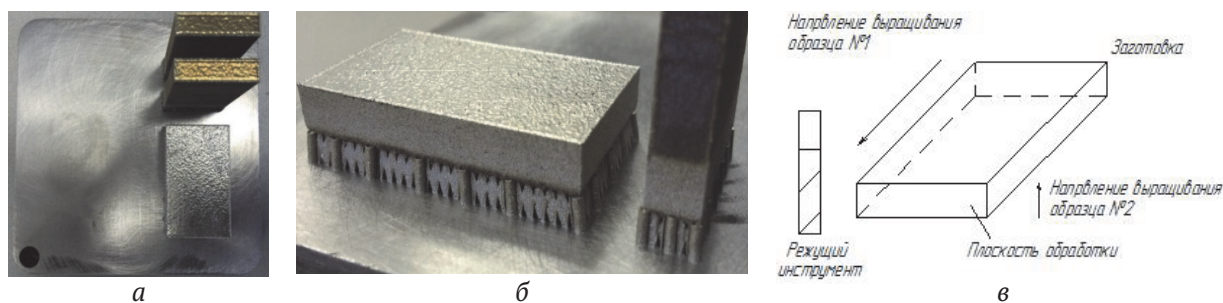


Рис. 1. Выращенные горизонтально и вертикально образцы (а); образцы с материалом подложки и дополнительными точками крепления (б); схема выращивания (в).

Стенд для проведения экспериментов в составе: обрабатывающий центр с ЧПУ ALZMETALLBAZ 15 CNC, оснащенный динамометрическим столом Kistler, который осуществлял регистрацию изменения составляющих усилия резания F_x , F_y , F_z в реальном времени.

При проведении эксперимента скорость резания v изменялась от 60 - 100 м/мин, при подаче на зуб s от 0.05 - 0.2 мм/зуб, боковой съем $t = 0.1 - 1$ мм. Для эксперимента были выбраны заготовки $D \times B \times H$ 40x24x6 (мм). Поверхность каждого образца предварительно обрабатывалась так, чтобы исходная шероховатость у всех образцов была одинаковой Ra 1,25.

2. ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ВЫРАЩЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L

Измерение микротвердости проводилось с помощью прибора ПМТ-3. При измерениях на приборе ПМТ-3 твердость определяется по размерам отпечатков, создаваемых вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 200 г (1,96 Н) и выражается в МПа (по Виккерсу). В качестве индентора применяется четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине, равным 136°. Измерения проводились в нескольких точках по схеме, представленной на рис. 2.

Определение величины площади отпечатка внедряемого индентора при заданной и постоянной нагрузке производилось с помощью электронного микроскопа TESCAN. Результаты измерения микротвердости приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что микротвердость образцов вырастает по мере приближения к поверхности начала выращивания, т.е. наибольшая микротвердость у поверхности начала выращивания образца, а наименьшая у поверхности окончания выращивания. Этот эффект также

можно объяснить теплоотводом при сплавлении слоев лазером: на начальном этапе выращивания размеры образца малы и тепло от него отводится быстро, при этом происходит закалка материала.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По экспериментальным данным построены зависимости усилия резания от скорости, глубины резания и подачи. Зависимости получены с использованием регрессионных моделей, увязывающих усилия резания с технологическими параметрами (рис. 4). Поскольку сигнал, получаемый с динамометрического стола, имеет шумовую составляющую, вызванную внешними объектами, была проведена вейвлет-фильтрация для отделения шумовой составляющей (рис. 3а,б).

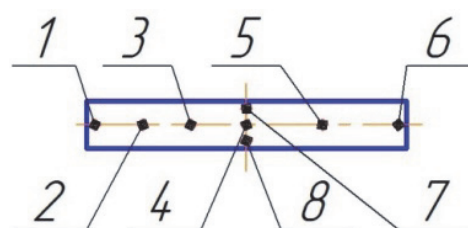


Рис. 2. Схема измерения микротвердости: номера с 1-6 для вертикально выращенных образцов, номера 4, 7 и 8 для горизонтально выращенных образцов

Таблица 2. Результаты измерения микротвердости образцов из нержавеющей стали 316L

№ точки Образец	Твердость по Викерсу HV							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Образец №1	230	210	205	183	192	137	–	–
Образец №2	–	–	–	195	–	–	250	260,5

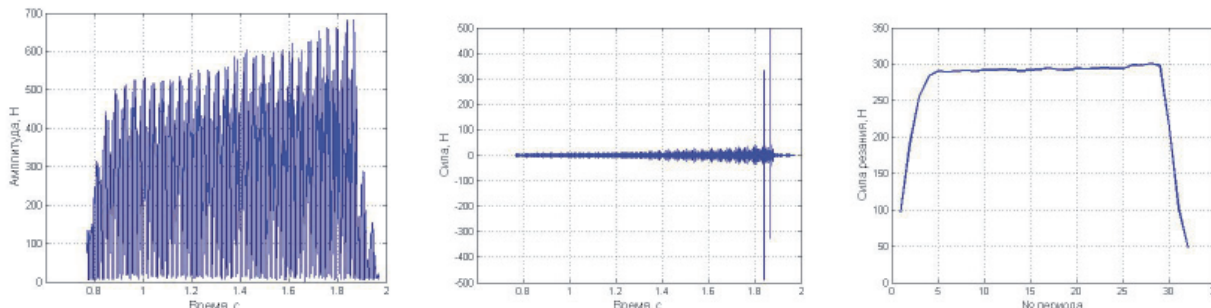


Рис. 3. Сигнал усилий резания при фрезеровании, полученный при эксперименте (полный сигнал (а); шумовая составляющая силы резания (б), интегральная характеристика силы резания (в) при обработке на режимах $V = 60$ м/мин, $S = 0,2$ мм/зуб, $t = 1$ мм

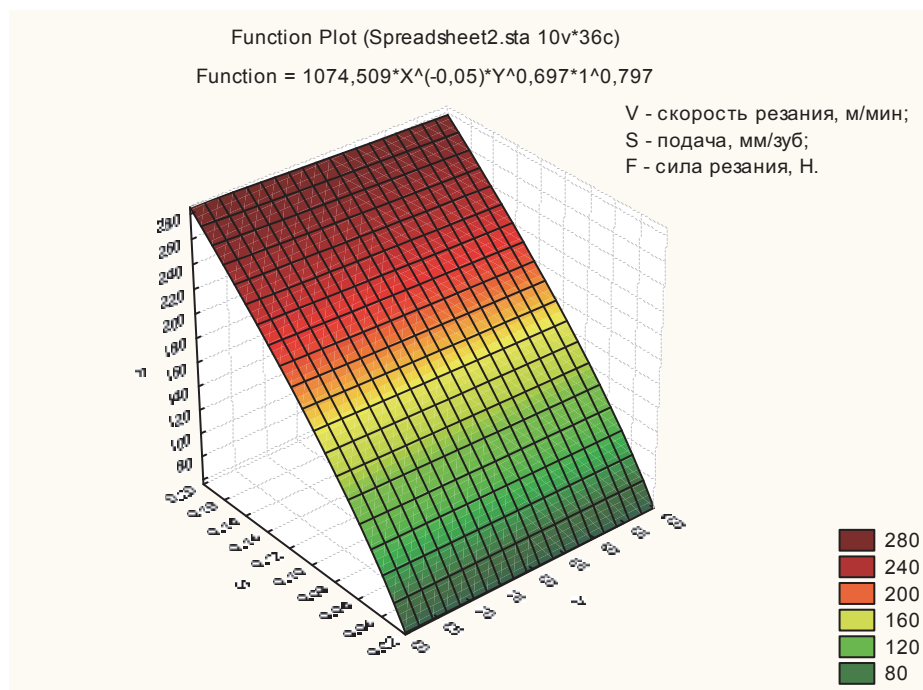


Рис. 4. Поверхность отклика зависимости силы резания F от величины подачи на зуб S и скорости резания V для образца, выращенного горизонтально, при глубине резания $t = 1$ мм

График среднеинтегральной силы резания представлен на рис. 3в.

Анализ полученной модели свидетельствует, что при обработке образца, выращенного горизонтально в области скоростей резания 60-100 м/мин рациональные режимы резания лежат в пределах подач 0,02...0,1. При подачах более 0,1 на всем диапазоне скоростей резания наблюдается интенсивный рост усилия резания за счет термического эффекта пластической деформации, приводящей к повышению вязких свойств материала. Существенного упрочнения за счет роста интенсивности скорости деформации не обнаружено.

При обработке образца, выращенного вертикально, в области скоростей резания 60-100 м/мин рациональные режимы резания лежат в пределах подач 0,02...0,14. При подачах более 0,14 с ростом скорости резания наблюдается интенсивный рост усилия резания за счет термического эффекта пластической деформации, приводящей к повышению вязких свойств материала. Существенного упрочнения за счет роста интенсивности скорости деформации не обнаружено.

В табл. 3 представлены результаты измерения силы резания при обработке на режимах $S = 0,2$ мм/зуб, $t = 1$ мм.

Таблица 3. Значения усилий резания при обработке на режимах $S_z = 0,05$ мм/зуб; $t = 1$ мм

	V = 60 м/мин	V = 80 м/мин	V = 100 м/мин
Сила резания при обработке образца № 1, Н	97,42	99,11	100,44
Сила резания при обработке образца № 2, Н	108,45	106,9	105,7

Из анализа видно, что силы резания при обработке горизонтально выращенного образца больше относительно выращенного вертикально на 5-10%. Этот эффект можно объяснить теплоотводом при сплавлении слоев лазером. Первые слои порошка при сканировании, имеют наиболее низкую максимальную температуру, в результате сильного теплоотвода в материал поддержки. При выращивании образца горизонтально на последующих слоях тепло отводится быстро за счет большей площади и малой высоты выращивания, при этом происходит закалка материала. При выращивании образца вертикально на последующих слоях теплоотвод уменьшается.

При обработке горизонтально выращенного образца сила резания находится в обратной зависимости от скорости резания. Тенденция не существенна и находится в пределах погрешности.

4. ВЫВОДЫ

Направление выращивания материала 316L методом селективного лазерного сплавления оказывает влияние на последующую механическую обработку. Разница силы резания при обработке горизонтально выращенного образца относительно выращенного вертикально в пределах 5-10 %.

При обработке горизонтально выращенного образца сила резания находится в обратной зависимости от скорости резания. Тенденция не существенна и находится в пределах погрешности.

Выявлено, что область рациональных режимов обработки вертикально выращенного образца лежит в диапазоне значений ($V = 60 - 100$ м/мин; $F = 0,02 - 0,14$ мм/зуб; $a = 0,1 - 0,7$ мм). При обработке горизонтально выращенного образца область рациональных режимов лежит в диапазоне значений ($V = 60 - 100$ м/мин; $F = 0,02 - 0,1$ мм/зуб; $a = 0,1 - 0,7$ мм)

Проведено измерение микротвердости. Микротвердость образцов вырастает по мере приближения к поверхности начала выращивания. Этот эффект также можно объяснить теплоотводом при сплавлении слоев лазером. На начальном этапе выращивания размеры образца малы и тепло от него отводится быстро, при этом происходит закалка материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapovichev A.V., Balaykin A.V., Smelov V.G.* Production technology of the internal combustion engine crankcase using additive technologies // *Modern Applied Science*. 2015. V. 9. Iss. 4. P. 335-343.
1. *Шишковский И.В.* Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2016. 400 с.
3. *Abe F., Osakada K., Shiomi M., Uematsu K. and Matsumoto M.* The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 111 Nos 1-3, pp. 210-213.
4. *Mullen L., Stamp R.C., Brooks W.K., Jones E. and Sutcliffe C.J.* Selective laser melting: a regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications // *Journal of Biomedical Materials Research*, 2009.
5. Study of cutting forces and temperatures in milling of AISI 316L / *M. San-Juana, Ó. Martínez, M. del P. de Tiedra, F. J. Santosa, R. López, J. A. Cebrián* // *Procedia Engineering* 132 (2015) 500 – 506.
6. *Шишковский И.В.* Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 424 с.
7. *Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н.* Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послойном лазерном сплавлении // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2012. № 5(1). С. 43-50.
8. *Sufiarov, V.Sh., Popovich, A.A., Borisov, E.V., Polozov, I.A.* Selective laser melting of heat-resistant nickel alloy // *Tsvetnye Metally*. 2015. Vol. 2015. Issue 1. Pages 79-84.
9. *C. Maranhão, J. Paulo Davim.* Finite Element Modelling of Machining of AISI 316 Steel: Numerical Simulation and Experimental Validation // *Simulation Modelling Practice and Theory* 18 (2010) 139–156. J. Van der Geer, J.A.J. Hanraads, R.A. Lupton, The art of writing a scientific article // *J. Sci. Commun.* 163 (2000) 51–59.
10. *P.J. Arrazola, I. Arriola, M.A. Davies.* Analysis of the Influence of Tool Type, Coatings, and Machinability on the Thermal Fields in Orthogonal Machining of AISI 4140 Steels // *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58 (2009) 85–88.
11. Экспериментальное исследование обрабатываемости жаропрочной стали 10X11H23T3MP-ВД применяемой при изготовлении деталей ГТД на фрезерном оборудовании с ЧПУ / *О.С., Сурков А.И.*

RESEARCH OF THE MILLING PROPERTIES OF 316L BILLET MADE BY SLM

© 2016 D.K. Fedorova, D.V. Ivolga, V.P. Alekseev, A.V. Balyakin

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

This paper presents the results of studies of the effect of layered direction of the laser weld (selective laser melting - SLM) for machining the samples of stainless steel 316L. Delivering a series of experimental studies to determine the cutting forces generated during machining. The results of measurements of the microhardness grown samples of stainless steel 316L. The experimental data are constructed according to the cutting forces on the speed, depth of cut and feed. Dependencies are obtained using regression models, linking efforts with cutting process parameters. Analysis and discussion of the experimental results.

Keywords: the technology of selective laser melting, machining, experimental study, cutting forces, stainless steel, regression model, microhardness.

*Daria Fedorova, Student Group 2201 B 424 of the Technology
Production of Engine Department.*

E-mail: spwaspinc@gmail.com.

*Dmitry Ivolga, Student Group 2214 B 423 of the Technology
Production of Engine Department.*

*Vyacheslav Alexeev, Postgraduate Student of the Technology
Production of Engine Department.*

E – mail: alexeev_v.p@mail.ru.

*Andrey Balyakin, Assistant Lecturer at the Technology
Production of Engine Department. E-mail: a_balik@mail.ru*