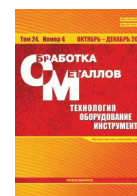




# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Исследование взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб при фрезеровании материала EuTroLoY 16604, полученного DMD-методом

Александр Дюрягин <sup>a, \*</sup>, Дмитрий Ардашев <sup>b</sup>

Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6274-1953>, [s.dyuryagin@mail.ru](mailto:s.dyuryagin@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, [ardashevdy@susu.ru](mailto:ardashevdy@susu.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1 + 621.9.015 + 621.767

#### История статьи:

Поступила: 30 августа 2022  
 Рецензирование: 06 сентября 2022  
 Принята к печати: 21 сентября 2022  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2022

#### Ключевые слова:

Концевое фрезерование  
 Сила резания  
 Шероховатость обработанной поверхности  
 Direct Metal Deposition  
 EuTroLoY 16604

#### Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время значительную долю в машиностроительной отрасли составляют единичные изделия либо изделия, изготавливаемые мелкими партиями. В связи с этим для сокращения затрат на изготовление специальной дорогостоящей оснастки заготовительного передела начинают активно применяться инновационные подходы для получения таких изделий. К таким технологиям можно отнести метод Direct Metal Deposition (DMD), суть которого заключается в осаждении металлических частиц из газопорошковой струи. Данный метод имеет много достоинств. Однако одним из главных недостатков является то, что изделия после выращивания имеют грубую поверхность и не соответствуют точностным требованиям чертежа готовой детали. Следовательно, изделия требуют дальнейшей механической обработки резанием. Вместе с тем вследствие новизны материалов для них отсутствуют режимные параметры для механической обработки. В связи с этим **цель работы** заключается в установлении функциональной взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб при концевом фрезеровании материала EuTroLoY 16604, полученного DMD-методом. В работе проведено экспериментальное исследование силы резания и шероховатости обработанной поверхности при варьировании подачи на зуб при концевом фрезеровании. **Методом исследования** является эксперимент по фрезерованию материала EuTroLoY 16604, полученного DMD-методом, с измерением выходных параметров процесса (сила резания и шероховатость обработанной поверхности). **Результаты и обсуждение.** Измеренные значения силы резания и шероховатости обработанной поверхности позволили установить функциональные и графические зависимости выходных параметров процесса фрезерования от подачи на зуб. Установлено, что при использовании фрезы с меньшим задним углом возникают меньшие силы резания и поверхность при этом имеет меньшую высоту микронеровностей. Таким образом, разработанные функциональные взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб позволят прогнозировать выходные параметры процесса резания и повысить эффективность операции механической обработки резанием. Перспективное направление дальнейшей работы видится в исследовании относительной обрабатываемости и оценке ее количественного значения.

**Для цитирования:** Дюрягин А.А., Ардашев Д.В. Исследование взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб при фрезеровании материала EuTroLoY 16604, полученного DMD-методом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-6-17.

## Введение

Отличительной особенностью современной машиностроительной отрасли является увеличение удельной доли единичных изделий или мелкосерийных партий [1]. В связи с этим активно начинают использоваться инновационные технологии для получения таких изделий.

#### \*Адрес для переписки

Дюрягин Александр Анатольевич, аспирант  
 Южно-Уральский государственный университет,  
 пр. Ленина, 76,  
 454080, г. Челябинск, Россия  
 Тел.: 8 (351) 272-32-94, e-mail: [s.dyuryagin@mail.ru](mailto:s.dyuryagin@mail.ru)

Метод выращивания деталей сложной формы в настоящее время является наиболее быстро развивающейся производственной технологией [2]. Одним из методов, относящихся к данным технологиям, является метод местного осаждения металла – Direct Metal Deposition (DMD). В процессе наплавления данным методом лазерный луч создает ванну расплава, в которую подается металлический порошок [3]. В результате расплавления порошка и материала подложки создается прочное соединение.

DMD-метод позволяет повысить коэффициент использования материала за счет того, что

конечный продукт получают при помощи добавления необходимого количества материала, а не удаления его из цельной заготовки. Имеется возможность локального (местного) нанесения слоя материала. Этот метод активно применяется для нанесения покрытий, а также восстановления изношенных поверхностей порошками, обладающими специальными свойствами [4–6].

Применение DMD-метода сопряжено с проблемой, заключающейся в том, что поверхность после нанесения слоя материала зачастую не соответствует заданным конструкторским требованиям, что было выявлено в работах [7–10]. Для соответствия заданным требованиям необходима дальнейшая механическая обработка резанием. Поскольку DMD-метод не используется в массовом производстве, поэтому в нормативных справочниках отсутствуют режимы резания для их обработки. Большинство предприятий обрабатывают выращенные изделия методом пробных проходов, подбирая при этом подходящие режимы резания и режущий инструмент. Однако такая обработка не может считаться эффективной вследствие нерационального расхода материала. Для этого требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований, чтобы установить взаимосвязь режимных параметров с выходными параметрами процесса резания. Данные, полученные в ходе исследований, позволят разработать нормативную базу (рекомендации) для назначения рациональных режимов механической обработки резанием DMD-материалов.

Большинство работ, содержащих в себе исследования характеристик процесса механической обработки резанием новых материалов [11–13], свидетельствуют о заинтересованности машиностроительной отрасли в использовании данных материалов для производства деталей, так как им можно придать необходимые свойства. Так, в работе [14] проведено экспериментальное исследование обрабатываемости материала Al/SiC-MMC. В ходе токарной обработки было изучено влияние глубины резания, подачи и скорости резания на шероховатость обработанной поверхности и силу резания. Полученные экспериментальные данные позволили установить взаимосвязь скорости резания, подачи и глубины резания с силой резания и шероховатостью обработанной поверхности, а также

показать их влияние на износ режущего инструмента. Результаты эксперимента позволяют из полученных зависимостей выбрать подходящие значения подачи, скорости резания и глубины резания для выполнения технологических требований.

Eun-Jung Kim и др. [10] провели экспериментальное исследование по механической обработке нержавеющей стали 304L. Были определены численные значения силы резания и шероховатости обработанной поверхности для установления характеристик обрабатываемости материала. В работе [15] разработана экспериментальная модель взаимосвязи шероховатости обработанной поверхности с режимами резания (частота вращения шпинделя и скорость подачи) при точении VT6 titanium alloy, полученного DMD-методом. В работах [16–18] представлены исследования процесса фрезерования образцов из материала IN718, полученных с использованием аддитивных технологий. В результате были изучены силы резания, износ режущего инструмента, шероховатость обработанной поверхности и остаточные напряжения при различных технологических условиях.

Таким образом, обрабатываемость, а также процесс механической обработки наплавленных материалов широко изучают во всем мире, стремясь сформировать нормативную базу с режимами резания. Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, позволят повысить эффективность проектирования операций механической обработки резанием. Это направление является актуальным для машиностроительной отрасли.

Цель работы заключается в установлении функциональной взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб при концевом фрезеровании материала EuTroLoY 16604, полученного DMD-методом для повышения эффективности операций механической обработки резанием.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Проведение экспериментального исследования обрабатываемости фрезерованием материала EuTroLoY 16604 концевыми фрезами с различными углами резания с измерением силы резания и шероховатости обработанной поверхности.

2. Разработка математических моделей взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб.

### Методика исследований

Образец для исследования представляет собой слой порошкового материала EuTroLoy 16604, наплавленного на стальную пластину с использованием DMD-метода (рис. 1). Нанесение слоя проводилось в научно-исследовательской лаборатории механики, лазерных процессов и цифровых производственных технологий на базе Южно-Уральского государственного университета с применением комплекса лазерной наплавки FL-Clad-R-4 [19]. В качестве подложки выступает пластина из материала Сталь 45.



Рис. 1. Образец наплавленного материала

Fig. 1. A sample of deposited material

Режимы наплавки: мощность лазера – 1600 Вт, скорость сканирования лазера – 10 мм/с, расход порошка – 10,5 г/мин, шаг сканирования – 1,4 мм.

Химический состав порошка и размер основной фракции представлены в табл. 1.

Микроструктурное исследование наплавленного слоя проводилось на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 7001-F с анализатором

для проведения рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа X-Max-80 Oxford Instruments. Измерение микротвердости по глубине наплавленного слоя осуществлялось с использованием микротвердомера марки HV 1000 в трех местах.

Эксперимент по механической обработке проводился на фрезерном станке с ЧПУ модели ГФ2171С5. Для фрезерования образца использовались концевые фрезы диаметром 8 мм из материала Р6М5. Для сравнения выходных параметров процесса резания были использованы фрезы с задними углами в 13° и 19° в торцевом сечении. Конструктивно в большинстве случаев концевые фрезы выполняют с задними углами резания, величина которых варьируется от 13° до 19°. Для проведения экспериментального исследования были выбраны граничные значения углов. Руководствуясь нормативным справочником [20] для обработки нержавеющей стали, были выбраны соответствующие технологические параметры процесса фрезерования для проведения экспериментального исследования. Технологические параметры проводимого эксперимента, включая характеристики режущего инструмента, представлены в табл. 2.

Для измерения силы резания использовался динамометр Kistler 9257В, на который была установлена пластина с наплавленным материалом, закрепленная винтами. Обработка экспериментальных данных проводилась в специальном программном обеспечении DynoWare. Шероховатость обработанной поверхности измерялась при помощи профилометра контактного степени точности 1 по ГОСТ 19300–86 модели 130. Для разработки математических моделей взаимосвязи шероховатости обработанной поверхности и силы резания с подачей на зуб применялся однофакторный регрессионный анализ.

Таблица 1

Table 1

#### Химический состав и размер основной фракции исходного порошка /

#### Chemical composition and the size of the powder main fraction

Химический элемент / Chemical element				Размер основной фракции, мкм / The powder main fraction size, $\mu\text{m}$
Fe	Co	Cr	Mo	
Концентрация, ат. % / Concentration, at. %				
68	15	15	2	40...120



Технологические параметры /  
Technological parameters

Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб / Feed per tooth $S_z$ , mm/tooth	Скорость вращения шпин- деля $n$ , об/мин / Spindle speed $n$ , rpm	Глубина резания $t$ , мм / Cutting depth $t$ , mm	Диаметр инструмента $D$ , мм / Cutting tool diameter $D$ , mm	Материал режущего инструмента / Cutting tool material
0,01	1000	0.5	8	P6M5 / HSS M2
0,02				
0,03				
0,04				

## Результаты и их обсуждение

### Свойства наплавленного слоя

При помощи растрового электронного микроскопа JEOL JSM 7001-F с анализатором для проведения рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа X-Max-80 Oxford Instruments была определена толщина наплавленного слоя (рис. 2).

Толщина наплавленного слоя варьируется в пределах от 1,36 до 1,51 мм. При этом наблюдается однородная структура с незначительными неметаллическими включениями в зоне подложки.

Однородность наплавленного слоя подтверждается изменением микротвердости по глубине. Результаты измерения микротвердости представлены на рис. 3.

### Составляющая силы резания

Экспериментальные значения силы резания регистрировались с частотой сигнала 0,1 с. После конвертации полученных данных в DynoWare массив численных значений силы резания обрабатывался в MS Excel. При помощи встроенных функций были построены графики составляющей силы резания  $F_{yz}$ .

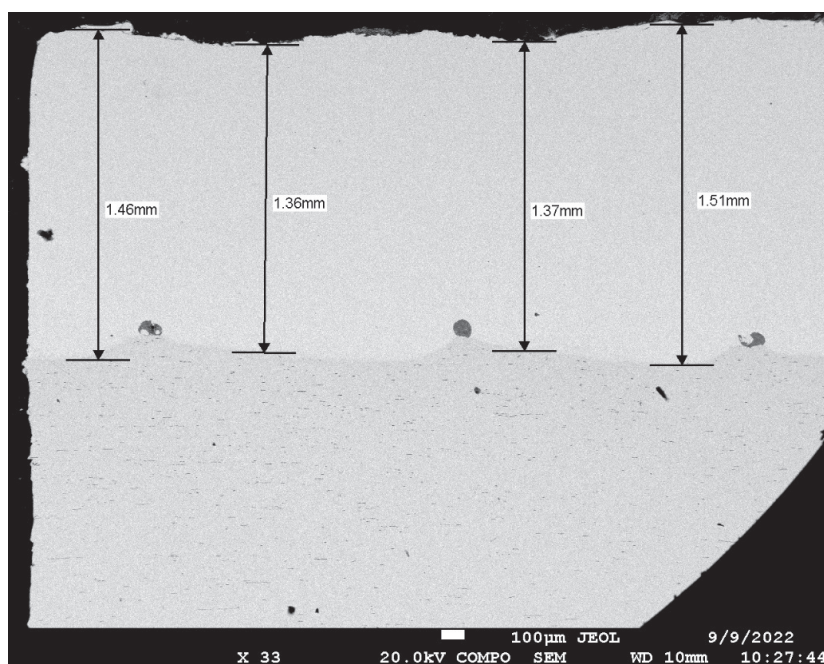


Рис. 2. Толщина наплавленного слоя

Fig. 2. Thickness of the deposited layer

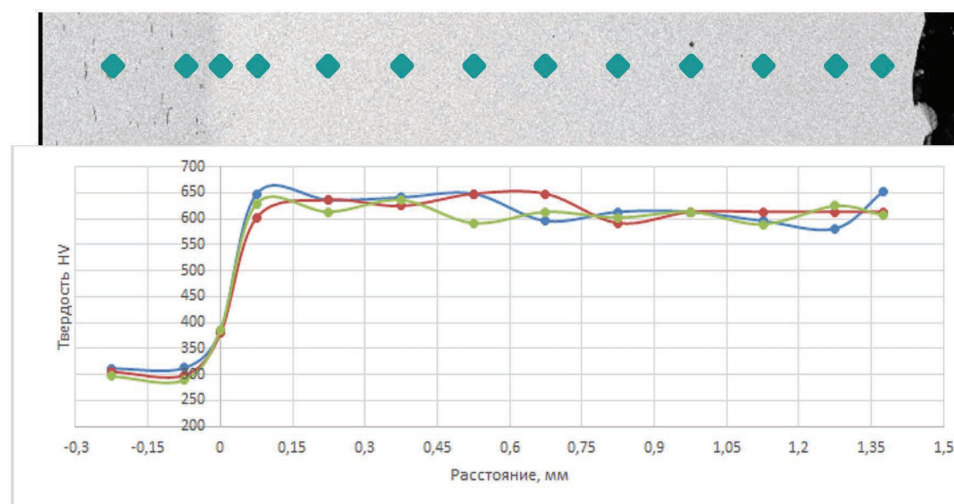


Рис. 3. Микротвердость наплавленного слоя

Fig. 3. Microhardness of the deposited layer

На рис. 4–7 представлены графики изменения составляющей силы резания  $F_{yz}$ , используемой при расчете фрезы на изгиб, для подачи на зуб  $0,01 \dots 0,04$  мм/зуб соответственно. Составляющая  $F_{yz}$  была получена путем расчета по составляющим  $F_y$  и  $F_z$ .

Фрезерование проводилось перпендикулярно направлению сканирования лазера с целью определения максимальных значений силы резания, возникающих при ударах, т. е. для исследования были выбраны самые неблагоприятные условия. Вследствие этого на графиках наблюдаются пики и впадины в значениях силы резания.

Пиковые значения силы резания приходятся на середину наплавленного валика, а впадины соответствуют положению между наплавленными валиками. Во избежание разности в показаниях силы резания и придания ей однородного характера изменения механическую обработку необходимо вести в направлении сканирования. Из графиков также можно заметить, что увеличение подачи на зуб приводит к увеличению силы резания. Аналогичные результаты получены в исследовании [21].

Для установления функциональной зависимости составляющей силы резания и подачи на зуб

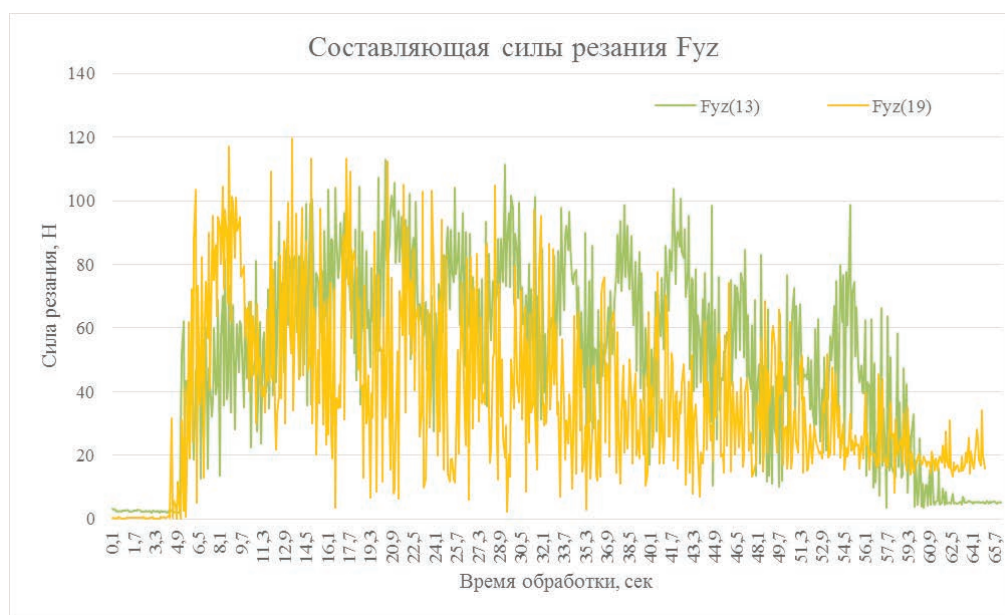


Рис. 4. Графики составляющей силы резания ( $S_z = 0,01$  мм/зуб)

Fig. 4. Graphs of the cutting force component ( $S_z = 0,01$  mm/tooth)

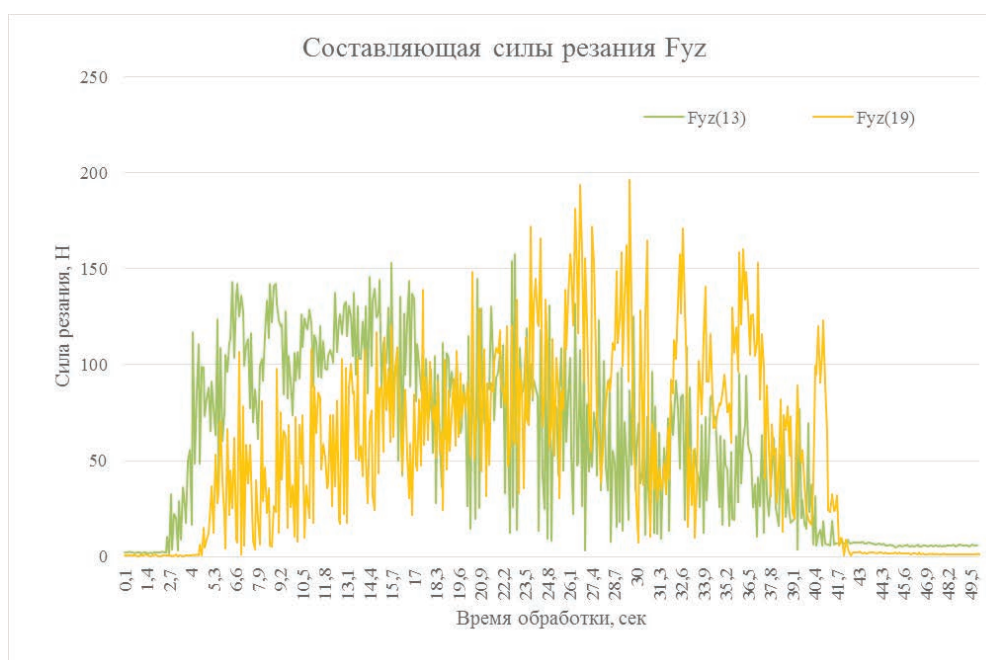


Рис. 5. Графики составляющей силы резания ( $S_z = 0,02$  мм/зуб)

Fig. 5. Graphs of the cutting force component ( $S_z = 0,02$  mm/tooth)

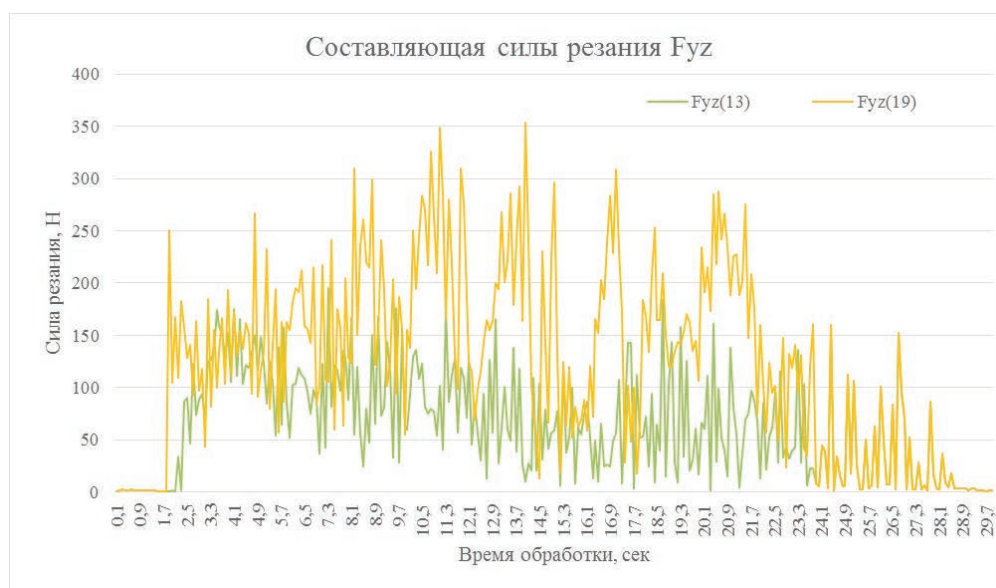


Рис. 6. Графики составляющей силы резания ( $S_z = 0,03$  мм/зуб)

Fig. 6. Graphs of the cutting force component ( $S_z = 0,03$  mm/tooth)

был проведен регрессионный анализ. Для этого были выбраны пять максимальных значений для каждой подачи. Значения составляющей силы резания представлены в табл. 3.

По результатам проведения регрессионного анализа были получены графические зависимости и степенные функциональные зависимости составляющей силы резания  $F_{yz}$

от подачи на зуб  $S_z$  для инструмента с задним углом резания  $13^\circ$  и  $19^\circ$  соответственно (рис. 8):

$$F_{yz} = 2037,49 S_z^{0,65}, \quad (1)$$

$$F_{yz} = 9820,20 S_z^{0,98}. \quad (2)$$

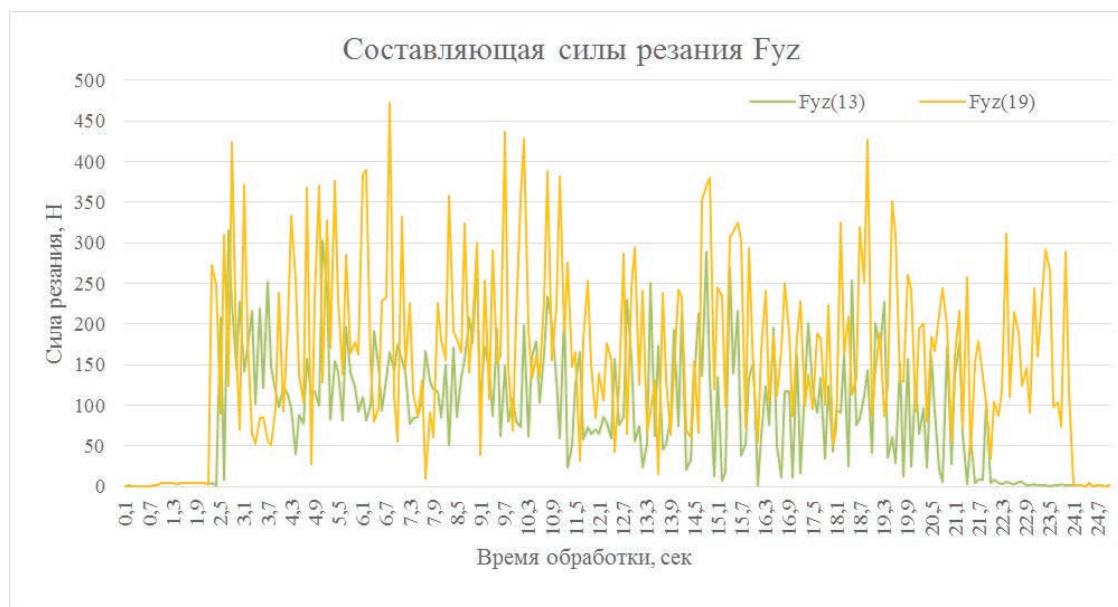


Рис. 7. Графики составляющей силы резания ( $S_z = 0,04$  мм/зуб)

Fig. 7. Graphs of the cutting force component ( $S_z = 0,04$  mm/tooth)

Таблица 3

Table 3

**Максимальные значения составляющей силы резания /  
Maximum values of the cutting force component**

Инструмент с задним углом резания 13° / Cutting tool with a 13° clearance angle					
Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб / Feed per tooth $S_z$ , mm/tooth	Составляющая силы резания $F_{yz}$ , Н / Cutting force component $F_{yz}$ , N				
	Номер точки / Point number				
	1	2	3	4	5
0,01	113,06	111,27	104,05	107,25	104,55
0,02	153	144,75	154,15	157,56	145,94
0,03	194,89	176,16	174,54	184,99	174,6
0,04	315,98	302,59	269,06	289,36	270,28
Инструмент с задним углом резания 19° / Cutting tool with a 19° clearance angle					
Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб / Feed per tooth $S_z$ , mm/tooth	Составляющая силы резания $F_{yz}$ , Н / Cutting force component $F_{yz}$ , N				
	Номер точки / Point No.				
	1	2	3	4	5
0,01	117,13	119,47	112,35	113,37	113,29
0,02	193,84	196,16	181,03	172,08	172,18
0,03	325,85	348,92	353,08	309,75	309,92
0,04	423,67	471,75	437,13	428,62	427,28



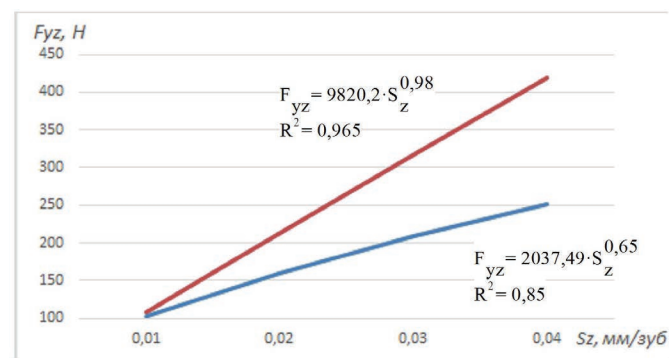


Рис. 8. Зависимости составляющей силы резания  $F_{yz}$  от подачи на зуб  $S_z$

Fig. 8. Dependences of the cutting force component  $F_{yz}$  on the feed per tooth  $S_z$

### Шероховатость обработанной поверхности

Замеры шероховатости фрезерованной поверхности производились пятикратно для каждой из подач. Результаты измерения шероховатости обработанной поверхности представлены в табл. 4. Из полученных данных видно, что уве-

личение подачи на зуб приводит к росту шероховатости. При этом шероховатость обработанной поверхности для инструмента с большим задним углом резания при малых подачах выше.

Для установления взаимосвязи шероховатости обработанной поверхности с подачей на зуб был применен также регрессионный анализ, который позволил получить графические зависимости (рис. 9) и степенные функциональные зависимости шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  от подачи на зуб  $S_z$  для инструмента с задним углом резания  $13^\circ$  и  $19^\circ$  соответственно:

$$Ra = 93,94 S_z^{1,019}; \quad (3)$$

$$Ra = 41,85 S_z^{0,75}. \quad (4)$$

Использование полученных зависимостей позволит прогнозировать выходные параметры процесса механической обработки при варьировании подачей на зуб.

Таблица 4

Table 4

### Шероховатость обработанной поверхности

#### Roughness of the machined surface

Инструмент с задним углом резания $13^\circ$ / Cutting tool with a $13^\circ$ clearance angle					
Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб / Feed per tooth $S_z$ , mm/tooth	Шероховатость обработанной поверхности $Ra$ , мкм / Roughness of the machined surface $Ra$ , $\mu\text{m}$				
	Номер точки / Point number				
	1	2	3	4	5
0,01	0,91	0,92	0,89	0,98	0,89
0,02	1,58	1,44	1,76	1,53	1,79
0,03	2,42	2,35	2,42	2,23	2,32
0,04	4,01	3,98	4,11	4,13	3,94
Инструмент с задним углом резания $19^\circ$ / Cutting tool with a $19^\circ$ clearance angle					
Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб / Feed per tooth $S_z$ , mm/tooth	Шероховатость обработанной поверхности $Ra$ , мкм / Roughness of the machined surface $Ra$ , $\mu\text{m}$				
	Номер точки / Point No.				
	1	2	3	4	5
0,01	1,44	1,43	1,45	1,46	1,40
0,02	1,75	1,78	1,74	1,80	1,74
0,03	3,11	3,33	3,12	3,14	3,21
0,04	3,93	4,11	3,85	3,95	3,81



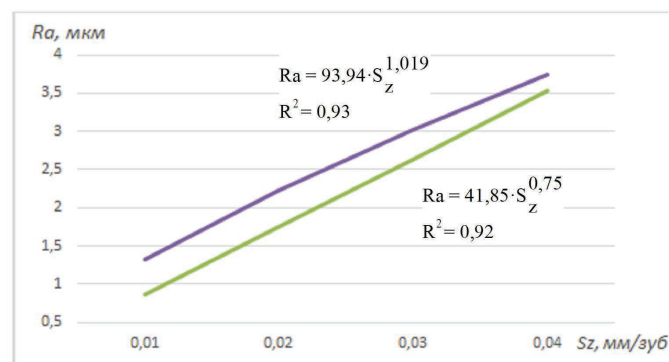


Рис. 9. Зависимости шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от подачи на зуб  $S_z$

Fig. 9. Dependences of the machined surface roughness  $R_a$  on the feed per tooth  $S_z$

## Выводы

1. Полученные математические модели (1) и (2) взаимосвязи силы резания и шероховатости обработанной поверхности (3) и (4) с подачей на зуб имеют вид степенной зависимости. Использование разработанных моделей позволит прогнозировать шероховатость обработанной поверхности и силу резания, возникающую при фрезеровании материала, полученного DMD-методами, при данных технологических условиях.

2. Измеренные силы резания позволили установить, что при фрезеровании с задним углом в  $13^\circ$  и  $19^\circ$  при изменении подачи от 0,01 до 0,04 мм/зуб максимальные значения силы резания изменяются в пределах 113,16...315,98 Н и 119,47...471,75 Н соответственно; шероховатость обработанной поверхности при этом изменяется в пределах 0,89...4,13 мкм и 1,4...4,11 мкм для первого и второго инструмента соответственно.

3. На малых подачах заметно различие в значениях шероховатости обработанной поверхности, следовательно, можно предположить, что фрезы с меньшим задним углом следует применять на чистовой стадии обработки.

4. В дальнейшем планируется исследование с варьированием различных факторов процесса резания. Режимная база, сформированная в результате проведенных и будущих исследований, позволит рационально назначать режимы резания при механической обработке наплавленных материалов, что повысит эффективность проектирования технологических операций. При проектировании механических операций учиты-

ваются такие основные критерии качества обработки, как точность, на которую оказывает влияние сила резания и шероховатость. Вследствие этого необходимо нарабатывать теоретическую базу по обрабатываемости DMD-материалов.

## Список литературы

1. Шатунский А.А., Шаповалова М.А. Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения // Научные технологии в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 24–29.
2. Zekovic S., Kovacevic R. Modeling of laser-based direct metal deposition // Tribology in Industry. – 2006. – Vol. 28. – P. 9–14.
3. Imran M.K., Masood S.H., Brandt M. Direct metal deposition of H13 tool steel on copper alloy substrate: parametric investigation // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. – 2015. – Vol. 2, iss. 4. – P. 242–260. – DOI: 10.1007/s40516-015-0018-z.
4. Wang X., Jiang J., Tian Y. A review on macroscopic and microstructural features of metallic coating created by pulsed laser material deposition // Micromachines. – 2022. – Vol. 13, iss. 5. – DOI: 10.3390/mi13050659.
5. Долговечный А.В., Демидова Л.А., Ханов А.М. Процесс структурообразования в покрытиях при лазерной наплавке // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2014. – № 1. – С. 49–55. – DOI: 10.17073/1997-308X-2014-1-49-55.
6. Еремينا М.А., Ломаева С.Ф., Харанжеский Е.В. Структура и износостойкость покрытий, полученных высокоскоростной лазерной наплавкой механокомпозитов на основе карбогидрида титана // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2021. – № 4. – С. 46–56. – DOI: 10.17073/1997-308X-2021-4-46-56.
7. Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V / G. Bonaiti, P. Parenti, M. Annoni, S. Kapoor // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 10. – P. 497–509. – DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.104.
8. Hybrid manufacturing: influence of material properties during micro milling of different additively manufactured AISI 316L / S. Greco, M. Schmidt, K. Klauer, B. Kirsch, J.C. Aurich // Production Engineering. – 2022. – DOI: 10.1007/s11740-022-01139-6.
9. Dilberoglu U.M., Gharehpapagh B., Yaman U. Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 113. – P. 623–648. – DOI: 10.1007/s00170-021-06688-1.
10. Kim E.J., Lee C.M., Kim D.H. The effect of post-processing operations on mechanical characteristics of 304L stainless steel fabricated using laser additive

manufacturing // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 1370–1381. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.08.142.

11. Szykiedans K., Credo W. Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 136. – P. 257–262. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.207.

12. Cutting force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V / A. Polishetty, M. Shunmugavel, M. Goldberg, G. Littlefair, R.K. Singh // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 7. – P. 284–289. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.071.

13. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity / O. Oyelola, P. Crawforth, R. M'Saoubi, A.T. Clare // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 45. – P. 119–122. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.066.

14. Manna A., Bhattacharayya B. A study on machinability of Al/SiC-MMC // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – P. 711–716. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00905-1.

15. Influence of cutting conditions on the surface roughness of titanium-alloy parts produced by additive and traditional methods / K.R. Muratov, E.A. Gashev, T.R. Ablyaz, A.A. Panteleev // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, iss. 5. – P. 434–436. – DOI: 10.3103/S1068798X21050129.

16. A comparative study of dry and cryogenic milling for Directed Energy Deposited IN718 components: effect on process and part quality / T. Souflas, H. Bikas, M. Ghassempouri, A. Salmi, E. Atzeni, A. Saboori, I. Bruggnetti, A. Valente, F. Mazzucato, P. Stavropoulos // The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology. – 2022. – Vol. 119. – P. 745–758. – DOI: 10.1007/s00170-021-08313-7.

17. An experimental investigations on effects of cooling/lubrication conditions in micro milling of additively manufactured Inconel 718 / M. Danish, K. Aslantas, A. Hascelik, S. Rubaiee, M.K. Gupta, M.B. Yildirim, A. Ahmed, A. Mahfous // Tribology International. – 2022. – Vol. 173. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107620.

18. Experimental studies on fabricating functionally gradient material of stainless steel 316L-Inconel 718 through hybrid manufacturing: directed energy deposition and machining / R. Zhang, K.M. Nagaraja, N. Bian, E. Fisher, S. Ahmadyar, K. Bayazitoglu, H. Lu, W. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 120. – P. 7815–7826. – DOI: 10.1007/s00170-022-09304-y.

19. Study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods / M. Samodurova, I. Logachev, N. Shaburova, O. Samoilova, L. Radionova, R. Zakirov, K. Pashkeev, V. Myasoedov, E. Trofimov // Materials. – 2019. – Vol. 12. – DOI: 10.3390/ma12193269.

20. Режимы резания металлов: справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: НИИТавтопром, 1995. – 456 с.

21. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition / P. Guo, B. Zou, C. Huang, H. Gao // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 240. – P. 12–22. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.005.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## A study of the relationship between cutting force and machined surface roughness with the feed per tooth when milling EuTroLoy 16604 material produced by the DMD method

Alexander Dyuryagin<sup>a, \*</sup>, Dmitrii Ardashev<sup>b</sup>

South Ural State University, 76 Prospekt Lenina, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6274-1953>, [s.dyuryagin@mail.ru](mailto:s.dyuryagin@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, [ardashevdy@susu.ru](mailto:ardashevdy@susu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 30 August 2022

Revised: 06 September 2022

Accepted: 21 September 2022

Available online: 15 December 2022

#### Keywords:

End milling

Cutting force

Roughness of the machined surface

Direct Metal Deposition

EuTroLoy 16604

#### Funding

This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

### ABSTRACT

**Introduction.** Currently, a substantial proportion of the machine-building industry is made up of one-off products or products manufactured in small batches. In this regard, innovative approaches to obtaining such products are being actively applied in order to reduce the cost of special, expensive tooling of the blanking process. Such technologies include the *Direct Metal Deposition (DMD)* method, the essence of which is the deposition of metal particles from a gas-powder stream. This method has a lot of advantages, but one of the main drawbacks is that the products after growing have a rough surface and do not meet the accuracy requirements of the finished part drawing. Consequently, the parts require further machining by cutting. However, due to the novelty of the materials, there are no regime parameters for machining. In this regard, the aim of the work is to establish the functional relationship between the cutting force and roughness of the machined surface with the feed per tooth during end milling of *EuTroLoy 16604* material formed by *DMD*-method. In this paper an experimental study of cutting force and roughness of machined surface with varying the tooth feed during end milling is carried out. **The research method** is an experiment on milling of *EuTroLoy 16604* material obtained by *DMD*-method with measuring the output parameters of the process (cutting force and roughness of the machined surface). **Results and discussion.** The measured values of cutting force and roughness of the machined surface allowed establishing functional and graphical dependences of the output parameters of the milling process on the feed per tooth. It is found that using a cutter with a smaller clearance angle results in lower cutting forces and the surface has a lower height of microroughness. Thus, the developed functional relationships of cutting force and roughness of the machined surface with the feed per tooth allow predicting the output parameters of the cutting process and increasing the efficiency of machining operations by cutting. A promising direction for further work is seen in the study of relative machinability and evaluation of its quantitative value.

**For citation:** Dyuryagin A.A., Ardashev D.V. A study of the relationship between cutting force and machined surface roughness with the feed per tooth when milling EuTroLoy 16604 material produced by the DMD method. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-6-17. (In Russian).

### References

1. Shatul'sky A.A., Shapovalova M.A. Primenenie metodov prototipirovaniya dlya izgotovleniya izdelii mashinostroeniya [Application of prototyping methods for making blanks]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii* = *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2011, no. 1, pp. 24–29.
2. Zekovic S., Kovacevic R. Modeling of laser-based direct metal deposition. *Tribology in Industry*, 2006, vol. 28, pp. 9–14.
3. Imran M.K., Masood S.H., Brandt M. Direct metal deposition of H13 tool steel on copper alloy substrate: parametric investigation. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2015, vol. 2, iss. 4, pp. 242–260. DOI: 10.1007/s40516-015-0018-z.
4. Wang X., Jiang J., Tian Y. A review on macroscopic and microstructural features of metallic coating created by pulsed laser material deposition. *Micromachines*, 2022, vol. 13, iss. 5. DOI: 10.3390/mi13050659.

#### \* Corresponding author

Dyuryagin Alexander A., Post-graduate student  
 South Ural State University,  
 76 Prospekt Lenina,  
 454080, Chelyabinsk, Russian Federation  
 Tel.: 8 (351) 272-32-94, e-mail: [s.dyuryagin@mail.ru](mailto:s.dyuryagin@mail.ru)

5. Dolgovechny A.V., Demidova L.A., Khanov A.M. Protsess strukturoobrazovaniya v pokrytiyakh pri lazernoi naplavke [Structure formation process in coatings during overlaying laser welding]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2014, vol. 1, pp. 49–55. DOI: 10.17073/1997-308X-2014-1-49-55.
6. Eryomina M.A., Lomayeva S.F., Kharanzhevskiy E.V. Struktura i iznosostoikost' pokrytii, poluchennykh vysokoskorostnoi lazernoi naplavkoi mekhanokompozitov na osnove karbogidrida titana [Structure and wear resistance of coatings produced by the short-pulse laser alloying of titanium carbide-based mechanocomposites]. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2021, vol. 4, pp. 46–56. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-4-46-56.
7. Bonaiti G., Parenti P., Annoni M., Kapoor S. Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 497–509. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.104.
8. Greco S., Schmidt M., Klauer K., Kirsch B., Aurich J.C. Hybrid manufacturing: influence of material properties during micro milling of different additively manufactured AISI 316L. *Production Engineering*, 2022. DOI: 10.1007/s11740-022-01139-6.
9. Dilberoglu U.M., Gharehpapagh B., Yaman U. Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 113, pp. 623–648. DOI: 10.1007/s00170-021-06688-1.
10. Kim E.J., Lee C.M., Kim D.H. The effect of post-processing operations on mechanical characteristics of 304L stainless steel fabricated using laser additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 1370–1381. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.08.142.
11. Szykiedans K., Credo W. Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 136, pp. 257–262. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.207.
12. Polishetty A., Shunmugavel M., Goldberg M., Littlefair G., Singh R.K. Cutting force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 7, pp. 284–289. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.071.
13. Oyelola O., Crawforth P., M'Saoubi R., Clare A.T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 45, pp. 119–122. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.066.
14. Manna A., Bhattacharayya B. A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 140, pp. 711–716. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00905-1.
15. Muratov K.R., Gashev E.A., Ablyaz T.R., Panteleev A.A. Influence of cutting conditions on the surface roughness of titanium-alloy parts produced by additive and traditional methods. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, iss. 5, pp. 434–436. DOI: 10.3103/S1068798X21050129.
16. Souflas T., Bikas H., Ghassempouri M., Salmi A., Atzeni E., Saboori A., Brugnetti I., Valente A., Mazzucato F., Stavropoulos P. A comparative study of dry and cryogenic milling for Directed Energy Deposited IN718 components: effect on process and part quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 119, pp. 745–758. DOI: 10.1007/s00170-021-08313-7.
17. Danish M., Aslantas K., Hascelik A., Rubaiee S., Gupta M.K., Yildirim M.B., Ahmed A., Mahfous A. An experimental investigations on effects of cooling/lubrication conditions in micro milling of additively manufactured Inconel 718. *Tribology International*, 2022, vol. 173. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107620.
18. Zhang R., Nagaraja K.M., Bian N., Fisher E., Ahmadyar S., Bayazitoglu K., Lu H., Li Wei. Experimental studies on fabricating functionally gradient material of stainless steel 316L-Inconel 718 through hybrid manufacturing: directed energy deposition and machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 120, pp. 7815–7826. DOI: 10.1007/s00170-022-09304-y.
19. Samodurova M., Logachev I., Shaburova N., Samoilova O., Radionova L., Zakirov R., Pashkeev K., Myasodov V., Trofimov E. Study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods. *Materials*, 2019, vol. 12. DOI: 10.3390/ma12193269.
20. Baranovskii Yu.V., Brakhman L.A., Gdalevich A.I., et.al. *Rezhimy rezaniya metallov* [Metal cutting conditions]. Moscow, NIITavtoprom Publ., 1995. 456 p.
21. Guo P., Zou B., Huang C., Gao H. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 240, pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.005.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/>).