



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB₂, полученного лазерным спеканием

Алексей Арляпов^{1, а, *}, Сергей Волков^{1, б}, Владимир Промахов^{2, в}, Александр Жуков^{2, д}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-5117-4663>,  arlyapov@tpu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0001-9984-9466>,  vsu@pkmion.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0002-4385-3404>,  vvpromakhov@mail.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0002-9814-4365>,  zhuk_77@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.22

История статьи:

Поступила: 10 апреля 2020

Рецензирование: 15 апреля 2020

Принята к печати: 19 декабря 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Фрезерование
 Режимы резания
 Стойкость инструмента
 Силы резания
 Композит
 Диборит титана
 Лазерное спекание

Финансирование:

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ № 20-79-10086.

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследована технологическая возможность фрезерования металломатричного композита на основе Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB₂, полученного лазерным спеканием. Композит предназначен для изготовления турбинных лопаток и имеет прочностные характеристики, близкие к Inconel 625, однако за счет добавления TiB₂ обладает большими жаропрочностью и износостойкостью. Данный материал является новым, его обрабатываемость резанием не изучена. **Цель работы.** Определить технологические возможности фрезерования концевыми фрезами данного композита. Для достижения поставленной цели выполнено фрезерование нового композита концевыми фрезами, получены рекомендации по выбору скорости резания, глубины и ширины фрезерования. **Методы исследования.** Измерение износа концевых фрез и силы резания. Износ оценивался по фаске на задней поверхности с помощью микроскопа, силы резания измерялись динамометром Kistler 9257В. Фрезерование выполнялось на трех скоростях: 25, 35 и 50 м/мин. Для определения оптимальных параметров глубины и ширины фрезерования использовались следующие их соотношения: 1 : 1, 1 : 4; 1 : 16, при этом объем стружки, удаляемый в единицу времени, для всех соотношений оставался постоянным. **Результаты и обсуждение.** Интенсивнее изнашивается задняя поверхность зубьев фрезы. После достижения фаски износа по задней поверхности величины, равной 0,11...0,15 мм, возникает резкое увеличение сил и хрупкое разрушение зуба. Фрезерование со скоростью 25 м/мин гарантировало 28 мин стабильной работы, после чего величина износа быстро приближалась к критической величине, равной 0,11 мм, при скорости резания 50 м/мин критический износ наступал уже через 14 мин. Зависимости силы резания от времени для всех выбранных скоростей резания на всем протяжении времени испытаний имеют нарастающий характер, что свидетельствует о влиянии износа фрез на силы резания. Установлено, что стойкость фрез растет с ростом ширины и уменьшением глубины фрезерования.

Для цитирования: Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB₂, полученного лазерным спеканием / А.Ю. Арляпов, С.Ю. Волков, В.В. Промахов, А.С. Жуков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 21–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32.

Введение

В настоящее время все большее распространение имеют сплавы металлов и композиты, полученные с помощью аддитивных технологий. Такие материалы могут обладать более высокими параметрами прочности, твердости, износостойкости в сравнении с материалами, полученными классическим сплавлением. На данный момент около 29 металлов и сплавов производятся в виде порошков, включая нержавеющие и инструментальные стали, алюминиевые сплавы, а также жаропрочные стали [1]. Создание порошковых материалов позволяет получать новые свойства сплавов за счет изменения структуры материала определенным образом.

В настоящей статье рассмотрен композит на основе Inconel 625 с добавлением в его матрицу керамических частиц NiTi-TiB₂, полученный лазерным спеканием [2]. Данный композит полу-

*Адрес для переписки

Арляпов Алексей Юрьевич, к.т.н., доцент
 Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет,
 пр. Ленина, 30
 634050, г. Томск, Россия
 Тел.: +7-906-947-5044, e-mail: arlyapov@tpu.ru

чен в лаборатории высокоэнергетических систем и новых технологий Томского государственного университета для изготовления турбинных лопаток [1]. Лопатки и лопасти газовых турбин работают при высоких температурах и нагрузках. Сплавы, используемые для изготовления деталей турбодвигателей, должны обладать высокой прочностью, высокой ударной вязкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью [3]. В России для изготовления турбинных лопаток используются сплавы на основе никеля, например такие марки, как ХН35ВТЮ, ХН55ВМТКЮ, ХН62МВКЮЛ, ХН67МВТЮЛ, ХН70МВТЮБ, ХН75ВМЮ, ХН80ТБЮ, ЖС6УД [4]. Характеристики этих сплавов на сегодняшний день не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям. В то же время изделия или заготовки, полученные с помощью аддитивных технологий, могут иметь более высокий предел прочности на растяжение, предел текучести и низкие значения относительного удлинения по сравнению с образцами, полученными литьем и прокатом [5]. Недостатком композитов, полученных путем аддитивных технологий, является неравномерное распределение добавляемых частиц внутри металлической матрицы, что существенно снижает их физико-механические характеристики. Метод получения композита, предложенный авторами [1], сводит указанный недостаток к минимуму. Для данного исследования были взяты образцы в виде брусков, химический состав и некоторые физико-механические свойства которых представлены в таблице.

Полученный в исследовании [1] композит обладает повышенной износостойкостью и термостойкостью. Так как материал является новым, его обрабатываемость резанием пока еще не изучена. В настоящей работе приведено исследование обрабатываемости данного композита фрезерованием.

Под термином обрабатываемость понимают свойство металлов подвергаться обработке резанием. Согласно [6] основными показателями для оценки обрабатываемости служат такие параметры, как силы резания, качество поверхностного слоя, износ инструмента, теплота, выделяющаяся при деформации материала срезаемого слоя, наличие или отсутствие склонности к наростообразованию, а также вид, форма и размеры срезанной стружки. В зависимости от этих

характеристик все материалы подразделяют на 8 групп [4].

Учитывая химический состав изучаемого материала, по рекомендациям из справочника [4] композит Inconel 625 с NiTi-TiB₂ следует отнести к V–VI группе обрабатываемости. К этим группам относятся жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие стали, сплавы на никелевой и железоникелевой основе. Указанные группы обладают очень низкой обрабатываемостью с коэффициентом от 0,16...0,08 в сравнении со сталью 45, для которой этот коэффициент равен единице. Низкая обрабатываемость связана с высоким пределом прочности и твердостью, которые оказывают значительное влияние на силы резания в процессе обработки. Силы резания при обработке спеченных сплавов могут быть больше, чем силы, возникающие при резании аналогичных сплавов, полученных классическими методами [7], что, скорее всего, вызвано более высокими прочностными характеристиками полученного лазерным спеканием сплава.

Другой особенностью изучаемого композита является то, что в его состав входит диборид титана TiB₂, обладающий высокой твердостью и негативно влияющий на стойкость режущего инструмента. Рекомендации по выбору режимов резания для металломатричных композитов, полученных аддитивными методами из порошков с добавлением керамики, отсутствуют.

Из-за низкого коэффициента теплопроводности таких сплавов, тепло, производимое в процессе обработки, больше передается в инструмент, чем в обрабатываемую деталь, вызывая чрезмерный нагрев режущей кромки и, как следствие, износ инструмента [3].

В процессе фрезерования труднообрабатываемых материалов скорость обработки и величина подачи оказывают наибольшее влияние на срок службы инструмента, шероховатость поверхности и силы резания [8]. Согласно справочнику [9] при обработке жаропрочных никелевых сплавов фрезерованием рекомендуется использовать инструмент из твердого сплава, производить обработку на малых скоростях резания около 15...20 м/мин с подачей 0,02 мм/зуб. Однако в литературе [10, 11] при фрезеровании жаропрочных сплавов рекомендуют более агрессивные режимы резания твердосплавным инструментом

Физико-механические свойства композита Inconel 625 с NiTi-TiB₂
Physical and mechanical properties of the Inconel 625 and NiTi-TiB₂ composite

Физико-механические свойства	Значение
Плотность, г/см ³	8,3
Предел прочности при сжатии, МПа	1830
Предел прочности при растяжении, МПа	860
Предел прочности при изгибе, МПа	1320
Предел текучести при сжатии, МПа	990...1090
Предел текучести при растяжении, МПа	110...160
Модуль упругости, ГПа	290...330
Коэффициент Пуассона	0,29
Коэффициент теплопроводности, Вт/м · К	12,5...13,6
Коэффициент линейного температурного расширения, К ⁻¹	11,3...12,4 · 10 ⁻⁶
Твердость (H _v), HRC	44...46

с износостойким покрытием, а именно обработку следует производить по схеме попутного фрезерования на скорости резания от 20 до 50 м/мин при подачах 0,10...0,15 мм/зуб. Кроме того, в источнике [12] сказано, что керамические инструменты показывают большую стойкость при обработке некоторых жаропрочных сплавов (таких, как Inconel 718), но подобные инструменты являются гораздо более дорогими.

Для улучшения обрабатываемости жаропрочных материалов применяют наложение ультразвуковых колебаний на инструмент или деталь, что обеспечивает снижение сил резания, температуры и износа инструмента. В работе [13] излагается возможность обработки материалов на основе никеля на станках ULTRASONIC компании DMG MORI. Однако анализ литературы показал, что данную технологию в основном используют для обработки хрупких материалов, стекла и углепластиков [14, 15]. Вместе с тем в работе [16] говорится о положительном влиянии ультразвуковых колебаний при фрезеровании труднообрабатываемого сплава Ti-6Al-4V.

Необходимо отметить, что в литературе по выбору режимов резания легче найти информацию для выбора скоростей резания и подачи, а по выбору глубины и ширины фрезерования рекомендации почти отсутствуют. Авторами [17–21] описан метод высокоэффективного фрезерования (High Efficiency Milling, HEM). Этот метод предназначен для черновой обработки металлов с использованием малой глубины фрезерования t и большой ширины фрезерования B . Фрезерование, при котором обычно используются большое значение t и маленькая ширина B , вызывает концентрацию тепла в небольшой части режущего инструмента, ускоряющую процесс износа. Использование же всей доступной длины режущей части фрезы позволяет распределить износ по большей площади, что продлевает срок службы инструмента, а также рассеивает тепло и снижает вероятность поломки фрез. Метод HEM предполагает использование 7...30 % диаметра фрезы в радиальном направлении и удвоенного диаметра фрезы в осевом в сочетании с увеличенной скоростью подачи [17].

Таким образом, исследование обрабатываемости данного композита на основе никеля с добавлением керамики не изучено, поэтому работа является актуальной.

Основные задачи настоящей работы следующие.

1. Определение технологических возможностей обработки концевыми фрезами композита на основе Inconel 625 с добавлением в его состав NiTi-TiB₂.

2. Определение скорости резания исходя из условий минимального износа инструмента и минимальных сил резания, возникающих в процессе обработки.

3. Определение наиболее оптимального соотношения глубины и ширины фрезерования исходя из условий минимального износа инструмента и минимальных сил резания.

Методика исследований

Все работы выполнялись на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ модели VF1 фирмы «Haas» (США). Обработку производили по схеме попутного фрезерования. В качестве инструмента использовали цельнотвердосплавные концевые фрезы Ø10 мм модели ЖТ641 производства компании «ПК МИОН» (Россия), предназначенные для обработки жаропрочных титановых сплавов. Основные геометрические параметры этой фрезы имеют следующие значения: передний угол $\gamma = 4^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, угол наклона винтовой линии зуба $\omega = 38^\circ$, число зубьев $z = 4$. Исходя из рекомендаций по режимам обработки жаропрочных сплавов для фрезы ЖТ641 и анализа литературы [4, 9, 11, 22] для экспериментов была выбрана подача на зуб, равная $S_z = 0,04$ мм/зуб. Фрезы закреплялись в цанговом патроне с одинаковым вылетом, величина которого составляла $24 \pm 0,5$ мм. При этом для качественной и количественной оценки результатов экспериментов измеряли износ фрез и силы резания.

Износ инструмента оценивали по фаске износа на задней поверхности. Фаску износа измеряли на микроскопе УИМ 21 на каждом зубе фрезы. Силы резания определяли с помощью динамометра Kistler 9257В (Швейцария). Измерения проводились в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1). Для оценки ре-

зультатов использовалась суммарная сила $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$, действующая в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Динамометр, установленный на специальную плиту, закреплялся в станочных тисках. Перед началом экспериментов в заготовке были подготовлены крепежные отверстия, через которые с помощью четырех винтов заготовка закреплялась на динамометре (рис. 1).

Для решения задачи по выбору скорости резания выполняли обработку на трех скоростях резания: $V_1 = 25$ м/мин; $V_2 = 35$ м/мин и $V_3 = 50$ м/мин. При этом подача на зуб, глубина и ширина фрезерования оставались постоянными: $S_z = 0,04$; $B = 4$; $t = 1$. Через одинаковые промежутки времени измерялся износ фрез.

Для определения оптимального соотношения глубины и ширины фрезерования, при котором стойкость фрезы будет наибольшей, было выбрано три варианта соотношения t и B ($t = B$; $t = B/4$; $t = B/16$) при условии одинакового объема срезаемого слоя в единицу времени, т. е. произведение $t_1 B_1 = t_2 B_2 = t_3 B_3$ для всех трех вариантов выбранных режимов оставалось неизменным и обеспечивающим одинаковую производительность обработки. Скорость резания равнялась 25 м/мин, скорость подачи – $S_z = 0,04$ мм/зуб. Схемы резания представлены на рис. 2.

Так, для фрезы № 1 глубина и ширина фрезерования равнялись $t = 2$ мм и $B = 2$ мм соответственно. Для фрезы № 2 глубина равнялась



Рис. 1. Заготовка на динамометре
Fig. 1. Workpiece clamped in the dynamometer

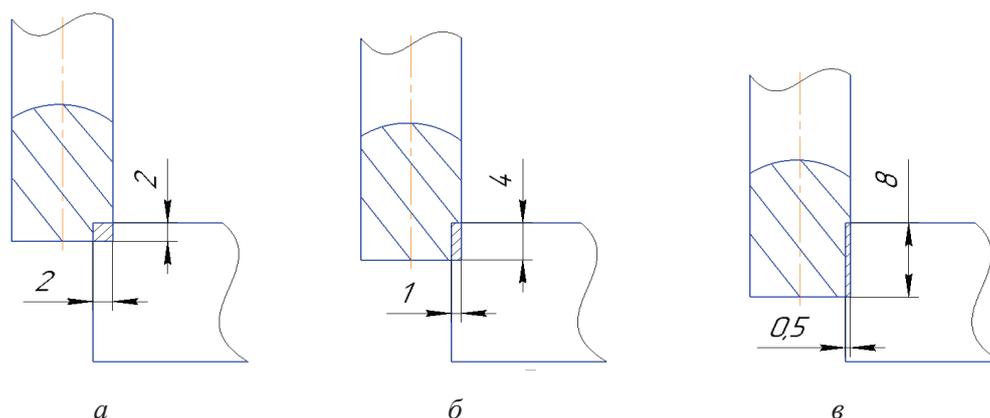


Рис. 2. Схемы фрезерования

Fig. 2. Milling technique

$t = 1$ мм, следовательно, ширина увеличивалась до $B = 4$ мм. У фрезы № 3 при $t = 0,5$ мм ширина равнялась $B = 8$ мм (рис. 2).

Для сбора и анализа данных использовалось программное обеспечение DynoWare (Kistler, Швейцария). Обработка всех полученных данных выполнялась в программе Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны зависимости величины износа по фаске на задней поверхности зуба от времени работы фрезы для скоростей резания 50, 35 и 25 м/мин (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Из графика видно, что фреза, работающая на скорости резания 25 м/мин, испытала наименьший износ на исследуемом промежутке времени. Так, на 28-й минуте работы фаска износа по задней поверхности достигла значения 0,11 мм. Фреза, работающая при скорости $V = 50$ м/мин, имеет наибольший износ, так как величина фаски становится равной 0,11 мм уже к 14 минуте.

Очевидно, что рост сил в исследуемом промежутке времени вызван износом фрез (рис. 4). Фреза, работающая на скорости $V = 50$ м/мин (кривая 1) демонстрирует наиболее интенсивный рост сил во всем исследуемом диапазоне. Для фрез, работающих на скоростях 35 и 25 м/мин, рост сил резания с течением времени также коррелирует с величиной износа, но является менее интенсивным, чем при резании со скоростью 50 м/мин.

На рис. 5 приведены зависимости износа, а на рис. 6 – зависимости сил резания от времени работы для различных соотношений глубины и ширины фрезерования. После 40 минут фрезерования наступает критическое изнашивание фрез № 1 и 2 с выкрашиванием режущей кромки. Фреза № 3, работающая при соотношении 1:16, проработала существенно дольше остальных – 117 минут и не подверглась катастрофическому износу с разрушением кромки. Резкое увеличение интенсивности износа фрезы № 3 произошло только на 92 минуте, после того как величина фаски износа превысила 0,15 мм, в то время как фрезы № 1 и 2 достигли этой величины износа на 32 и 43 минутах соответственно. Максимальное значение фаски износа фрезы № 3 после 117 минут работы составило 0,28 мм. Из графика сил (рис. 6) видно, что в интервале времени работы фрез от 0 до 40 мин для разных соотношений глубины и ширины фрезерования силы имели очень близкие значения, что вполне объяснимо одинаковым объемом срезаемого слоя в единицу времени. Однако как только износ переходит границу критической величины, которая колеблется в интервале от 0,11 до 0,15 мм, происходит моментальный рост сил. Отсюда следует, что до наступления критического износа влияние соотношения ширины и глубины фрезерования на силы резания отсутствует, и изменение сил для различных соотношений t и B (при одинаковом объеме срезаемого слоя в единицу времени, т. е. $tB = \text{constant}$, при $S = \text{constant}$) объясняется только разным износом фрез, что полностью подтверждается рис. 5 и 6.

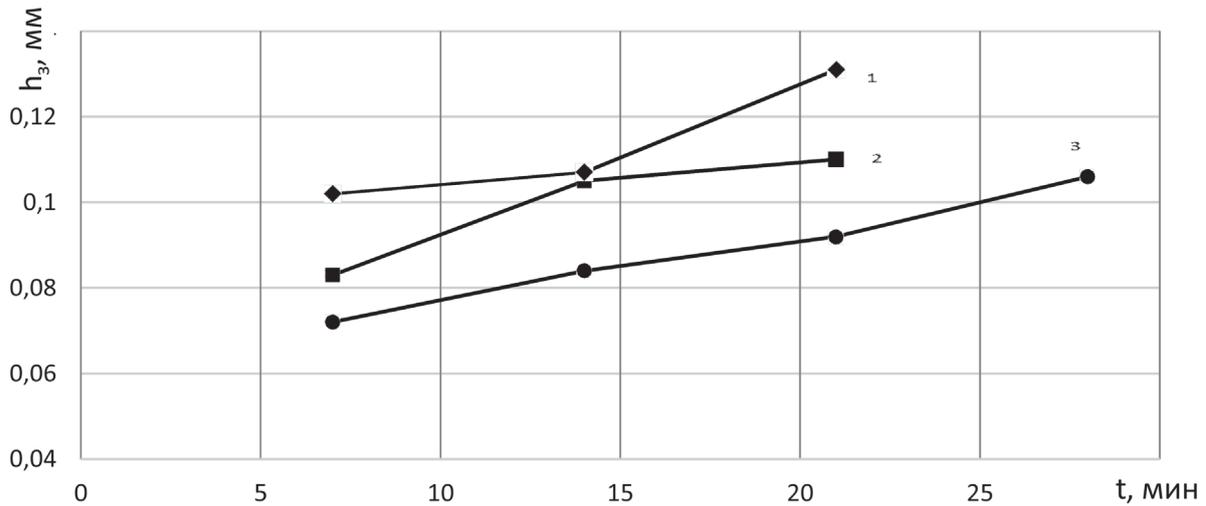


Рис. 3. График зависимости величины износа от времени работы для фрез:

1 – $V=50$ м/мин; 2 – $V=35$ м/мин; 3 – $V=25$ м/мин

Fig. 3. Dependence of flank wear on the machining time:

1 – $V=50$ m/min; 2 – $V=35$ m/min; 3 – $V=25$ m/min

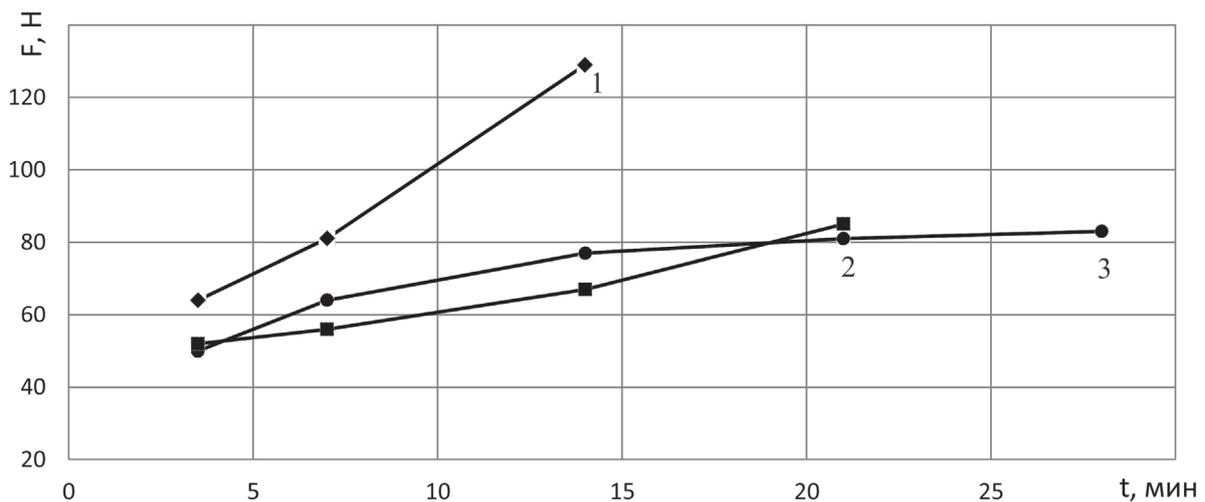


Рис. 4. График зависимости сил резания от времени обработки:

1 – $V=50$ м/мин; 2 – $V=35$ м/мин; 3 – $V=25$ м/мин

Fig. 4. Dependence of the cutting forces on the machining time:

1 – $V=50$ m/min; 2 – $V=35$ m/min; 3 – $V=25$ m/min

В ходе исследований установлено, что износ превалирует по задней поверхности зуба фрезы. Следует также отметить, что неравномерный износ в основном вызван механическим истиранием (рис. 7–9).

Из анализа графиков установленных зависимостей и фотографий износа фрез можно сделать вывод, что наиболее эффективной является схема обработки фрезой № 3 с соотношением глубины и ширины 1:16. Предполагается, что

это связано с меньшим изгибающим моментом, действующим на фрезу во время работы и с более равномерным распределением температуры резания вдоль режущей кромки.

Из графиков сил видно, что для разных соотношений t и V при одинаковом объеме срезаемого слоя величины сил резания до наступления критического износа примерно одинаковы, но если распределенную нагрузку вдоль режущей кромки заменить сосредоточенной силой, точка

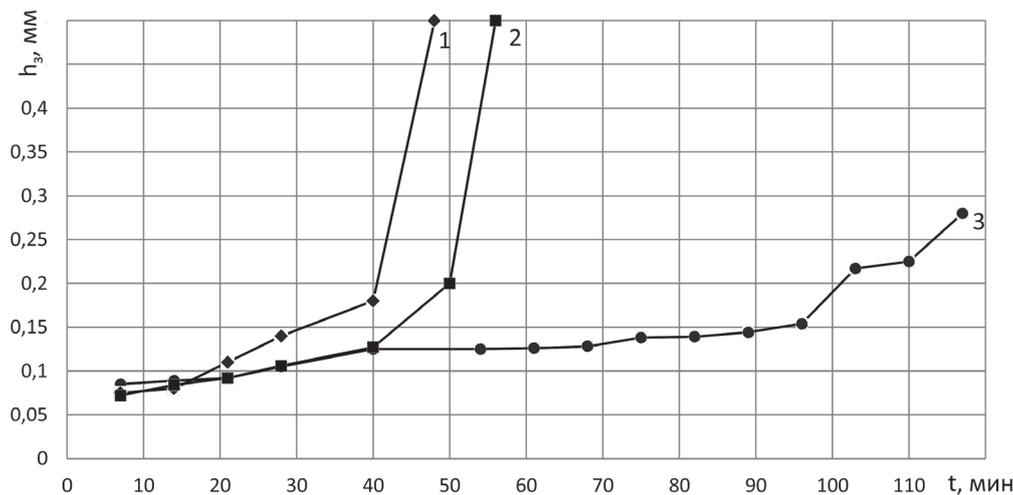


Рис. 5. График зависимости величины износа от схемы работы:

1 – фреза № 1; 2 – фреза № 2; 3 – фреза № 3

Fig. 5. Dependence of flank wear on the milling configuration:

1 – mill No. 1; 2 – mill No. 2; 3 – mill No. 3

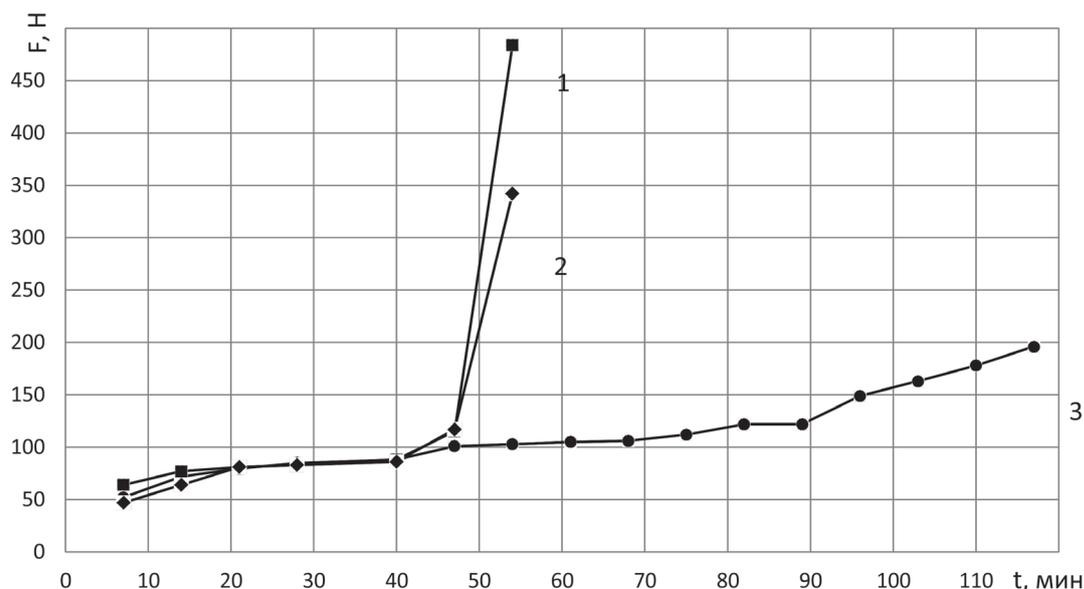


Рис. 6. График зависимости изменения сил резания от схемы работы:

1 – фреза № 1; 2 – фреза № 2; 3 – фреза № 3

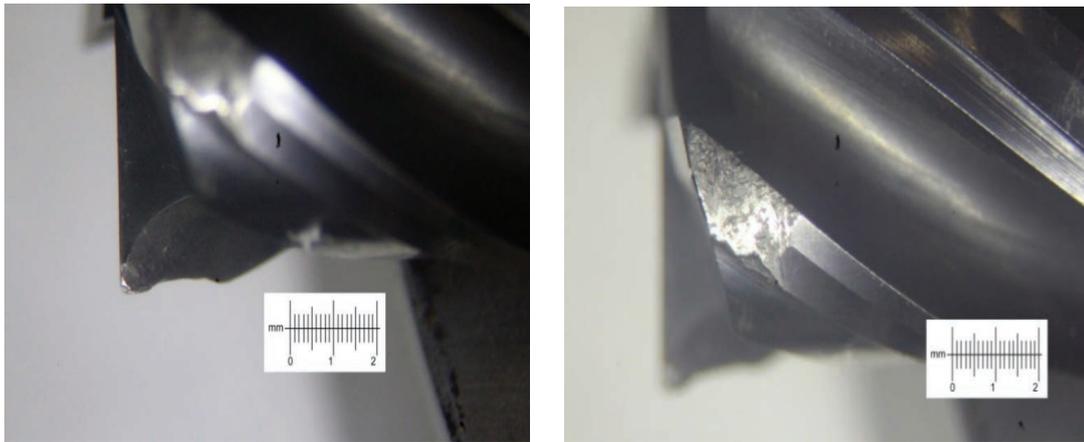
Fig 6. Dependence of cutting forces on the milling technique:

1 – mill No. 1; 2 – mill No. 2; 3 – mill No. 3

приложения этой силы будет разной, как продемонстрировано на рис. 10.

Из схемы видно, что при соотношении глубины и ширины 1:1 плечо сосредоточенной силы $l_1 = 23$ мм больше плеча $l_2 = 20$ мм при отношении 1:16. Следовательно, изгибающий момент, действующий на первую фрезу, больше. Для фрезы № 1 изгибающий момент равен $M_1 = 2,75$ Н·м, а

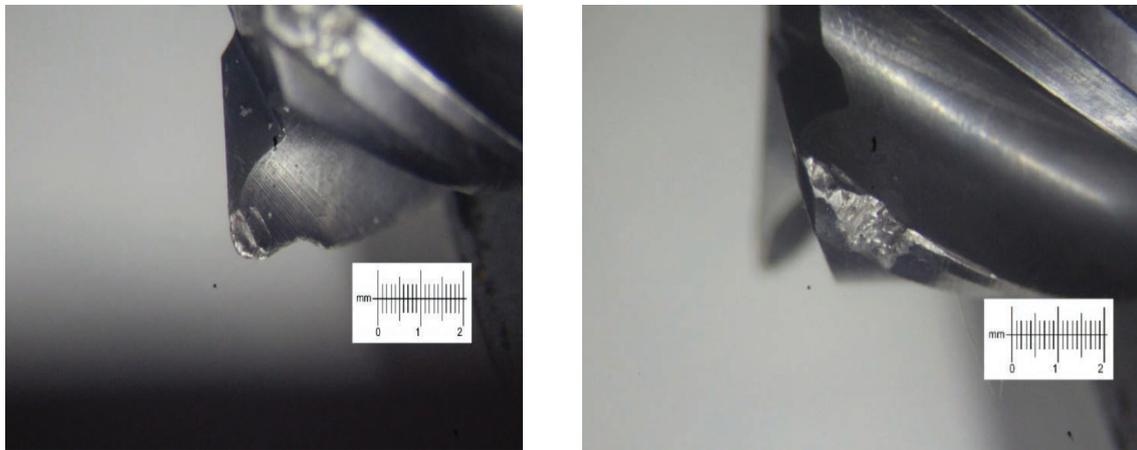
для фрезы № 3 $M_3 = 2,26$ Н·м. Для расчета изгибающего момента значение силы получено из эксперимента, а плечо действующей силы определено по схеме, представленной на рис. 10. Изгибающий момент первой фрезы почти на 20 % больше, чем у третьей. Это приводит к большей амплитуде колебаний и вибрациям фрезы, что увеличивает ее износ, а после дости-



a

б

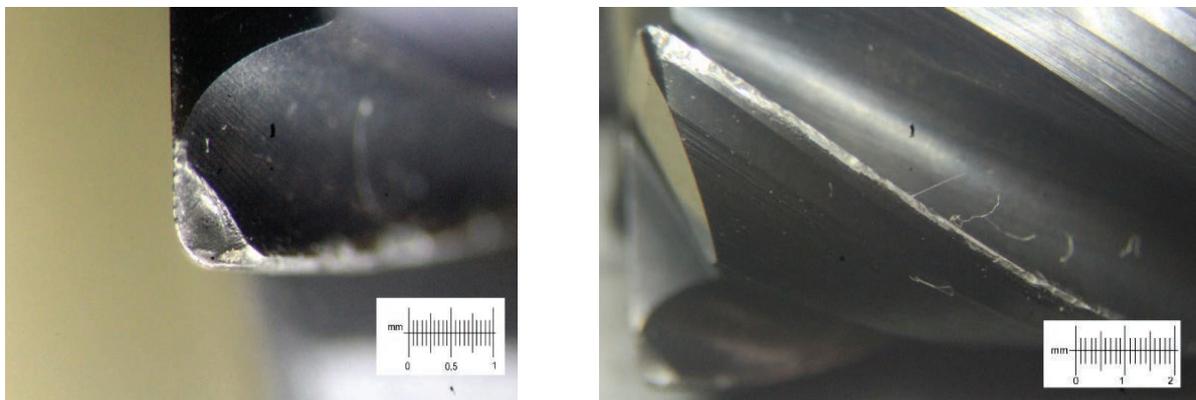
Рис. 7. Фотография износа фрезы № 1 по передней (а) и задней (б) поверхности
Fig. 7. Photo of the wear of the mill No.1 on the rake (a) and flank (б) surface



a

б

Рис. 8. Фотография износа фрезы № 2 по передней (а) и задней (б) поверхности
Fig. 8. Photo of the wear of the mill No. 2 on the rake (a) and flank (б) surface



a

б

Рис. 9. Фотография износа фрезы № 3 по передней (а) и задней (б) поверхности
Fig. 9. Photo of the wear of the mill No. 3 on the rake (a) and flank (б) surface

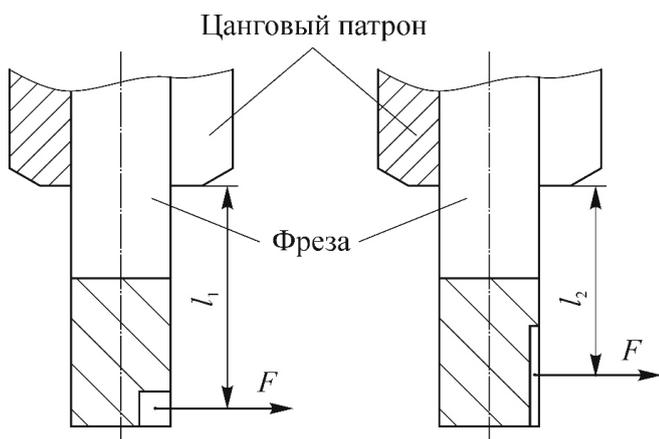


Рис. 10. Схема приложения сосредоточенной силы при разных соотношениях глубины и ширины фрезерования

Fig. 10. Application of point force for different depth to width ratios

жения критического значения износа резко возрастает сила, и тогда разница изгибающих моментов становится еще больше.

Другой причиной чрезмерного износа может являться характер распределения температуры в зоне резания. Так, например, при использовании малой ширины и большой глубины фрезерования температура в процессе резания локализуется на небольшом участке инструмента [17], вызывая ускорение процесса изнашивания. При увеличении ширины фрезерования температура распределяется по большей длине режущей части фрезы, уменьшая скорость износа.

Выводы

Проведенное исследование показало следующее.

1. Исследуемый композитный материал возможно эффективно обрабатывать концевыми фрезами, предназначенными для обработки жаропрочных сталей и титановых сплавов с геометрией $\gamma = 4^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\omega = 38^\circ$, $z = 4$, со скоростью резания от 20 до 30 м/мин и подачи на зуб от 0,02 до 0,04 мм/зуб.

2. Оптимальной для работы является схема фрезерования, при которой значение ширины фрезерования во много раз больше глубины. Стойкость фрезы, работающей при отношении глубины фрезерования к ширине 1 : 16, при прочих равных режимах почти в 3 раза выше, чем

при отношении 1 : 1, и в 2 раза выше, чем при отношении 1 : 4.

3. Основной износ сконцентрирован на задней поверхности зуба фрезы. При выбранных режимах обработки критическое значение износа находится в диапазоне от 0,11 до 0,15 мм. После достижения данной величины наблюдается более интенсивный износ и разрушение зуба фрезы.

4. До наступления критического износа 0,11...0,15 мм силы резания при разных соотношениях глубины и ширины и одинаковом объеме снимаемого слоя в единицу времени имеют близкие значения, равные примерно 70...86 Н.

Список литературы

1. Inconel 625/TiB2 metal matrix composites by direct laser deposition / V. Promakhov, A. Zhukov, M. Ziatdinov, I. Zhukov, N. Schulz, S. Kovalchuk, Y. Dubkova, R. Korsmik, O. Klimova-Korsmik, G. Turichin, A. Perminov // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, iss. 2. – P. 141. – DOI: 10.3390/met9020141.
2. Microhardness and microstructure evolution of TiB2 reinforced Inconel 625/TiB2 composite produced by selective laser melting / B. Zhang, G. Bi, S. Nai, C. Sun, J. Wei // *Optics and Laser Technology*. – 2016. – Vol. 80. – P. 186–195. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.01.010.
3. Patel M.R.R., Ranjan M.A. Advanced techniques in machining of aerospace superalloys: a review // *International Journal of Advance Research in Engineering, Science and Technology*. – 2015. – Vol. 2, iss. 5. – P. 149–154. – DOI: 10.26527/ijarest.150507103716.
4. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с. – (Библиотека технолога). – ISBN 5-217-03132-8.
5. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting / T. Trosch, J. Ströbner, R. Völkl, U. Glatzel // *Materials letters*. – 2016. – Vol. 164. – P. 428–431. – DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.136.
6. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
7. 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.

8. A brief review on machining of Inconel 718 / S. Roy, R. Kumar, Anurag, A. Panda, R.K. Das // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 9. – P. 18664–18673. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.212.
9. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с. – ISBN 978-5-458-28144-7.
10. Arunachalam R., Mannan M.A. Machinability of nickel-based high temperature alloys // *Machining Science and Technology*. – 2000. – Vol. 4, iss. 1. – P. 127–168. – DOI: 10.1080/10940340008945703.
11. Технология обработки металлов резанием: учебное пособие. – Б. м.: Sandvik Coromant, 2009. – 359 с.
12. Grguraš D., Kern M., Pušavec F. Suitability of the full body ceramic end milling tools for high speed machining of nickel based alloy Inconel 718 // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 630–633. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.190.
13. Latest machining technologies of hard-to-cut materials by ultrasonic machine tool / F. Feucht, J. Ketelaer, A. Wolff, M. Mori, M. Fujishima // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 14. – P. 148–152. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.040.
14. Kuo K.L., Tsao C.C. Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2012. – Vol. 22, suppl. 3. – P. 793–800. – DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61806-8.
15. Influence of ultrasonic assistance on delamination during machining of different composite materials / M. Kuruc, M. Nepal, T. Vopát, V. Šimna, J. Peterka // *Annals of DAAAM and Proceedings*. – 2017. – Vol. 28. – DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.055.
16. Ni C., Zhu L., Yang Z. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view // *Wear*. – 2019. – Vol. 436–437. – P. 203006. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.
17. HEM Guidebook: a machinist's guide to increasing shop productivity with high efficiency milling. – Harvey Performance Company, LLC, 2017. – URL: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/hem-guidebook-download/> (accessed: 15.01.2021).
18. Roberts S. High-efficiency milling speed changes rules // *Canadian Metalworking*. – 2018. – January 10. – URL: <https://www.canadianmetalworking.com/article/cuttingtools/high-efficiency-milling-speed-changes-rules/> (accessed: 15.01.2021).
19. Derek K. Optimize cutting efficiency, optimize throughput // *Modern Machine Shop*. – 2005. – February 15. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/optimize-cutting-efficiency-optimize-throughput> (accessed: 15.01.2021).
20. High Speed Machining Vs. HEM. – 2017. – August 11. – URL: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/high-efficiency-milling-vs-high-speed-machining/> (accessed: 15.01.2021).
21. High efficiency vs. High Feed Milling: which is more productive? // *Modern Machine Shop*. – 2018. – November 2. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/high-efficiency-vs-high-feed-milling-which-is-more-productive> (accessed: 15.01.2021).
22. Каталог режущего инструмента компании «ПК МИОН». – Томск, 2019. – URL: <http://pkmion.ru/catalog/frezy/> (дата обращения: 15.01.2021).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 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 machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB₂ composite

Alexey Arlyapov^{1, a,*}, Sergei Volkov^{1, b}, Vladimir Promakhov^{2, c}, Alexander Zhukov^{2, d}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5117-4663>,  arlyapov@tpu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9984-9466>,  vsu@pkmion.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-4385-3404>,  vpromakhov@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-9814-4365>,  zhuk_77@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 April 2020

Revised: 15 April 2020

Accepted: 19 December 2020

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Milling
Cutting parameters
Tool life
Cutting forces
Composite
Titanium diboride
Laser sintering

Funding

This work was carried out with partial financial support from the Russian Science Foundation No. 20-79-10086.

ABSTRACT

Introduction. The processing capability of milling a metal-matrix composite based on Inconel 625 with the addition of NiTi-TiB₂, obtained by laser sintering, is investigated. The composite is intended for turbine blades manufacture and has strength characteristics close to Inconel 625, however, due to the addition of TiB₂, its heat- and wear resistance is higher. This material is new; its machinability has not been studied yet. **The aim of the work** is to determine the technological capabilities of milling with end mills of this composite. **Investigations.** The new composite is milled with end mills, and recommendations on the selection of cutting speed, milling depth and width are obtained. **Experimental Methods.** Measuring end mill wear and cutting force. Wear is assessed by the flank chamfer using a microscope, and cutting forces are measured with a Kistler 9257B dynamometer. Milling is carried out at three speeds: 25, 35 and 50 m/min. To determine the optimal parameters of the depth and width of milling, the following ratios are used: 1 : 1, 1 : 4; 1 : 16, while the volume of chips removed per unit of time remained constant for all ratios. **Results and Discussion.** The back surface of the cutter teeth wears out more intensively. After reaching the wear chamfer along the flank surface of a value equal to 0.11...0.15 mm, there is a sharp increase in forces and brittle destruction of the tooth. Milling at a speed of 25 m/min guaranteed 28 minutes of stable operation, after which the amount of wear quickly approached the critical value of 0.11 mm, at a cutting speed of 50 m/min, critical wear occurred already after 14 minutes. The dependences of the cutting force on time for all selected cutting speeds, throughout the test time, have an increasing character, which indicates the effect of wear of cutters on cutting forces. It is found that the durability of cutters increases with increasing width and decreasing the depth of milling.

For citation: Arlyapov A.Yu., Volkov S.Yu., Promakhov V.V., Zhukov A.S. Investigation of the machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB₂ composite. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32. (In Russian).

References

1. Promakhov V., Zhukov A., Ziatdinov M., Zhukov I., Schulz N., Kovalchuk S., Dubkova Y., Korsmik R., Klimova-Korsmik O., Turichin G., Perminov A. Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition. *Metals*, 2019, vol. 9, iss. 2, p. 141. DOI: 10.3390/met9020141.
2. Zhang B., Bi G., Nai S., Sun C., Wei J. Microhardness and microstructure evolution of TiB₂ reinforced Inconel 625/TiB₂ composite produced by selective laser melting. *Optics and Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 186–195. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.01.010.

* Corresponding author

Arlyapov Alexey Yu. Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin Avenue,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7-906-947-5044, e-mail: arlyapov@tpu.ru

3. Patel M.R.R., Ranjan M.A. Advanced techniques in machining of aerospace superalloys: a review. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science and Technology*, 2015, vol. 2, no. 5, pp. 149–154. DOI: 10.26527/ijarest.150507103716.
4. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. *Obrabotka spetsial'nykh materialov v mashinostroenii* [Processing of special materials in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p. ISBN 5-217-03132-8.
5. Trosch T., Ströbner J., Völkl R., Glatzel U. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Materials Letters*, 2016, vol. 164, pp. 428–431. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.136.
6. Granovskii G.I., Granovskii V.G. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p.
7. Polshetty 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.
8. Roy S., Kumar R., Anurag, Panda A., Das R.K. A brief review on machining of Inconel 718. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 9, pp. 18664–18673. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.212.
9. Maslenkov S.B. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 192 p. ISBN 978-5-458-28144-7.
10. Arunachalam R., Mannan M.A. Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Machining Science and Technology*, 2000, vol. 4, iss. 1, pp. 127–168. DOI: 10.1080/10940340008945703.
11. *Tekhnologiya obrabotki metallov rezaniem* [Technology of metal cutting]. Sandvik Coromant, 2009. 359 p.
12. Grguraš D., Kern M., Pušavec F. Suitability of the full body ceramic end milling tools for high speed machining of nickel based alloy Inconel 718. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 630–633. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.190.
13. Feucht F., Ketelaer J., Wolff A., Mori M., Fujishima M. Latest machining technologies of hard-to-cut materials by ultrasonic machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 148–152. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.040.
14. Kuo K.L., Tsao C.C. Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, suppl. 3, pp. 793–800. DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61806-8.
15. Kuruc M., Necpal M., Vopát T., Šimna V., Peterka J. Influence of ultrasonic assistance on delamination during machining of different composite materials. *Annals of DAAAM and Proceedings*, 2017, vol. 28. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.055.
16. Ni C., Zhu L., Yang Z. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti-6Al-4V from dynamic view. *Wear*, 2019, vol. 436–437, p. 203006. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.
17. *HEM Guidebook: a machinist's guide to increasing shop productivity with high efficiency milling*. Harvey Performance Company, LLC, 2017. Available at: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/hem-guidebook-download/> (accessed 15.01.2021).
18. Roberts S. High-efficiency milling speed changes rules. *Canadian Metalworking*, 2018, January 10. Available at: <https://www.canadianmetalworking.com/article/cuttingtools/high-efficiency-milling-speed-changes-rules> (accessed 15.01.2021).
19. Derek K. Optimize cutting efficiency, optimize throughput. *Modern Machine Shop*, 2005, February 15. Available at: <https://www.mmsonline.com/articles/optimize-cutting-efficiency-optimize-throughput> (accessed 15.01.2021).
20. *High Speed Machining Vs. HEM*. 2017, August 11. Available at: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/high-efficiency-milling-vs-high-speed-machining/> (accessed 15.01.2021).
21. High efficiency vs. High Feed Milling: which is more productive? *Modern Machine Shop*, 2018, November 2. Available at: <https://www.mmsonline.com/articles/high-efficiency-vs-high-feed-milling-which-is-more-productive> (accessed 15.01.2021).
22. *Katalog rezhushchego instrumenta kompanii "PK MION"* [The cutting tool catalog of the PC MION company]. Tomsk, 2019. Available at: <http://pkmion.ru/catalog/frezy/> (accessed 15.01.2021).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).