

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.30-41.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.30-41.

Научная статья

УДК 621.91.01

doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-30-41

Исследование обрабатываемости при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM

Артём Сергеевич Бабаев¹, к.т.н.

Виктор Николаевич Козлов², к.т.н.

Валерия Алексеевна Овчаренко³, м.н.с.

Артём Романович Семёнов⁴, м.н.с.

Иван Алексеевич Бельчиков⁵, м.н.с.

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ a.s.babaev@mail.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2334-1679>

² kozlov-viktor@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>

³ vy.gornova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4797-5604>

⁴ artems2102@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>

⁵ ivan70422@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5217-9409>

Аннотация. Рассмотрены особенности фрезерования труднообрабатываемого жаропрочного сплава инконель 625 (аналог ХН75МБТЮ). Образец был получен по аддитивной технологии EBAM с использованием электронно-лучевой установки. С использованием высокоточного аналитического оборудования проведены исследования микроструктуры и физико-механических свойств на образцах, вырезанных вдоль и поперёк направления подачи при синтезе. Измерения сил резания, возникающих при фрезеровании на различных режимах, выполнено с использованием токарного динамометр Kistler. Даны пояснения по схемам измерения сил резания и их направлению в зависимости от условий контакта фрезы и заготовки. Для фрезерования были использованы твёрдосплавные концевые фрезы диаметром 8 и 12 мм без покрытия. В ходе измерения составляющих сил резания было установлено, что увеличение подачи в диапазоне 25...200 мм/мин при фрезеровании приводит к линейному росту сил резания. При этом наблюдается стабильная тенденция превышения сил резания при фрезеровании вдоль направления подачи при синтезе в сравнении с аналогичными условиями. В случае фрезерования поперёк направления подачи при синтезе образца установлено, что удельная сила резания на лимитирующих режимах достигает значений 428 Н/мм². Анализ результатов исследования позволил разработать технологические рекомендации по назначению параметров режущего инструмента и установлению лимитирующих режимов фрезерования.

Ключевые слова: фрезерование, инконель, силы резания, износ

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10166, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>

Для цитирования: Бабаев А.С., Козлов В.Н., Овчаренко В.А., Семёнов А.Р., Бельчиков И.А. Исследование обрабатываемости при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 30–41. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-30-41

Processing characteristics study for the alloy obtained through additive technology EBAM (inconel 625) under milling

Artyom S. Babaev¹, PhD. Eng.

Viktor N. Kozlov², PhD. Eng.

Valeria A. Ovcharenko³, JRF.

Artem R. Semenov⁴, JRF.

Ivan A. Belchikov⁵, JRF.

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ a.s.babaev@mail.tsu.ru

² kozlov-viktor@bk.ru

³ vy.gornova@yandex.ru

⁴ artems2102@yandex.ru

⁵ ivan70422@gmail.com

Abstract. The features of milling of the difficult-to-process heat-resistant inconel 625 (analog of CrNi75MoNbTiAl) are viewed. The sample was obtained using the EBAM additive technology using an electron beam installation. By means high-precision analytical equipment, microstructure and physico-mechanical properties were studied on samples cut far and wide of feed path under synthesis. Acting cutting forces were measured under milling in various modes using a Kistler dynamometric turning appliance. The schemes for measuring cutting forces and their direction, depending on the contact conditions of the milling cutter and stock material were explained. Carbide end mills uncoated with diameters of 8 and 12 mm were used for milling. When measuring the cutting forces components, it was found that an increase in feed in the range of 25...200 mm/min during milling leads to a linear increase in cutting forces. At the same time, there is a stable tendency to exceed cutting forces when milling along the feed direction under synthesis in comparison with similar conditions. In the case of milling against the feed direction under sample synthesis, it was found that the specific cutting force in the limiting modes reaches values of 428 N/mm². The analysis of the research results made it possible to develop technological recommendations on the assignment of cutting tool parameters and fixing limiting milling modes.

Keywords: milling, inconel, cutting forces, wear

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 23-79-10166, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>

For citation: Babaev A.S., Kozlov V.N., Ovcharenko V.A., Semenov A.R., Belchikov I.A. Processing characteristics study for the alloy obtained through additive technology EBAM (inconel 625) under milling / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 30–41. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-30-41

Введение

Непрерывное развитие инновационных технологий аддитивного производства заготовок из широкой гаммы металлов и сплавов формирует задачи, связанные с получением полнофункциональных и работоспособных изделий. Наиболее востребованы аддитивные технологии при получении заготовок, а также при ремонте изношенных поверхностей из дорогостоящих и труднообрабатываемых материалов, так как стало возможным обеспечить форму близкую к готовому изделию, тем самым снижая трудоёмкость и стоимость готового изделия за счёт минимизации припусков на обработку [1].

К числу труднообрабатываемых конструкционных материалов относится группа никель-хром-молибденовых сплавов, которые применяются в изделиях, испытывающих высокие силовые и химико-термические нагрузки, например, в химической (криогенные сосуды), атомной (элементы реакторов) и судостроительных (гребные винты и оболочки) отраслях. Обеспечить необходимые параметры точности, шероховатость поверхностей и производительность возможно классическим путём – за счёт субтрактивной обработки, т.е. применения лезвийного режущего инструмента. Поэтому в виду особенностей технологий аддитивного производства и формирования микроструктуры, физико-механических и

других свойств изучение вопросов обрабатываемости при резании относится к числу актуальных задач.

Одним из представителей никель-хром-молибденовых сплавов является инконель 625 (российский аналог сплав ХН75МБТЮ). Лезвийная обработка последнего представляется весьма сложной задачей из-за тенденции упрочнения при резании, наличием низкой теплопроводности, а также наличия твёрдых частиц в микроструктуре [2 – 4].

В работах [5, 6] предложены различные механистические модели для прогнозирования величины сил резания при фрезеровании инконель 625, полученного по аддитивной технологии. Авторы показывают влияние режимов резания (скорость, подача) на изменение сил резания. Отмечается весьма непродолжительное время обработки из-за ускоренного износа режущих кромок.

Обоснование и выбор инструментального материала для обработки инконель 625 приведён в [7]. Показано, что используемые современные твёрдые сплавы обеспечивают увеличение стойкости инструмента, но при этом наблюдается доминирующее влияние окислительного износа рабочих поверхностей инструмента.

В работе [8] приведены результаты по использованию минимального количества смазывающей жидкости (метод MQL – minimum

quantity lubrication) для минимизации износа и улучшения шероховатости при фрезеровании. Установлено преимущество MQL перед обработкой без подачи смазочно-охлаждающей жидкости и с обильной подачей в зону резания.

Анализ результатов работы [9] подтвердил гипотезу о влиянии направления подачи при синтезе заготовок из инконель 625 методом LPBF (с англ. – лазерное сплавление порошка непрерывным лучом). Установлено, что при перемещении фрезы против вертикального направления синтеза, были зарегистрированы более низкие пиковые силы с более высокими отклонениями. В свою очередь, при перемещении фрезы вдоль вертикального направления синтеза исследователи наблюдали высокие пиковые значения сил резания с более низкими отклонениями.

Материалы и методы

Заготовка для проведения исследований была получена на лабораторной установке, реализующей технологию EBAM (с англ. – электронно-лучевое аддитивное производство) (рис. 1). Согласно ГОСТ 57588-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования» данная технология относится к классу прямого подвода энергии и материала.

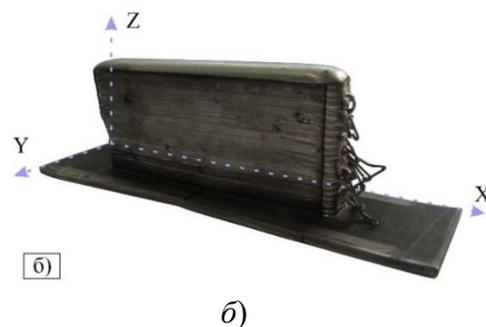


Рис. 1. Рабочая область лабораторной установки (а) и внешний вид (б) образца Inconel 625

Fig. 1. The working area of the laboratory installation (a) and the Inconel 625 sample habitus (b)

Получение заготовки осуществлялась из проволоки диаметром 1,2 мм марки OKAutrodNiCrMo-3 фирмы ESAB (Швеция) при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 60 мА. Сфокусированный луч перемещался по круговой развертке диаметром 6 мм, скорость печати составила 300 мм/мин.

Для проведения исследований с полученной заготовки на электро-эрозионном станке срезали дефектный поверхностный слой толщиной 3...4 мм. После этого из основного материала толщиной 12 мм готовили образцы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях для механических испытаний и

изучения микроструктуры с учётом возможной анизотропии свойств. Оставшуюся часть разрезали на образцы размером $50 \times 50 \times 16$ мм для проведения фрезерования с учётом надёжного закрепления в тисках.

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 фирмы Shimadzu (Япония) на $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Химический состав определяли с помощью портативного рентгено-флуоресцентного анализатора S1 TITANSPX фирмы Bruker (США). Микроанализ проводили на полированных поверхностях с помощью металлографического микроскопа AxioObserver производства CarlZeiss (Германия) и растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром MIRA 3 LMU фирмы Tescan (Чехия). Измерение твёрдости образцов выполняли методом Виккерса на стационарном микротвердомере Durascan-10 в соответствии с

ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, с нагрузкой 100 г. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине TiniusOlsen 50ST по ГОСТ 1497-2023.

В качестве режущего инструмента использовали твёрдосплавные концевые фрезы, произведённые компанией МИОН (г. Томск) по специальному заказу (рис. 2). Использовали инструмент двух диаметров $d_{\text{фр}} = 12$ и 8 мм, без покрытия с универсальной геометрией (задний угол $\alpha = +10^\circ$, передний угол $\gamma = +8^\circ$; угол наклона винтовой канавки $\omega = 40^\circ$, число зубьев $z = 4$, $L = 78$ мм, $l = 22$ мм). Фрезы изготовлены из твёрдого сплава марки H10F со следующими характеристиками: $\approx 89,4\%$ массы карбидов вольфрама, до $0,6\%$ массы смешанных карбидов и около $10,0\%$ массы кобальта в качестве связки; размер зерна карбидной фазы $0,5 \dots 0,6$ мкм, предел прочности при изгибе ≈ 3200 МПа, а твёрдость 92 HRA.

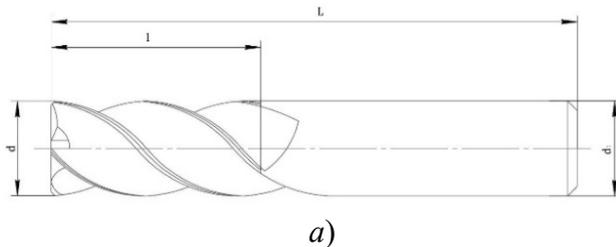


Рис. 2. Схематическое (а) и реальное (б) изображение фрезы с указанием основных геометрических размеров

Fig. 2. Schematic (a) and real (b) images of the milling cutter with indication of the basic geometric dimensions

Диаметр фрезы 12 мм был выбран как рациональный: при увеличении диаметра фрезы её стоимость увеличивается пропорционально квадрату её диаметра, поэтому использование цельной твердосплавной фрезы диаметром более 12 мм существенно увеличивает затраты на режущий инструмент, хотя и позволяет использовать большую подачу или ширину фрезерования. Однако надо иметь в виду, что увеличение диаметра может накладывать ограничения при фрезеровании небольших и тонкостенных заготовок при аддитивно-субтрактивной обработке. Фреза диаметром 8 мм и менее имеет существенно меньшую прочность по сравнению с 12 мм, поэтому в наших экспериментах она использовалась ограниченно – только для определения соотношения сил с основным диаметром.

Непосредственно испытания проводили на фрезерном станке мод. DMU 50 фирмы DMG MORI (Япония). Для измерения сил резания использовали динамометр мод. 9257BA фирмы Kistler (Швейцария), который был установлен непосредственно на стол фрезерного станка. Продолжительность цикла снятия данных с момента установившегося резания составляла 5 с, т.е. после входа в заготовку всех зубьев фрезы. Регистрация сил осуществлялась с частотой получения сигнала 10 кГц. Фрезерование заготовок выполняли как вдоль, так и поперёк подачи при синтезе (рис. 1, б).

Для минимизации влияния фактора охлаждения и смазывания зоны резания фрезерование проводили без использования смазочно-охлаждающей жидкости.

При испытаниях применялось фрезерование согласно схемам (рис. 3).

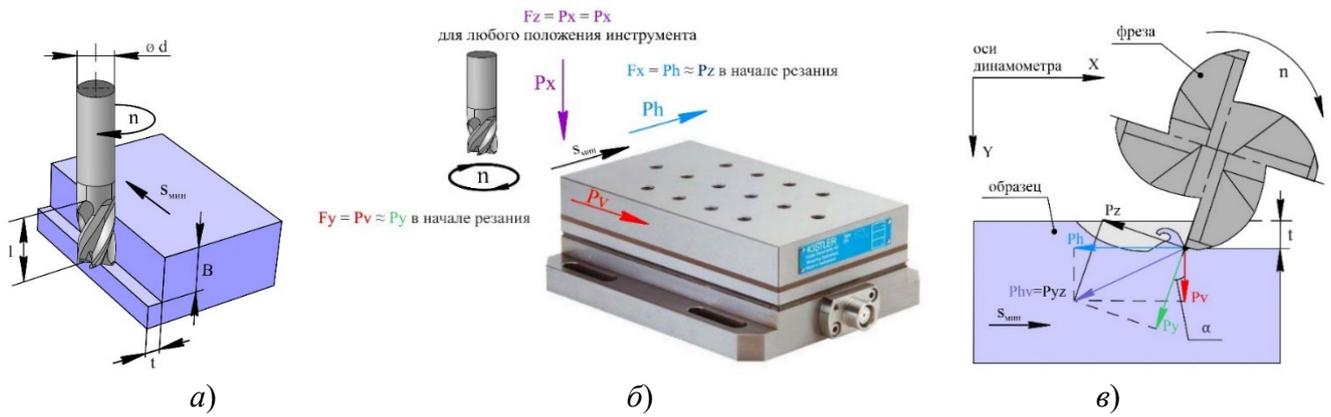


Рис. 3. Схематичное изображение параметров фрезерования (а) и схемы действия сил резания (б, в) на фрезу относительно системы координат динамометра

Fig. 3. Schematic representation of milling parameters (a) and the cutting forces mechanism (b, c) acting upon the milling cutter relative to the coordinate system of the dynamometer

Предварительные исследования, выполненные в рамках описываемой работы, показали, что при попутном фрезеровании по сравнению со встречным фрезерованием при одних и тех же режимах резания ($n = 315$ об/мин,

$B = 7$ мм, $t = 1$ мм, $S_{мин} = 25$ мм/мин) увеличивается величина составляющих сил Ph_{max} и Pv_{max} почти в 6 раз (рис. 4). Поэтому все основные эксперименты выполнялись при встречном фрезеровании.

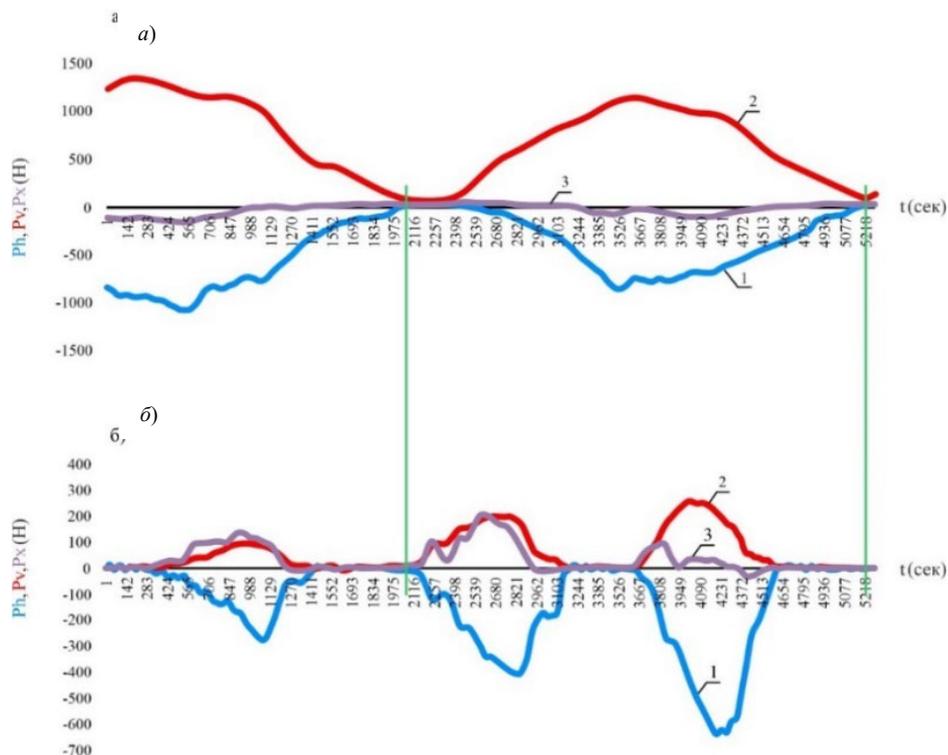


Рис. 4. Сравнение графиков изменения сил при попутном (а) и встречном фрезеровании (б) при одинаковых режимах фрезерования:

1 – сила Ph ; 2 – сила Pv ; 3 – сила Px

Fig. 4. Comparison of force change graphs for climb-cut milling (a) and cutting up (b) under similar milling modes: 1 – Ph force; 2 – Pv force; 3 – Px force

При фрезеровании образцов, полученных по аддитивной технологии, измеряли следующие составляющие силы резания: P_h – сила, направленная вдоль направления подачи (сила подачи); P_v – сила, направленная перпендикулярно направлению подачи (боковая сила); P_x – сила, направленная вдоль оси фрезы (осевая сила). Эти силы непрерывно изменяются из-за изменения толщины среза $a_i = S_z \cdot \sin \psi_i$, где S_z – подача на зуб; ψ_i – центральный угол от начала врезания режущей кромки зуба до её текущего положения [10].

При вращении фрезы происходит поворот тангенциальной составляющей силы резания P_z (действует вдоль направления скорости резания, или перпендикулярно радиус-вектору от оси вращения до режущей кромки); и радиальной составляющей силы резания P_y (действует вдоль радиус-вектора от режущей кромки к оси вращения фрезы). Эти составляющие являются исходными, но при фрезеровании их выделить невозможно из-за поворота зуба фрезы. Силы P_z и P_y лежат в основе технологических сил P_h и P_v , которые можно измерить с использованием нами применяемого токарного динамометра Kistler мод. 9257BA.

В начале врезания сила подачи P_h совпадает с направлением силы P_z , но при вращении фрезы и повороте силы P_z эта составляющая начинает изменяться в пользу увеличения

боковой силы P_v . В свою очередь, в начале врезания боковая сила P_v совпадает с направлением силы P_y , но при повороте последней начинает изменяться в пользу увеличения силы подачи P_h . Более подробно эти изменения описаны в статье [11]. В связи с вышесказанным анализировалось изменение наибольших сил P_h и P_v , т.к. именно наибольшие силы приводят к поломке режущего инструмента.

Осевая сила P_x постоянно направлена вдоль оси фрезы, но при острой режущей кромке фрезы она может быть направлена от заготовки вверх из-за угла наклона главной режущей кромки $\omega = 40$, т.е. фреза пытается поднять заготовку. На мониторе динамометра в этом случае она обозначается с отрицательным знаком (см. рис. 4). После износа зубьев фрезы по уголкам и на торцевой части фрезы эта сила, как правило, положительна, т.е. направлена вниз и прижимает заготовку к столу станка. Отрицательная величина силы P_x существенно увеличивает риск поднятия заготовки из приспособления, особенно при большой величине ширины фрезерования B , поэтому в нашем приспособлении, закреплённом на динамометре, была предусмотрена установка дополнительного прижима заготовки сверху.

Фрезерование выполняли на режимах, приведённых в табл. 1.

1 Режимы фрезерования инконель 625

1. Inconel 625 milling modes

№ опыта	n , об/мин	v , м/мин	$S_{\text{мин}}$, мм/мин	t , мм	B , мм	Q , мм ³ /мин
1	315	11,9	25	1,0	7,0	175
2			50			350
3			80			560
4			200			1400
5	630	23,8	25			175
6			50			350
7			80			560
8			200			1400

Примечание: попытки увеличения скорости резания и/или подачи выше табличных значений приводили к выходу фрезы из строя в результате поломки.

Ширина фрезерования $B = 7$ мм принималась в основных сериях экспериментов для получения возможности увеличения подачи до 250 мм/мин, т.е. с резервом прочности при большей подаче. Подачу более 250 мм/мин

применять нецелесообразно, т.к. обработанная горизонтальная поверхность имеет налипания и непригодна для получения окончательного размера заготовки (рис. 5).

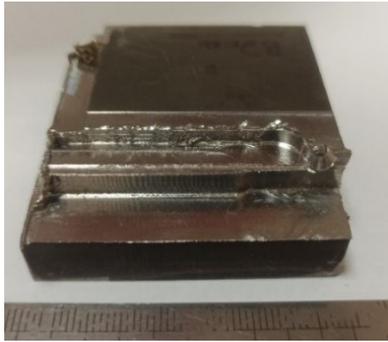


Рис. 5. Внешний вид образца инконель 625 после выполнения серии экспериментов по фрезерованию

Fig. 5. Inconel 625 sample habitus after performing a series of milling experiments

Получаемые в процессе регистрации данные обрабатывались с использованием классических положений математической статистики и планирования эксперимента, а для автоматизации расчётов использовали программное обеспечение Microsoft Excel.

Результаты

Фазовый состав образца представлен фазой твердого раствора Ni(Cr), а результаты химического анализа приведены в табл. 2

2. Химический состав проволоки и исследуемого образца

2. Chemical composition of the wire and the test sample

Объект исследования и требования по стандарту	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb + Ta
Проволока	<0,1	<0,5	<0,5	21,5	9,0	>60	<0,4	<0,5	<0,4	<2,0	3,7
Образец Inconel 625		0,3	0,3	21,5	9,0	63,5	0,4	-	0,4	0,5	3,7
ГОСТ 5632-2014		<0,5	<0,5	20...23	8...10	>58	<0,4	-	<0,4	<5,0	3,2...4,2

Инконель 625 относится к дисперсионно-твердеющим сплавам [12], после травления структура однородная, видны границы зерен. Полученные образцы имеют тонкую дендритную структуру, обусловленную высокой скоростью охлаждения в процессе наплавки. Чем выше скорость охлаждения, тем меньше

размер образовавшихся дендритов, что соответствует зонам металла сформированных слоев. В переходных зонах, а также в зонах сплавления слоев проволоки, визуализируется столбчатая структура, что объясняется повторным тепловым воздействием на уже закристаллизовавшийся металл (рис. 6, а).

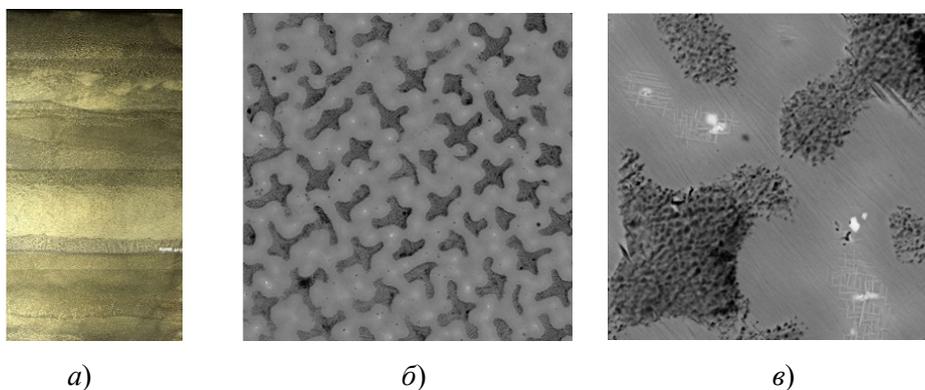


Рис. 6. Панорама микроструктуры (а) образца инконель 625 в продольном сечении (ZOX) и отдельные (б, в) снимки микроструктуры

Fig. 6. Microstructure view (a) of the inconel 625 sample in longitudinal section (ZOX) and particular (b, c) images of the microstructure

Дендритное строение обусловлено неравномерным растворением фаз Ni-Cr друг в друге, с выделением мелкодисперсных включений легированных карбидов (Mo, Nb, Ti), (рис. 6, б, в), преимущественно в областях с

большим содержанием Ni (светло-серые области).

Твёрдость образцов варьируется в диапазоне от 200 до 246 HV. Результаты исследования механических характеристик приведены в табл. 3.

3. Механические свойства инконель 625 в зависимости от направления синтеза

3. Mechanical properties of inconel 625 depending on the direction of synthesis

Сечение	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %
ZOY (поперёк)	640 ± 20	144 ± 14	56 ± 3
ZOX (вдоль)	647 ± 80	171 ± 5	61 ± 3

На рис. 7 представлены графики влияния подачи на наибольшую величину составляющих силы резания при направлении фрезерования инконель 625 ($d_{фр} = 12$ мм,

$n = 315$ об/мин, $B = 7$ мм, $t = 1$ мм) вдоль и поперёк направления подачи при синтезе образцов представлены на рисунке 7.

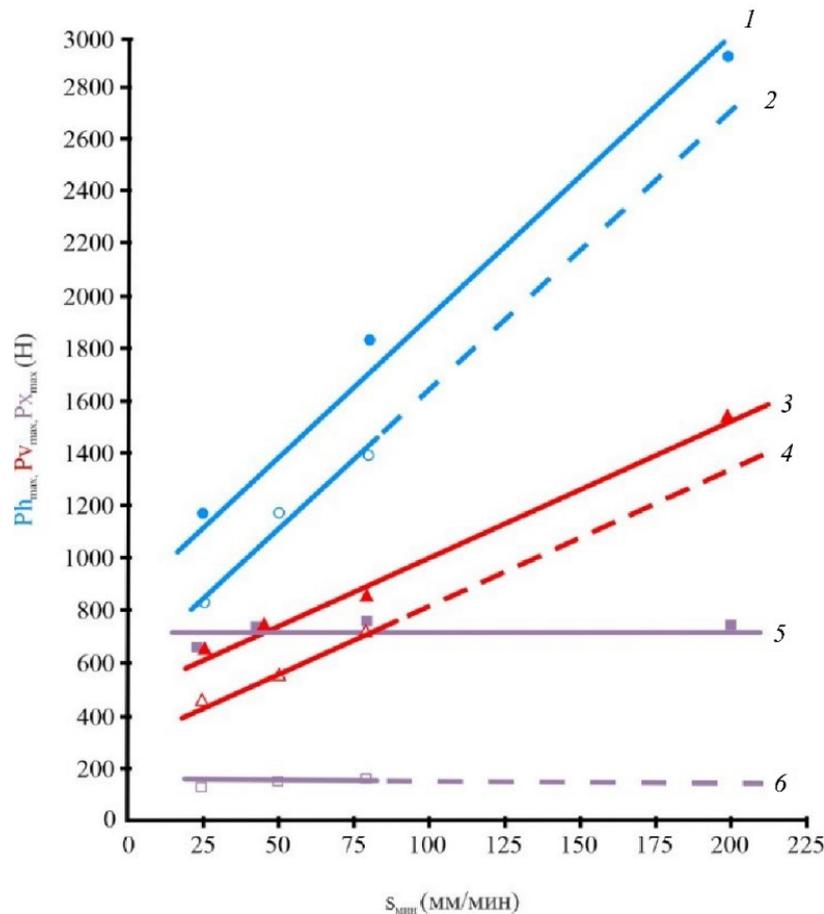


Рис. 7. Влияние минутной подачи $S_{мин}$ на наибольшие силы при фрезеровании вдоль направления подачи при синтезе: 1 – Ph_{max} ; 2 – Pv_{max} ; 3 – Px_{max} ; поперёк направления подачи при синтезе: 4 – Ph_{max} ; 5 – Pv_{max} ; 6 – Px_{max}

Fig. 7. The effect of the minute feed of S_{min} on the greatest forces under milling along the feed direction under synthesis: 1 – Ph_{max} ; 2 – Pv_{max} ; 3 – Px_{max} ; across the feed direction during synthesis: 4 – Ph_{max} ; 5 – Pv_{max} ; 6 – Px_{max}

Влияние режимов обработки и диаметра концевой фрезы на наибольшие силы при фрезеровании инконель 625 вдоль направления

подачи при синтезе ($n = 630$ об/мин; $B = 2,6$ мм; $t = 1$ мм) приведены на рис. 8.

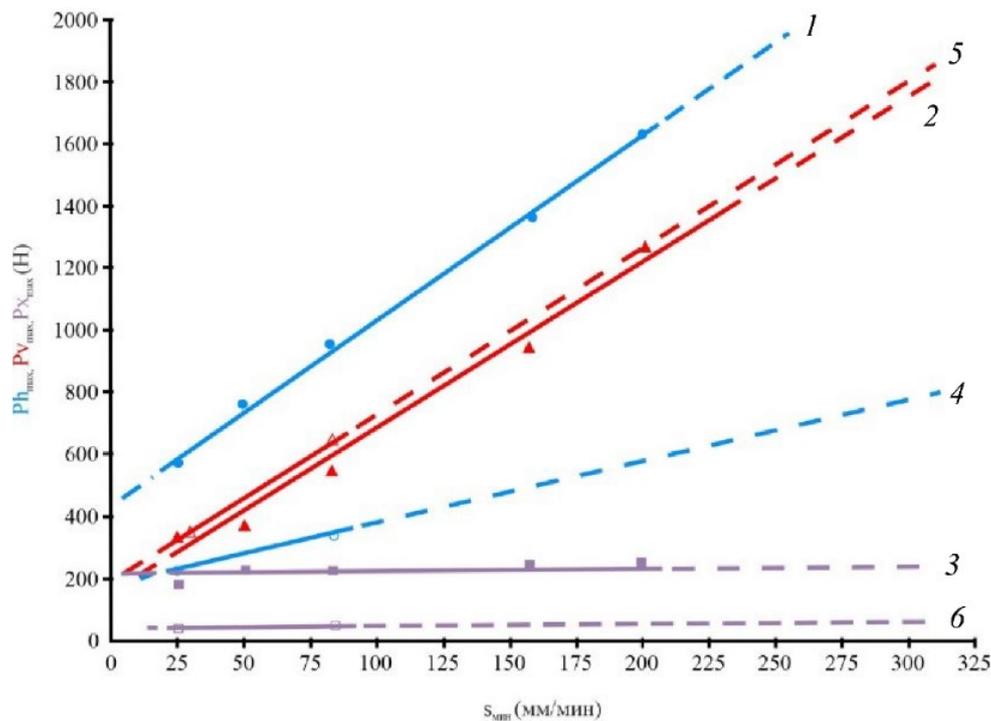


Рис. 8. Влияние минутной подачи S_{\min} и диаметра фрезы $d_{\text{фр}}$ на наибольшие силы:
при $d_{\text{фр}} = 12$ мм: 1 – Ph_{\max} ; 2 – Pv_{\max} ; 3 – Px_{\max} ;
при $d_{\text{фр}} = 8$ мм: 4 – Ph_{\max} ; 5 – Pv_{\max} ; 6 – Px_{\max}

Fig. 8. The effect of the minute feed of S_{\min} and the diameter of the milling cutter d_{mc} on the greatest forces:
at $d_{\text{фр}} = 12$ мм: 1 – Ph_{\max} ; 2 – Pv_{\max} ; 3 – Px_{\max} ;
at $d_{\text{фр}} = 8$ мм: 4 – Ph_{\max} ; 5 – Pv_{\max} ; 6 – Px_{\max}

Обсуждение

При выполнении экспериментов ширина фрезерования B , измеряемая параллельно оси концевой фрезы, в основном принималась равная 7 мм, а глубина фрезерования t , измеряемая перпендикулярно оси концевой фрезы, в основном принималась равная 1 мм. Это было вызвано необходимостью обеспечить наибольшую производительность при сохранении работоспособности концевой фрезы при приемлемой стоимости фрезы диаметром 12 мм. Ранее выполненные эксперименты показали, что при постоянной площади поперечного сечения среза желательнее увеличивать ширину фрезерования B , а не глубину фрезерования t .

При увеличении t стружка находится в стружечной канавке фрезы более продолжительное время, её объём увеличивается и из-за высокой температуры резания, особенно при увеличении скорости резания v , стружка начинает привариваться к передней поверхности зуба фрезы. При увеличении минутной подачи S_{\min} увеличивается объём удаляемого металла в стружечной канавке, который начинает пакетироваться, препятствуя своему удалению, и этот образовавшийся комок при вращении фрезы начинает интенсивно разогреваться из-за трения с поверхностью резания до красного цвета и ещё больше привариваться к стружечной канавке. Это явление может происходить только в одной из стружечных канавок, но попытки удалить образовавшийся комок

приводят к выкрашиванию режущей кромки твердосплавной фрезы. Практика показала, что для надёжного удаления стружки желательно, чтобы глубина фрезерования была не более 1 мм.

Из рис. 7 видно, что наибольшая величина силы подачи Ph_{\max} увеличивается более интенсивно по сравнению с боковой силой Pv_{\max} , но их соответствующие графики вдоль и поперёк практически параллельны. Силы Ph_{\max} и Pv_{\max} при фрезеровании вдоль направления синтеза немного превышают соответствующие силы при фрезеровании поперёк, что связано, по нашему мнению, с большей величиной предела текучести вдоль по сравнению с поперечным направлением образца (табл. 3).

Наибольшая величина осевой силы Px_{\max} не изменяется при увеличении подачи, но при фрезеровании вдоль она существенно больше, чем при фрезеровании поперёк. При фрезеровании поперёк сила Px_{\max} циклически принимает то положительный, то отрицательный знак. Это явление может приводить к появлению вибрации, а при фрезеровании небольших заготовок отрицательная сила Px вырывает их из приспособления при закреплении только по боковым поверхностям, т.к. силы закрепления порой недостаточно. Это касается и обработки тонкостенных и нежестких заготовок, когда невозможно использовать большую силу для их закрепления.

При уменьшении диаметра фрезы с 12 до 8 мм происходит ожидаемое уменьшение величины наибольших сил Ph_{\max} и Px_{\max} при одинаковой подаче, но боковая сила Pv_{\max} , наоборот, парадоксально даже немного больше при меньшем диаметре фрезы 8 мм, (рис. 8). По нашему мнению это связано с тем, что доминирующая доля боковой силы Pv возникает от контакта задней поверхности зуба фрезы и округлённой режущей кромки с поверхностью резания, особенно при малой глубины резания $t < 0,1d$ и в начале резания, а при обоих диаметрах эти величины примерно одинаковы.

Заключение

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. При концевом фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM, предпочтительнее использовать твёрдосплавную фрезу диаметром более 8 мм. Нежелательно увеличивать количество зубьев фрезы, т.к. это может привести к забиванию стружечной канавки из-за недостаточного её объёма, особенно при подаче более 150 мм/мин. Для фрез диаметром менее 12 мм желательно применять фрезы с 4-мя зубьями.

2. При фрезеровании твёрдосплавными концевыми фрезами диаметром 8 мм и менее происходит интенсивный износ по задней поверхности, но даже незначительный износ по задней поверхности приводит к существенному ухудшению качества обработанной поверхности, т.к. металл начинает интенсивно прилипать и к фаске износа, и к режущей кромке на передней поверхности.

3. Необходимо применять только встречное фрезерование, т.к. при попутном фрезеровании происходят рывки стола даже при небольшой подаче $S_{\min} > 80$ мм/мин, и сила подачи увеличивается в 6 раз по сравнению со встречным фрезерованием. Направление подачи вдоль и поперёк направления подачи при синтезе влияет на величину составляющих сил резания.

4. По возможности использовать небольшую глубину фрезерования $t \leq 1$ мм и увеличивать производительность обработки за счёт увеличения ширины фрезерования B , а не за счёт глубины фрезерования. Минутная подача для фрез диаметром 12 мм должна быть не более 120 мм, в противном случае существенно ухудшается качество обработанной поверхности, и в первую очередь вертикальной, образуемой главными режущими кромками на периферии фрезы;

5. При увеличении скорости резания уменьшаются составляющие силы резания, но её увеличение более 50 м/мин может привести к привариванию стружки к стружечной

канавке. Увеличить производительность обработки можно за счёт увеличения скорости резания до 50 м/мин и увеличения при этом минутной подачи до 120...150 мм/мин.

6. Осевая сила иногда принимает отрицательное значение, что может привести к поднятию заготовки из приспособления, поэтому при обработке небольших и маложёстких заготовок необходимо предусмотреть дополнительный надёжный прижим заготовки сверху, т.к. её закрепление только по боковым поверхностям часто оказывается недостаточным.

7. Сила подачи может достигать 3000 Н и более при фрезеровании твердосплавной фрезой диаметром 12 мм при ширине фрезерования 7 мм, глубине фрезерования 1 мм, частоте вращения фрезы 315 об/мин и подаче 200 мм/мин, т.е. удельная сила резания при сечении среза $V \times t$ равна 428 Н/мм².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шемонаева Е.С., Гончаров А.В., Андреев В.Д. Оценка целесообразности применения аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 12. С. 1–9. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2136

2. Арляпов А.Ю., Волков С.Ю., Прوماхов В.В. Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением $NiTi-TiB_2$, полученного лазерным спеканием // Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты). 2021. Том 23. №1. С. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32

3. Васильков Д.В., Кочина Т.Б. Силы резания при высокоскоростной обработке сплавов на никелевой основе инструментами из минералокерамики // Металлообработка. 2011. №4. С. 10–13.

4. Качан А.Я., Панасенко В.А., Мозговой С.В. Особенности применения твердосплавного инструмента при токарной обработке дисков авиационных ГТД на станках с ЧПУ // Вестник двигателестроения. 2006. №1. С. 130–135.

5. Krzysztof Jarosz, Kaushalendra V. Patel, Tuğrul Özel Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 111. P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>.

6. Andrea Abeni, Dario Loda, Tuğrul Özel, Aldo Attanasio Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625 // Production Engineering.

2020. V. 14. P. 613–627. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-00980-x>

7. Кривоухов В.А., Егоров С.В., Брунштейн Б.Е. Обрабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов. М.: МАШГИЗ, 1961. 245 с.

8. Pragat Singh, Jagwant Singh, J. S. Durej. Performance Evaluation of Milling of Inconel-625 Under Minimum Quantity Lubrication // Journal for manufacturing science production. 2016. V. 16. Iss. 1. P. 61–68. <https://doi.org/10.1515/jmsp-2015-0019>

9. Kaushalendra Patel, Jixiong Fei, Guoliang Liu, Tuğrul Özel. Milling investigations and yield strength calculations for nickel alloy Inconel 625 manufactured with laser powder bed fusion process // Production Engineering. 2019. V. 13. P. 693–702. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00922-2>.

10. J.G. Choi, M.-Y. Yang In-process prediction of cutting depths in end milling // International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 705–721. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00067-4).

11. Бабаев А.С., Козлов В.Н., Семёнов А.Р. Исследование сил резания и обрабатываемости при фрезеровании порошковой коррозионно-стойкой стали, полученной по технологии прямого лазерного выращивания (LMD) // Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты). 2024. Том 26. №2. С. 38–56. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-38-56

12. Болтрушевич А.Е., Мартюшев Н.В., Козлов В.Н. Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча // Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты). 2024. Том 26. №4. С. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217

REFERENCES

1. Shemonaeva E.S., Goncharov A.V., Andreev V.D. Feasibility evaluation of using additive technologies in aerospace products. // Engineering Journal: Science and Innovation. 2021, №. 12. pp. 1–9. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2136

2. Arlyapov A.Yu., Volkov S.Yu., Promakhov V.V. Investigation of the machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB₂ composite // Metalworking (technology-equipment-tools). 2021. vol. 23. №. 1. pp. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32

3. Vasilkov D.V., Kochina T.B. Cutting forces during high-speed treatment of nickel-based alloys with mineral ceramics tools // Metalworking. 2011. №. 4. pp. 10–13.

4. Kachan A.Ya., Panasenkov V.A., Mozgovoy S.V. Features of the use of carbide tools in turning discs of aviation gas turbine engines on CNC machines // Bulletin of Engine Engineering. 2006. №. 1. pp. 130–135.

5. Krzysztof Jarosz, Kaushalendra V. Patel, Tuğrul Özel Mechanistic force modeling in finish face milling of

additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 111. P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>.

6. Andrea Abeni, Dario Loda, Tuğrul Özel, Aldo Attanasio Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625 //Production Engineering. 2020. V. 14. P. 613–627. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-00980-x>

7. Krivoukhov V.A., Egorov S.V., Brunstein B.E. Machinability by cutting heat-resistant and titanium alloys. Moscow: MASHGIZ, 1961. 245 p.

8. Pragat Singh, Jagwant Singh, J. S. Durej. Performance Evaluation of Milling of Inconel-625 Under Minimum Quantity Lubrication // Journal for manufacturing science production. 2016. V. 16. Iss. 1. P. 61–68. <https://doi.org/10.1515/jmsp-2015-0019>

9. Kaushalendra Patel, Jixiong Fei, Guoliang Liu, Tuğrul Özel. Milling investigations and yield strength calculations for nickel alloy Inconel 625 manufactured with

laser powder bed fusion process // Production Engineering. 2019. V. 13. P. 693–702. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00922-2>.

10. J.G. Choi, M.-Y. Yang In-process prediction of cutting depths in end milling // International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 705–721. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00067-4).

11. Babaev A.S., Kozlov V.N., Semenov A.R. Investigation of cutting forces and machinability during milling of corrosion-resistant powder steel produced by laser metal deposition (LMD) // Metalworking (technology-equipment-tools). 2024. vol.26. №. 2. pp. 38–56. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-38-56

12. Boltrushevich A.E., Martyushev N.V., Kozlov V.N. The structure of inconel 625 habitus obtained by electric arc welding and surfacing using an electron beam // Metalworking (technology-equipment-tools). 2024, Vol. 26. №. 4. pp. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217

Вклад авторов: А. Бабаев, В. Козлов – идея; А. Семёнов, В. Овчаренко, И. Бельчиков – сбор материала; А. Бабаев, В. Козлов, А. Семёнов, И. Бельчиков – постановка эксперимента; А. Бабаев, В. Козлов, В. Овчаренко – анализ результатов; А. Бабаев, В. Козлов, В. Овчаренко – написание статьи; А. Бабаев, В. Козлов – научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: A. Babaev, V. Kozlov – idea; A. Semenov, V. Ovcharenko, I. Belchikov – collection; A. Babaev, V. Kozlov, A. Semenov, I. Belchikov – setting up an experiment; A. Babaev, V. Kozlov, V. Ovcharenko – analysis of the results; A. Babaev, V. Kozlov, V. Ovcharenko – copywriting; A. Babaev, V. Kozlov – scientific edition.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 04.02.2025; approved after reviewing 21.02.2025; assepted for publication 10.03.2025.