

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №9 (171). С.19-30.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №9 (171). P.19-30.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-19-30

Морфология стружки и механизм износа рабочих площадок твёрдосплавной концевой фрезы при обработке сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM

Артём Сергеевич Бабаев¹, К.Т.Н.

Виктор Николаевич Козлов², К.Т.Н.

Николай Леонидович Савченко³, Д.Т.Н.

Валерия Алексеевна Овчаренко⁴, М.Н.С.

Иван Алексеевич Бельчиков⁵, М.Н.С.

Артём Романович Семёнов⁶, М.Н.С.

^{1, 2, 4, 5, 6} Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения РАН, 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 savnick@ispms.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8254-5853>

⁴ vy.gornova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4797-5604>

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

⁶ artems2102@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований морфологии стружки и механизма износа, возникающих при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). Образец был получен из проволоки на экспериментальной установке с применением отработанных технологических режимов. С использованием аттестованного аналитического оборудования произведено изучение микроструктуры и физико-механических характеристик образца из инконель 625. В качестве режущего инструмента были использованы твёрдосплавные концевые фрезы, обработка велась без смазочно-охлаждающей жидкости по схеме встречного фрезерования поперёк направления синтеза при аддитивном производстве. В ходе экспериментов отбирали стружку, которую затем исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и оборудования для рентгеноструктурного анализа (РСА). Наблюдением и анализом внешнего вида стружки при различных увеличениях отмечено изменение её формы и увеличение степени пластической деформации в зависимости от интенсификации режимов резания. Подробное исследование на СЭМ прирезочной стороны стружки показало, что с повышением режимов резания наблюдается усиленный перенос зёрен инструментального материала WC на поверхность стружки, что является показателем ускоренного износа и преждевременного выхода из строя режущих кромок за счёт разупрочнения кобальтовой связки. Также при изучении режущих кромок фрезы методом РСА были обнаружены сложный карбид Cr₂₃C₆ и интерметаллид NiW, которые приводят к интенсификации износа рабочих площадок фрезы. Изучение особенностей износа рабочих площадок режущих инструментов и формируемой в процессе обработки стружки позволяет выработать рекомендации по повышению износостойкости и определению рациональных режимов эксплуатации.

Ключевые слова: EBAM, фрезерование, инконель 625, стружка

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., Савченко Н.Л., Овчаренко В.А., Бельчиков И.А., Семёнов А.Р. Морфология стружки и механизм износа рабочих площадок при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM // Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 19–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-19-30

Chip morphology and wear process of the operating floor of a carbide end mill in the treatment operation of inconel 625 alloy obtained through EBAM additive technology

Artyom S. Babaev¹, PhD Eng.
Viktor N. Kozlov², PhD Eng.
Nikolai L. Savchenko³, PhD Eng.
Valeria A. Ovcharenko⁴, JRF
Ivan A. Belchikov⁵, JRF
Artem R. Semenov⁶, JRF

^{1, 2, 4, 5, 6} Tomsk State University, Tomsk, Russia;

³ Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

¹ a.s.babaev@mail.tsu.ru

² kozlov-viktor@bk.ru

³ savnick@ispms.ru

⁴ vy.gornova@yandex.ru

⁵ ivan70422@gmail.com

⁶ artem2102@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results obtained in experimental studies of chip morphology and wear process that occur during milling of inconel 625 alloy obtained through additive technology Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). The sample was obtained from a wire in a pilot installation using proven technological modes. The microstructure and physical and mechanical characteristics of the inconel 625 sample were studied using certified analytical equipment. Carbide end mills were used as a cutting tool, machining was carried out with no coolant according to the counter milling operation across the synthesis direction in additive manufacturing. During the experiments, chipping was selected, which was examined after that using a scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction analysis (XRD) equipment. Observation and analysis of chipping at various magnifications showed a change in its shape and an increase in the degree of yield strain depending on the intensification of cutting modes. A detailed study with the help of SEM for the cutting side of the facing showed that with increasing cutting modes, increased grain transfer of WC tool material to the facing surface is observed. This is an indicator of accelerated wear and premature failure of the cutting edges due to softening of the cobalt binding agent. Also, when studying cutting edges of the milling cutter using the XRD method, complex Cr₂₃C₆ carbide and NiW intermetallic compound were found. They contribute to increased wear on the milling cutter operating floors. The study of the wear characteristics of the operating floors of cutting tools and facing formed within machining operation allows making recommendations for improving wear resistance and determining rational operating modes.

Keywords: EBAM, milling, inconel 625, chipping/facing

Acknowledgments: 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., Savchenko N.L., Ovcharenko V.A., Belchikov I.A., Semenov A.R. Chip morphology and wear process of the operating floor of a carbide end mill in the treatment operation of inconel 625 alloy obtained through EBAM additive technology / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 19–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-19-30

Введение

Технология аддитивного электро-лучевого производства заготовок (Electron beam additive manufacturing, далее – EBAM) из проволоки имеет широкое распространение среди класса методов прямого подвода энергии и материала из-за технологической простоты реализации процесса [1]. Основной принцип работы заключается в выращивании образцов, например, из проволоки, где в качестве

источника нагрева используется электронный пучок. Высокая стабильность интенсивности мощности пучка позволяет расплавлять проволоку, подаваемую в зону нагрева [2, 3]. Технология EBAM широко применяется в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, двигателе- и автомобилестроение [4]. Однако сложные явления, возникающие из-за колебаний полей температуры и, как следствие, меняющиеся условия течения

расплава, сказываются на нерегулярности микроструктуры, формирующейся при дальнейшей кристаллизации [5]. Это приводит к неизбежному формированию анизотропии характеристик. Высокая твердость, низкая теплопроводность и неоднородные физико-механические характеристики, получаемые в процессе ЕВАМ, представляют значительные проблемы для дальнейшей обработки заготовок с использованием субтрактивных методов лезвийной обработки, таких как точение, сверление, фрезерование [6, 7].

Суперсплавы на основе никеля обладают хорошей термостойкостью и, следовательно, сохраняют высокую прочность, твердость, вязкость и коррозионную стойкость при повышенных температурах [8, 9]. В процессе обработки низкая теплопроводность приводит к тому, что температура резания передней поверхности достигает 1200 °С и более [10]. Более того, химическое сродство материалов и высокая твердость карбидов, входящих в состав никелевых сплавов, усиливают износ инструмента и влияют на качество заготовки [11, 12]. Суперсплавы на основе никеля обычно обрабатываются при скоростях резания не более 50...100 м/мин с использованием инструментов из твердого сплава без покрытия [12]. Например, авторы работы [13] провели экспериментальное исследование высокоскоростного сухого точения Inconel 718 твердосплавным инструментом (K20) и обнаружили, что износ инструмента в основном был обусловлен абразивным износом и пластической деформацией при увеличении скорости резания с 40 до 50 м/мин. Сцепляющийся слой, образованный на поверхности инструмента, предотвращал абразивный износ, но усиливал износ, вызванный диффузией элементов.

Целью работы является описание особенностей формирования морфологии стружки и наблюдений износа режущих кромок твердосплавных (система WC-Co) концевых фрез, возникающего при фрезеровании сплава инконель 625, полученного методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии.

Материалы и методы

Образец для проведения исследований был получен по аддитивной технологии ЕВАМ на лабораторной установке. В качестве исходного материала использовали проволоку диаметром 1,2 мм марки OKAutrodNiCrMo-3

фирмы ESAB (Швеция). Образец получали на листе толщиной 5 мм из стали марки 12X18H10T, служащим в качестве подложки. Режимы синтеза были подобраны экспериментальным путём с учётом ранее проведённых исследований [14]. В данном случае ускоряющее напряжение составляло 30 кВ, а ток электронного луча 60 мА. Сфокусированный луч перемещался по круговой развертке диаметром 6 мм, а скорость печати (перемещение стола с подложкой) составляла 300 мм/мин. Таким образом, был получен образец-заготовка, из которого путём электроэрозионной проволоочной резки получали образец 50×50×16 мм (рис. 1).

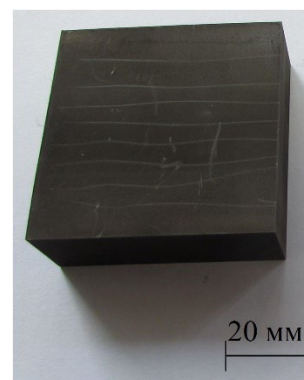


Рис. 1. Образец после электроэрозионной резки

Fig. 1. Sample after electroerosion cutting

В процессе проведения работ по фрезерованию на различных режимах отбирали стружку, изношенные фрезы и их осколки, которые затем исследовали с применением методов рентгеноструктурного анализа (РСА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Идентификация фаз заготовки и фрез в исходном состоянии, а также на поверхности стружки и отработанных режущих кромок фрез выполнялась на рентгеновском дифрактометре модели ДРОН-8Н фирмы НПП «Буревестник» (г. Санкт-Петербург) с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ с шагом $0,05^\circ$ и временем выдержки 20 с на шаг. Получение снимков с высоким контрастом и разрешением проводили на растровом электронном микроскопе модели MIRA 3 LMU фирмы Tescan (Чехия), оснащённым приставкой для энергодисперсионного микроанализа (EDX) с безазотным детектором мод. Ultim MAX 40. Для определения микроструктуры, химического состава и свойств

исходного образца использовали стандартизованные методики пробоподготовки, а также аналитическое оборудование: металлографический микроскоп моели. AxioObserver A1.m фирмы Carl Zeiss (Германия); портативный рентгено-флуоресцентный анализатор S1 TITANSPX фирмы Bruker (США); стационарный микротвердомер Durascan-10 и универсальную испытательную машину 50ST фирмы Tinius Olsen (США).

В качестве режущего инструмента использовались твёрдосплавные концевые фрезы У608 12-18-74-1, производства компании ООО «ПК МИОН» (г. Томск). Инструменты были

изготовленные из твёрдого сплава марки Н10F ($\approx 89,4$ % масс. WC, до 0,6 % масс. смешанных карбидов и около 10,0 % масс. Со в качестве связки; размер зерна карбидной фазы 0,5...0,6 мкм, предел прочности при изгибе ≈ 3200 МПа, а твёрдость HRA 92 без покрытия).

Работы по фрезерованию проводили на фрезерном станке мод. DMU 50 фирмы DMG MORI (Япония) без подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Фрезерование выполняли поперёк направления подачи, заданной при получении образца по аддитивной технологии. Использовали схему встречного фрезерования (рис. 2).

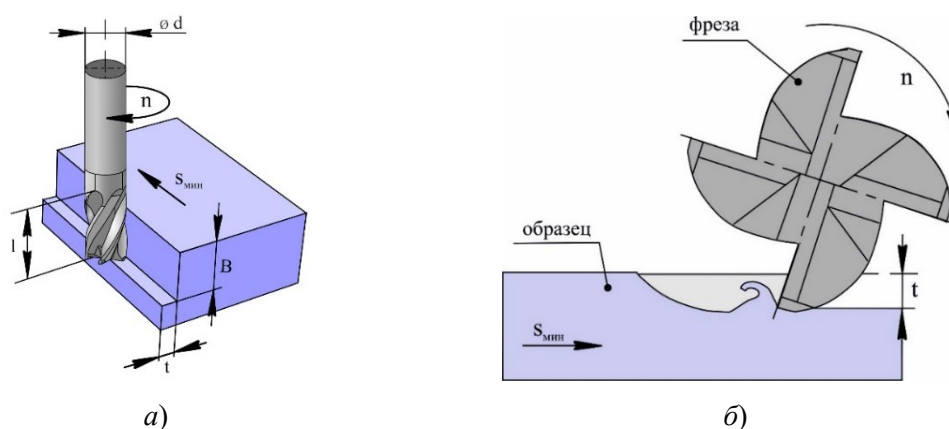


Рис. 2. Схематическое изображение параметров фрезерования:

а – аксонометрическая проекция; б – вид сверху

Fig. 2. Diagramming of milling parameters:

а – axonometric projection; б – top view

Принятые в настоящей работе режимы фрезерования, указанные в таблице 1, были получены опытным путём в ходе проведения предварительных работ. Ограничением в

выборе режимов являлась преждевременная поломка зубьев или самих фрез при работе в течение первых 10 с.

1. Режимы фрезерования инконель 625

1. Inconel 625 milling modes

№ опыта	Частота вращения фрезы n , об/мин	Скорость резания v , м/мин	Минутная подача $S_{\min}$, мм/мин	Глубина резания t , мм	Ширина резания B , мм	Объём срезанной стружки 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

Отбор стружки в зависимости от режимов фрезерования осуществляли после наступления установившегося резания, т.е. вхождения всех зубьев фрезы в образец. Отбор изношенных фрез или осколков их рабочих элементов осуществляли в случае смены режима обработки, а также при поломке в ходе испытаний на режимах, близких к критическим.

Результаты и обсуждение

Фазовый состав образца, полученного по аддитивной технологии ЕВАМ, представлен на рис. 3. Пики дифракции, наблюдаемые при $43,5^\circ$, $50,5^\circ$, $74,5^\circ$ и $90,5^\circ$ на рентгенограмме образца инконель 625 в состоянии до фрезерования соответствуют кристаллографическим плоскостям (111), (200), (220) и (311) твердого раствора γ -Ni. Таким образом, γ -Ni является базовой фазой образца.

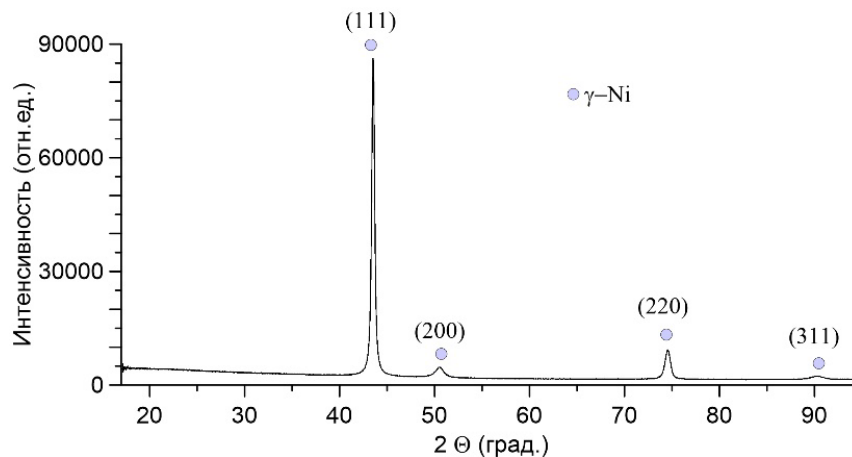


Рис. 3. Рентгенограмма образца инконель 625 в состоянии до фрезерования

Fig. 3. X-ray image of the inconel 625 sample in the pre-milling state

Фазовый состав режущих кромок новой фрезы представлен двумя фазами: WC и Co (рис. 4).

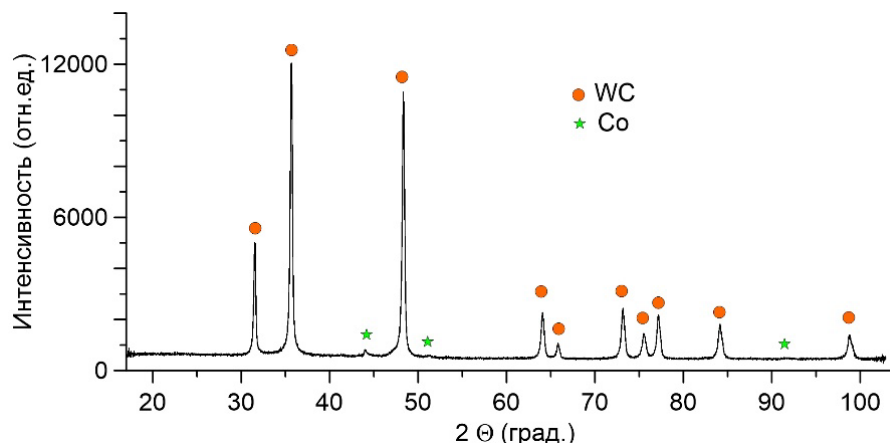
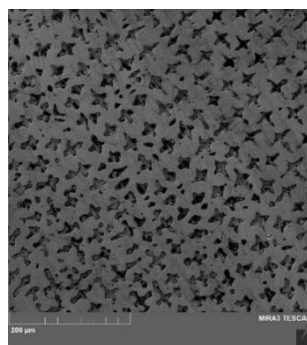


Рис. 4. Рентгенограмма поверхности режущих кромок фрезы до фрезерования

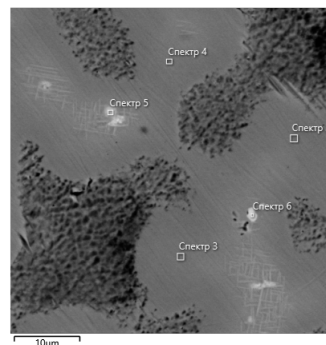
Fig. 4. X-ray of the surface of the milling cutter edges before milling

Фрагмент микроструктуры и карты распределения химических элементов в образце из инконель 625 в исходном состоянии показан на

рис. 5. Темные области на рис. 5 а, б являются границами дендритов γ -Ni, появившиеся после химического травления.



а)



б)

Рис. 5. Фрагмент микроструктуры образца инконель 625:

а – 500×500 мкм; б – 50×50 мкм

Fig. 5. Microstructure fragment of inconel 625 sample:

а – 500×500 microns; б – 50×50 microns

Результаты химического анализа подтверждают соответствие синтезированного образца сплаву марки ХН75МБТЮ (аналог инконель 625) по требованиям, предъявляемым ГОСТ 5632-2014 «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки».

Механические свойства заготовки инконель 625 после испытаний на растяжение образцов, вырезанных перпендикулярно направлению аддитивного послойного выращивания, приведены в таблице 2.

2. Некоторые механические свойства образца из инконель 625

2. Some mechanical properties of a sample made of Inconel 625

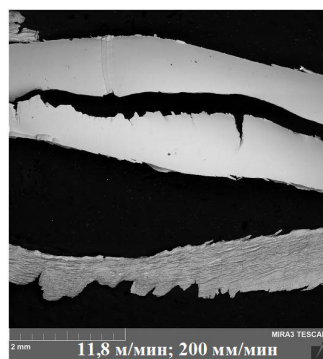
Предел выносливости σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Твёрдость HV, МПа
640 ± 20	144 ± 14	56 ± 3	200...246

Рассмотрим подробнее микрофотографии и морфологию характерных стружек

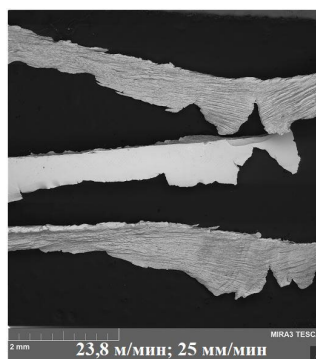
(рис. 6), полученных при фрезеровании на режимах из табл. 1.



а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Микрофотографии стружек, полученных на различных режимах фрезерования

Fig. 6. Micrographs of facing obtained in various milling modes

При малой скорости резания 11,8 м/мин ($n = 315$ об/мин) при минутной подаче 25 мм/мин (подача на зуб $S_z = 0,02$ мм/зуб) происходит образование стружки длиной $l_{\text{стр}} \approx 0,3$ мм, измеряемой в поперечном направлении перпендикулярно к главной режущей кромке зуба фрезы (рис. 6, а). По ширине стружка делится на достаточно длинные части ($b_{\text{стр}} \approx 4,5$ мм), но которые меньше ширины фрезерования $B = 7$ мм и длины контакта зуба фрезы с вертикальной поверхностью ($l_{\text{конт.полн}} = \frac{B}{\sin \omega} = 10,9$ мм). Эта ширина стружки определяется длиной контакта главной режущей кромки с вертикальной поверхностью заготовки углом наклона винтовой канавки фрезы $\omega = 40^\circ$, величиной подачи на зуб S_z при небольшой глубине фрезерования $t = 1$ мм, что приводит к уменьшению ширины контакта с одним зубом с шириной фрезерования B до $b_{\text{стр}}$ (рис. 7).

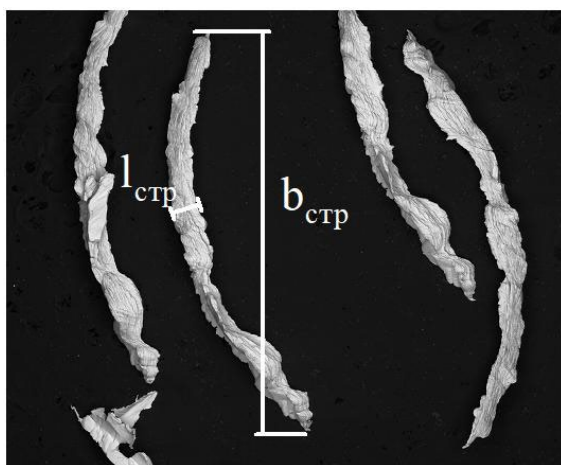


Рис. 7. Схемы для определения основных параметров стружки

Fig. 7. Diagrams for determining the main parameters of facing

При увеличении минутной подачи до 200 мм/мин (подача на зуб $S_z = 0,159$ мм/зуб) происходит образование более длинной стружки $l_{\text{стр}} \approx 1$ мм, а ширина увеличивается до $b_{\text{стр}} \approx 10$ мм (рис. 6, б). По ширине стружка не делится на части, но на некоторых стружках появляются глухие трещины, предшествующие разделению стружки на части по

ширине.

При увеличении скорости резания до 23,8 м/мин ($n = 630$ об/мин) при малой минутной подаче 25 мм/мин (подача на зуб при этом уменьшается до $S_z = 0,01$ мм/зуб) происходит образование стружки длиной $l_{\text{стр}} \approx 0,55$ мм (рис. 6, в), что в 1,8 раза больше, чем при той же подаче, но с меньшей скоростью резания 11,8 м/мин (рис. 6, а). Это явление увеличения длины стружки при уменьшении подачи на зуб может быть объяснено увеличением пластичности обрабатываемого материала инконель 625 в зоне резания вследствие увеличения температуры, вызванного увеличением скорости резания в 2 раза. Если при меньшей скорости резания стружка сворачивается в трубочку (что затрудняет измерение её истинной длины, но облегчает её удаление из зоны резания), то с увеличением скорости резания этого уже не происходит. По ширине стружка имеет глубокие глухие трещины, но деление её на отдельные части ещё не наблюдается.

При увеличении минутной подачи до 200 мм/мин при скорости резания 23,8 м/мин (подача на зуб $S_z = 0,08$ мм/зуб) происходит образование более длинной стружки $l_{\text{стр}} \approx 1,55$ мм, а по ширине стружка делится на отдельные почти одинаковые части длиной 0,6 мм, слабо связанные между собой (рис. 6, г). Такое явление может вызывать уменьшение силового взаимодействия с передней поверхностью зуба фрезы. Но увеличение стружки по длине и исчезновение явления её скручивания вызывает ухудшение размещения стружки в стружечной канавке, что при дальнейшем увеличении скорости резания или подачи приводит к пакетированию стружки в стружечной канавке, привариванию её к передней поверхности и выходу инструмента из строя [15].

Сторона стружки, обратная прирезочной, представляет собой типичную складчатую картину, формирующуюся при значительной пластической деформации (рис. 8). Наблюдается тенденция к увеличению складчатости с ростом скорости резания и подачи.



а)



б)

Рис. 8. Микрофотографии СЭМ стружки:

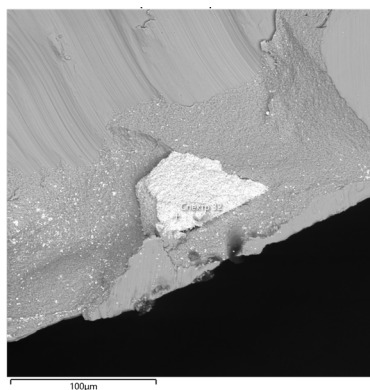
а – образование складчатых структур; б – формирование и развитие магистральной трещины

Fig. 8. Micrographs of SEM facing:

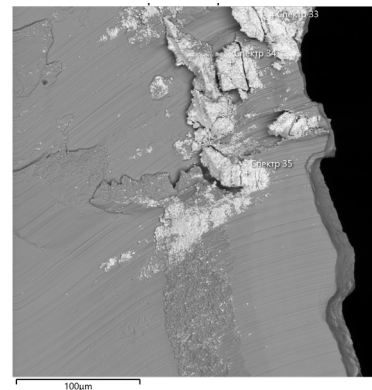
а – formation of folded structures; б – formation and development of the main crack

При рассмотрении поверхностей стружек на СЭМ с применением EDX при больших увеличениях на прирезцовой стороне были обнаружены участки с содержанием зерен WC, внедрённых в поверхность (рис. 9). С увеличением режимов фрезерования на поверхности стружек обнаруживаются достаточно крупные

включения (до 120 мкм и более) частиц инструментального материала. Это косвенно указывает на адгезионно-усталостный износ, при котором высокие температуры и напряжения приводят к разупрочнению кобальтовой связки и переносу зёрен WC.



а)



б)

Рис. 9. Микрофотографии СЭМ и EDX прирезцовой поверхности стружки при скорости резания 23,8 м/мин и подаче 80 мм/мин (а) и 200 мм/мин и подаче 200 мм/мин (б)

Fig. 9. SEM and EDX micrographs of the chip cutting surface at a cutting speed of 23,8 m/min and a feed of 80 mm/min (а) and 200 mm/min and a feed of 200 mm/min (б)

РСА режущих кромок фрезы после фрезерования показал, что кроме исходных фаз WC и Co они содержат фазы, формирующиеся в результате термомеханического взаимодействия химических элементов фрезы с

элементами заготовки инконеля 625. Эти фазы включают в себя сложный карбид Cr_{23}C_6 и интерметаллид NiW (рис. 10, а), а также большое скопление налипшей стружки на рабочие площадки фрезы (рис. 10, б, в).

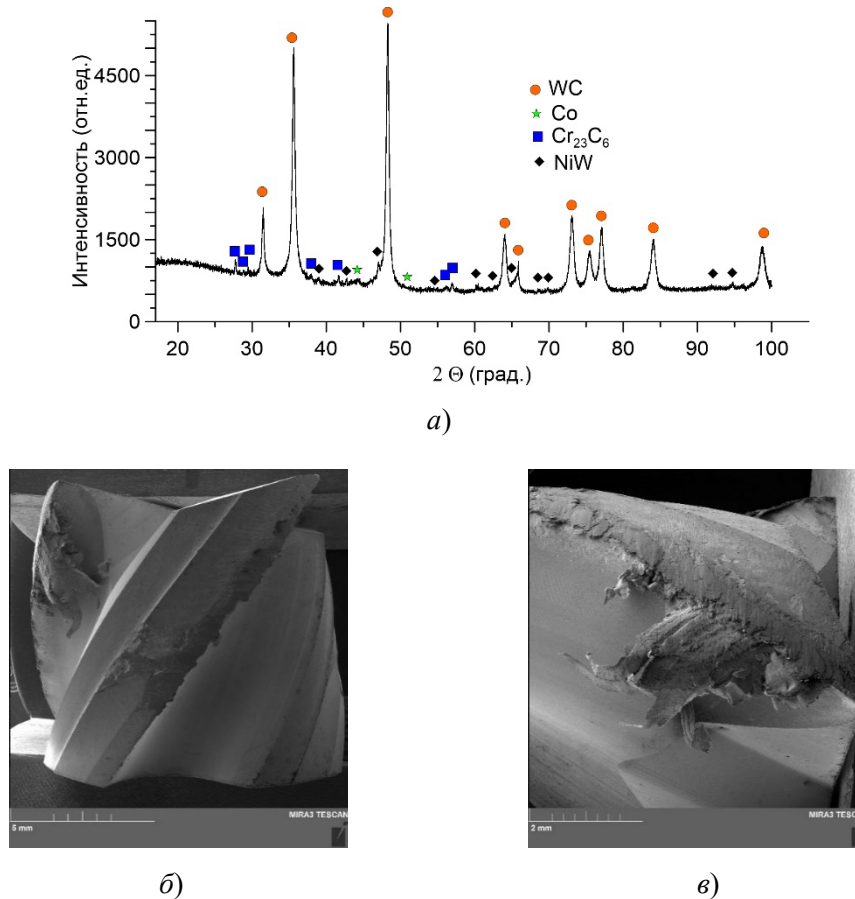


Рис. 10. Рентгенограмма (а) и микрофотографии СЭМ (б, в) режущих кромок фрезы после фрезерования

Fig. 10. X-ray (a) and SEM micrographs (b, c) of the cutting edges of the milling cutter after milling

Для исследований возможных структурно-фазовых превращений обрабатываемого материала при высоких температурах и деформациях проводили РСА стружки, полученной

при различных скоростях резания и подачах, а также обработанной поверхности образца (рис. 11).

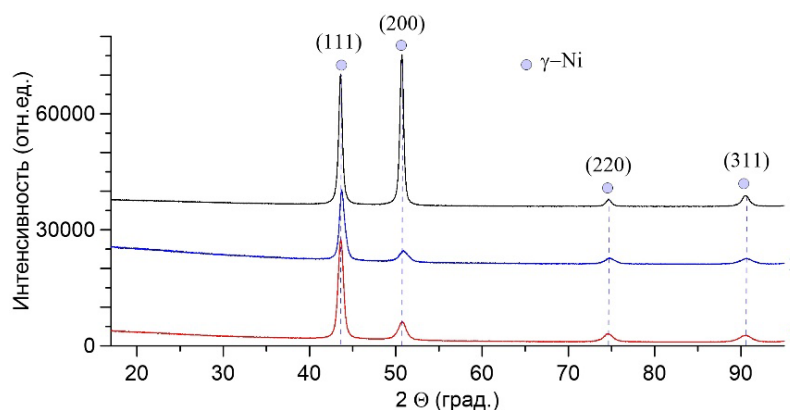


Рис. 11. Рентгенограммы:

1 – инконель 625 после фрезерования, 23,8 м/мин, 200 мм/мин; 2 – стружка, полученная при 11,8 м/мин, 200 мм/мин; 3 – стружка, полученная при 11,8 м/мин, 25 мм/мин

11. X-ray images:

1 – inconel 625 after milling, 23,8 m/min, 200 mm/min; 2 – chipping obtained at 11,8 m/min, 200 mm/min; 3 – chipping obtained at 11,8 m/min, 25 mm/min

На поверхности заготовки после фрезерования и в стружках, полученных при режимах 2 и 3 (рис. 11) методом РСА не было обнаружено формирования новых фаз по сравнению с исходным состоянием перед фрезерованием (рис. 3). Обращал на себя внимание тот факт, что рентгенографическая текстура, обусловленная текстурой вследствие роста дендритов, наблюдаемая в состоянии до фрезерования (рис. 3) и характерная для аддитивно выращенных никелевых сплавов [16], выражающаяся в предпочтительной ориентации плоскостей (111) γ -Ni, на обработанных фрезерованием поверхности и в стружке заметно уменьшается (рис. 11).

Традиционно, механизмы износа инструмента из твердого сплава без покрытия при обработке никелевых сплавов обсуждают в терминах трех видов износа: абразивного, адгезионного и окислительного [17].

При низкоскоростном резании абразивный износ является основным механизмом изнашивания инструмента, поскольку температура резания при ней относительно низкая и другие механизмы износа не возникают или являются незначительными. Канавки, параллельные направлению потока стружки на передней и боковой поверхности режущего инструмента, определяют морфологию механизма абразивного износа [18]. Ранее сообщалось, что механизм абразивного износа часто наблюдается при обработке суперсплавов на основе никеля [19]. Этот износ вызывается твердыми частицами (карбидами и оксидами) в Inconel 625, создавая ряд канавок (царапин) на поверхности инструмента. Подобно механизму износа передней поверхности, абразивный износ задней поверхности вызывается сильным трением между твердыми частицами с обработанной поверхности. Одновременно с этим, высокотемпературный окислительный износ может снижать производительность материала инструмента и усугублять абразивный износ инструмента.

Адгезионный износ имеет место, когда высокое давление и повышенная температура на границе раздела инструмент-стружка на передней поверхности вызывают пластическую деформацию и формируют новые поверхности. Атомы двух поверхностей адсорбируются и

объединяются друг с другом, образуя точку сцепления. Точка сцепления на двух поверхностях трения нарушается относительным движением инструмента и заготовки. Зерно или группа зерен сдвигается или вытягивается другой стороной и приводит к износу из-за сцепления. По словам Астахова, пластическая деформация режущего инструмента происходит из-за деформации ползучести при высокой температуре [20], и эта пластическая деформация больше в кобальтовой связке, поскольку она не выдерживает высокие температуры ползучести [21]. Размягчение кобальтовой связки вызывает отрыв зерен карбида вольфрама из твердосплавного инструмента. Наличие элементов W, Co, Ni и Cr в прирезцовой поверхности стружки (рис. 9), появление новых фаз в виде $Cr_{23}C_6$ и NiW на режущих кромках фрезы WC-Co после фрезерования (рис. 10) показывает, что процесс резания сопровождается адгезионным взаимодействием между элементами материала заготовки инконеля 625 и структурными элементами материала режущего инструмента. Зерно или группа зерен режущего инструмента перемещается под действием силы сцепления, что значительно влияет на прочность режущей кромки и приводит к ее поломке. Таким образом, параметры резания следует выбирать тщательно, чтобы снизить адгезионный износ.

Окислительный износ возникает обычно в том случае, когда в процессе резания зона контакта имеет сильное трение (высокий коэффициент трения) и генерирует большое количество тепла. Низкая теплопроводность Inconel 625 приводит к высокой температуре в паре «инструмент – стружка». Co и WC в твердосплавном инструменте реагируют с O_2 в воздухе, образуя оксиды (такие как CoO, WO_3 и Co_3O_4), которые снижают производительность инструмента и вызывают его износ [22]. Анализ энергетического спектра EDX не обнаружил наличия кислорода (рис. 9), а РСА не обнаружил кислородсодержащих фаз на режущих кромках фрезы после фрезерования (рис. 10), что свидетельствует о незначительной роли окислительного механизма износа материала режущего инструмента в настоящем исследовании.

Закключение

В процессе изучения морфологии стружки и износа рабочих площадок твёрдосплавной концевой фрезы были определены доминирующий механизм адгезионно-усталостного износа, а также новые фазы, образующиеся в процессе резания в виде налипov на поверхность инструмента. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что однозначное появление новых фаз (Cr_{23}C_6 и NiW) в ходе фрезерования характерно только для режущих кромок фрезы WC-Co. На фрезерованной поверхности и в стружках обрабатываемого материала инконеля 625 рентгеноструктурный анализ фиксирует только структурные изменения (без появления новых фаз), такие как уменьшение рентгенографической текстуры, уширение пиков, характерные для процессов сильной пластической деформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Khanna N., Raval P., Patel D. et al. Assessment of additive and subtractive sustainable manufacturing of Inconel 625 // Tribology International. 2023. Vol. 186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108655>.
2. Filippov A., Shamarin N., Moskvichev E., Savchenko N., Kolubaev E., Khoroshko E., Tarasov S. Heat input effect on microstructure and mechanical properties of electron beam additive manufactured (EBAM) Cu-7,5 wt. % Al bronze // Materials. 2021. Vol. 14. No 22. P. 6948. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14226948>.
3. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z, Chumaevskii A.V., Dvilis E.S., Strelkova I.L., Drobyaz E.A., Yaremenko O.B., Kuranov A.E. Elastic modulus and hardness of Ti alloy obtained by wire-feed electron-beam additive manufacturing. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) Metal Working and Material Science, 2023. vol. 25. no. 4. pp. 180–201. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-180-201.
4. Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Kolubaev E.A., Tarasov S.Yu. Use of impact treatment for structural modification and improvement of mechanical properties of CuAl7 bronze obtained by electron beam additive manufacturing (EBAM) // Russian Physics Journal. 2023. Vol. 65. No. 11. P. 2016–2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02864-w>.
5. Yu M., Zhu L.D., Yang Z.C., et al. A novel data-driven framework for enhancing the consistency of deposition contours and mechanical properties in metal additive manufacturing // Computers in Industry. 2024. Vol. 163. P. 104154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combind.2024.104154>.
6. Jia T., Zou B., Liu W., et al. Effect of process parameters on mechanical properties of Inconel718 superalloy fabricated by directional energy deposition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 128. No. 7–8. P. 2863–2883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10854-y>.
7. Khanna N., Patel D., Raval P. et al. Comparison of sustainable cooling/lubrication strategies for drilling of wire arc additively manufactured Inconel 625 // Tribology International. 2024. V. 200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110068>.
8. Yao J., Zhao G., Niu X., Zhang R., Zhang J. Wear mechanism and underground structure of Inconel 625 nickel-based alloy sliding against WC-Co in seawater // Wear. 2024. Vol. 546–547. P. 205365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205365>.
9. Pervaiz S., Rashid A., Deiab I., Nicolescu M. Influence of tool materials on machinability of titanium- and nickel-based alloys: a review // Materials and Manufacturing Processes. 2014. Vol.29. P. 219–52. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880460>.
10. Kitagawa T., Kubo A., Maekawa K. Temperature and wear of cutting tools in highspeed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn // Wear. 1997. Vol. 202. P. 142–148. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07255-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07255-9).
11. Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquere D., Zerrouki V., Vigneau J. A review of developments towards dry and highspeed machining of Inconel 718 alloy // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. Vol. 44. P. 439–456. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00159-7).
12. Upadhyay C., Singh Rajput S., Sateesh Kumar C., Gangopadhyay S., Kumar Sahoo S. Performance evaluation of WC, SiAlON and SiCw + Al_2O_3 tools in dry machining of Inconel 617 // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 109. P. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.006>.
13. Thakur D.G., Ramamoorthy B., Vijayaraghavan L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning // Materials & Design. 2009. Vol. 30. P. 1718–1725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.011>.
14. Kalashnikov K., Kalashnikova T. Development of a multimaterial structure based on CuAl9MN2 bronze and Inconel 625 alloy by double-wire-feed additive manufacturing // Metals. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 2048. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12122048>.
15. Rahman M. A., Rahman M., Woon K.S. Episodes of chip formation in micro-to-nanoscale cutting of Inconel 625 // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. Vol. 199. No.2. P. 106407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106407>.
16. Kocaman E., Gürol U., Günen A., Çam G. Effect of post-deposition heat treatments on high-temperature wear and corrosion behavior of Inconel 625 // Materials Today Communications. 2025. Vol. 42. P. 111101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111101>.
17. Liu E., An W., Xu Z., Zhang H. Experimental study of cutting-parameter and tool life reliability

optimization in inconel 625 machining based on wear map approach // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 53. P. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.006>.

18. **Yıldırım Ç., Sarıkaya M., Kıvak T., Şirin Ş.** The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625 // Tribology International. 2019. Vol. 134. P. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.027>.

19. **Akhtar W., Sun J., Sun P., Chen W., Saleem Z.** Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: a review // Frontiers in Mechanical Engineering. 2014. Vol. 9. P. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-014-0301-2>

20. **Astakhov V.P.** The assessment of cutting tool wear // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. Vol. 44. P. 637–647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006>

21. **Ayed Y., Germain G., Ammar A., Furet B.** Degradation modes and tool wear mechanisms in finish and rough machining of Ti17 Titanium alloy under high-pressure water jet assistance // Wear. 2013. Vol. 305. P. 228–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.018>

22. **Liu E.L., Liu X., Zhao L.G., Han J.D., Wang T.D., Liu X.L.** Oxidation resistance of tool material used for cutting Inconel 625 // Rare Metal Materials and Engineering. 2018. Vol. 47. P. 2192–2197.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: A. S. Babaev, V.N. Kozlov – the idea; A.P.Semenov, V.N. Kozlov, I.A. Belchikov – collection of material; A.S. Babaev; V.N. Kozlov, V.A. Ovcharenko, A.R. Semenov, I.A. Belchikov – setting up the experiment; A.S. Babaev, V.N. Kozlov, N.L. Savchenko, V.A. Ovcharenko – analysis of the results; A.S. Babaev, N.L. Savchenko – writing the article; A.S. Babaev, N.L. Savchenko – scientific editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 07.07.2025.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 30.06.2025; assepted for publication 07.07.2025.