



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Силы резания, морфология стружки и особенности износа режущих кромок при фрезеровании аддитивного Inconel 625 EBAM

Артём Бабаев^{a, *}, Виктор Козлов^b, Николай Савченко^c, Артём Семёнов^d, Роман Цыганков^e

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

^a <https://orcid.org/0000-0003-2334-1679>, temkams@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>, kozlov-victor@bk.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0001-8254-5853>, savnick@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>, artems2102@yandex.ru;
^e <https://orcid.org/0000-0002-2660-2312>, tsygankovrs@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 24 марта 2026
Рецензирование: 11 апреля 2026
Принята к печати: 14 апреля 2026
Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Inconel 625
Фрезерование
Аддитивные технологии
Силы резания
Стружка
Износ

Финансирование

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Сплавы на основе никеля, например Inconel 625, широко востребованы благодаря высокой жаропрочности и коррозионной стойкости. Однако их обработка резанием осложняется низкой теплопроводностью материала, склонностью к упрочнению и ускоренному износу инструмента. Аддитивные технологии позволяют получить заготовки, близкие к окончательной форме, но обрабатываемость таких материалов изучена недостаточно, особенно с учётом анизотропии свойств, вызванной условиями синтеза. В связи с этим исследование сил резания, объяснение морфологии стружки и описание причин износа инструмента при фрезеровании аддитивного Inconel 625 является актуальной задачей. **Методы и оборудование.** Образцы получены методом электронно-лучевого аддитивного производства (EBAM) из проволоки Inconel 625. Фрезерование проводилось твёрдосплавными концевыми фрезами без покрытия. Регистрация сил резания выполнялась с помощью трёхкомпонентного динамометра Kistler 9257BA. Микроструктура, морфология стружки и износ инструмента исследовали методами сканирующей электронной микроскопии с применением энергодисперсионного анализа и путём рентгеноструктурного анализа. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что при встречном фрезеровании силы резания линейно возрастают с увеличением минутной подачи. Скорость резания 23,8 м/мин снижает силы резания в сравнении с 11,9 м/мин, но приводит к росту длины стружки и ухудшению её удаления. Выявлена анизотропия обрабатываемости: силы резания вдоль направления синтеза превышают соответствующие значения при фрезеровании поперёк, что коррелирует с более высоким пределом текучести в продольном направлении. Длина стружки увеличивается с ростом подачи и скорости резания, достигая 1,55 мм при максимальных режимах, при этом стружка теряет скрученность и покрывается трещинами. Доминирующим механизмом износа является адгезионно-усталостный, подтверждённый наличием на прирезцовых поверхностях стружки части WC и образованием на режущих кромках фаз Cr₂₃C₆ и NiW. Окислительный износ не играет существенной роли. Рентгеноструктурный анализ показал снижение исходной кристаллографической текстуры в стружке и на обработанной поверхности, а также уширение пиков, свидетельствующее о сильной пластической деформации. **Выводы.** Определены рациональные режимы фрезерования (скорость резания от 11,9 до 23,8 м/мин, подача не более 200 мм/мин, глубина резания до 1 мм, ширина резания до 7 мм), обеспечивающие работоспособность инструмента. Превышение подачи 250 мм/мин приводит к катастрофическому разрушению режущих кромок. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологических рекомендаций по субтрактивной обработке деталей из аддитивного Inconel 625 EBAM.

Для цитирования: Силы резания, морфология стружки и особенности износа режущих кромок при фрезеровании аддитивного Inconel 625 EBAM / А.С. Бабаев, В.Н. Козлов, Н.Л. Савченко, А.Р. Семёнов, Р.С. Цыганков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 72–98. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-72-98.

Введение

Основное применение никелевого сплава Inconel 625 в агрессивных средах обусловлено его уникальной способностью противостоять комплексу разрушающих факторов, к которым относятся коррозия, усталость (в том числе вызванная теплосменой), эрозия и ползучесть, причем материал сохраняет эти свойства даже

*Адрес для переписки

Бабаев Артём Сергеевич, к.т.н., с.н.с.
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
пр-т Ленина, 36,
634050, г. Томск, Россия
Тел.: +7 952 805-09-26, e-mail: temkams@mail.ru

в условиях экстремального температурного воздействия. [1]. Сплавы на основе никеля считаются сложными для механической обработки. Они имеют тенденцию к упрочнению, низкую теплопроводность, высокую жаропрочность, а твердые абразивные частицы в их микроструктуре ускоряют износ режущих кромок [2–4]. Во время резания при взаимодействии между инструментом и заготовкой возникают сильные пластические деформации заготовки, которые усугубляются низкой теплопроводностью материала, создавая высокие силы резания и температуру. Такие силы и тепловые нагрузки при резании вызывают быстрый износ инструмента и снижают эффективность обработки материала [5, 6].

Указанные выше сплавы широко востребованы благодаря своим уникальным эксплуатационным свойствам. Благодаря высокой термостойкости они применяются в условиях критически высоких температур при работе, например, авиационных двигателей. Однако вопросы обработки резанием для формирования окончательных размеров, точности и шероховатости поверхностей являются актуальными и в настоящее время, особенно в связи с появлением новых принципов получения заготовок (прототипов) из жаропрочных сплавов. Рассмотрим подробнее результаты исследований эффективности обработки сплавов на основе никеля, полученных как традиционными способами, так и посредством аддитивных технологий.

В работах [7, 8] было исследовано фрезерование Inconel 625 с применением в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) смеси биоразлагаемых масел, а именно касторового и соевого масла в соотношении 1:1, с минимальным количеством СОЖ (MQL-технология). Авторы использовали моделирование для трех различных условий обработки, включая сухую обработку, минимальный поток СОЖ и одновременное распыление минимальной смеси СОЖ вместе с жидким диоксидом углерода и азотом. Результаты показали, что криогенное охлаждение вместе со смесью биоразлагаемых материалов обеспечивает наилучшие результаты при прочих условиях.

В исследовании [9] основное внимание уделяется оптимизации условий резания и численному анализу износа по задней поверхно-

сти при фрезеровании суперсплава Inconel 625 с использованием твердосплавных пластин с покрытием PVD AlTiN и CVD TiCN/Al₂O₃/TiN. Эксперименты по фрезерованию проводились на вертикальном обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) в соответствии с ортогональным массивом Taguchi. Моделирование износа инструмента методом конечных элементов выполнялось с использованием программного обеспечения Deform 3D. Для определения влияния условий фрезерования на износ по задней поверхности применялся дисперсионный анализ. Результаты показали, что скорость подачи является наиболее важным параметром, влияющим на износ. Для оценки результатов экспериментов использовался линейный и квадратичный регрессионный анализ. Результаты регрессионного анализа показали, что оценочные значения износа, рассчитанные с помощью модели квадратичной регрессии, были более эффективными по сравнению с моделью линейной регрессии. Статистический анализ показал, что метод Taguchi может быть использован для оптимизации параметров резания при фрезеровании Inconel 625.

К примеру, основная цель работы [10] – эмпирически установить и статистически оценить влияние режимов фрезерования на шероховатость поверхности Ra и износ по задней поверхности при фрезеровании Inconel 625. Результаты показывают, что более высокий коэффициент корреляции получен с помощью модели квадратичной регрессии со значением 0,97 как для Ra , так и для износа. Результаты проверки прекрасно согласуются с экспериментальными данными относительно шероховатости поверхности Ra и износа инструмента.

Детали, получаемые аддитивным способом, могут быть изготовлены в форме, близкой к окончательной, и обычно должны пройти только финишные операции для обеспечения допусков и шероховатости поверхности. Поскольку жаропрочные суперсплавы особенно трудно обрабатывать, то технологии аддитивного производства для изготовления заготовок представляют большой интерес. Однако детали, изготовленные аддитивным способом, демонстрируют иные свойства, чем их аналоги, изготовленные традиционным способом, включая различия в обрабатываемости в зависимости от направле-

ния синтеза. Моделирование силы резания для материалов, изготовленных аддитивным способом, должно быть разработано для правильного выбора стратегии обработки и параметров резания. В работе [11] предлагается механистическая модель для прогнозирования силы резания. Проверка выходных данных модели для толщины среза и площади поперечного сечения была выполнена с использованием 3D-CAD моделей среза. Было проведено углубленное экспериментальное тестирование для сбора данных о силе для целей моделирования и оценки. Проанализированы эффекты подачи, скорости резания, стратегии сканирования и ориентации режущего клина относительно заготовки. Сопоставление результатов моделирования с собранными экспериментальными данными показало хорошее соответствие результатов моделирования и эксперимента, что подтверждает обоснованность предложенной механистической модели для обработки материалов, полученных аддитивным способом.

В работе [12] описывается аналитическая модель силы резания, подходящая также для деталей, изготовленных с помощью аддитивного производства, которая учитывает наличие режимов резания с преобладанием сдвиговых напряжений. Процедура уточнения модели силы резания была определена и применена путем выполнения экспериментальной работы на образцах Inconel 625, изготовленных LaserCUSINGTM. Модель была успешно использована для прогнозирования того, как сила резания влияет на изменение параметров обработанной поверхности (шероховатость, микротвердость и др.).

В исследовании [13] выполнена оценка различных марок твердого сплава, скорости резания и подачи на зуб для определения рациональных условий торцевого фрезерования Inconel 625. Характеристики стойкости режущих инструментов и механизмы износа были проанализированы на основе результатов испытаний с использованием фрезы с твердосплавными режущими пластинами. Основные результаты показывают, что механизмы износа инструмента при фрезеровании Inconel 625 аналогичны тем, которые наблюдаются в других суперсплавах на основе никеля, таких как 718 и 713. Однако скорость износа ниже, и имеются свидетельства возникновения окислительного износа.

В исследовании [14] чистовая обработка при фрезеровании рассматривается как постобработка для улучшения поверхностных, механических и износостойких свойств образцов, изготовленных методом SLM. Это исследование показывает, что поверхностные и подповерхностные характеристики, такие как топография поверхности, шероховатость поверхности, микротвердость и износостойкость, существенно зависят от параметров фрезерования.

В работе [15] исследование сосредоточено на выявлении изменений шероховатости поверхности во время торцевого фрезерования Inconel 625 с мониторингом силы резания. Кроме того, исследуется влияние параметров обработки на силы резания и шероховатость поверхности. Исследование рассматривает пять уровней для каждого параметра резания, включая подачу, скорость резания и глубину резания. Для определения качества поверхности используются как временные, так и частотные характеристики данных о силе резания, собранных во время фрезерования. Применяются оптимизированные по Байесу модели опорных векторов и искусственные нейронные сети, затем проводится их сравнение. Модель опорных векторов достигла точности 99,61 %, в то время как модель с использованием нейронных сетей имела точность 99,74 %.

Существенное количество научных работ сосредоточено на изучении особенностей фрезерной обработки сплавов группы Inconel, полученных с применением аддитивных технологий WAAM, LPBF и SLM [16–19]. Авторы этих исследований обращают внимание на связь анизотропии свойств заготовок с возникающими силами резания, а также износом инструмента и шероховатостью обработанной поверхности. Однако эмпирические данные применительно к сплавам на никелевой основе, полученным по аддитивной технологии EBAM, представлены весьма незначительными исследованиями.

Прямой перенос результатов обрабатываемости, полученных для LPBF- или WAAM-материалов Inconel 625, на EBAM-материалы не может быть применен по следующим причинам: масштаб структурной неоднородности EBAM (крупное зерно, грубые карбиды) создает специфическую динамику сил резания, не воспроизводимую на мелкозернистых LPBF-образцах;

выраженная анизотропия предела текучести ЕВАМ-материала требует отдельного исследования зависимости сил резания от направления фрезерования, что неактуально для изотропных или слабо анизотропных WAAM-структур; комбинированный механизм износа (адгезионный от высоких сил сцепления + абразивный от крупных ликвационных карбидов) является уникальным для ЕВАМ и не наблюдается в чистом виде при обработке LPBF-материалов (преобладает адгезия) или WAAM-материалов (преобладает абразивный износ).

В связи с вышеизложенным сформулирована **цель работы**, заключающаяся в развитии представлений об особенностях обрабатываемости аддитивного сплава на никелевой основе, полученного по технологии ЕВАМ, путем его фрезерования и изучения возникающих сил резания, морфологии образующейся стружки и износа режущих кромок инструментов. Для достижения цели сформулированы следующие **задачи**.

1. Оценка анизотропии обрабатываемости и влияния направления фрезерования на силы резания.

2. Получение зависимостей сил резания от режимов фрезерования и анализ влияния скорости резания на морфологию стружки.

3. Установление зависимости морфологии стружки от режимов и направления фрезерования.

4. Идентификация доминирующего механизма износа инструмента при фрезеровании аддитивного материала.

5. Изучение кристаллографической текстуры и степени влияния окислительного износа.

6. Определение рациональных режимов фрезерования и границ катастрофического изнашивания.

Методика исследований

На лабораторном оборудовании в условиях ИФПМ СО РАН (г. Томск) был изготовлен образец по аддитивной технологии ЕВАМ (Electron Beam Additive Manufacturing). Для этого использовали проволоку OKAutrodNiCrMo-3 ESAB (Швеция) диаметром 1,2 мм. В качестве подложки при синтезе выступал стальной лист толщиной 5 мм марки 12X18H10T (AISI 321). Параметры синтеза задавали по данным работ [20, 21], а именно: ускоряющее напряжение 30 кВ;

ток электронного луча 60 мА. Электронный луч перемещался по круговой развертке диаметром 6 мм со скоростью подачи стола 300 мм/мин (рис. 1).

Таким образом был изготовлен прототип-заготовка, из которого путем электроэрозионной проволоочной резки удаляли корку и получали образцы 50×50×16 мм для механических и металлографических испытаний, а также для фрезерования (рис. 2). Для проверки повторяемости микроструктуры и физико-механических свойств, оказывающих влияние на процесс резания, готовили серию образцов в аналогичных условиях. Результаты испытаний были сопоставимы (разница показаний не более 10...15 %).

Регистрацию сил выполняли с использованием трехкомпонентного динамометра 9257ВА фирмы Kistler (Швейцария). Последний устанавливали на стол фрезерного станка, а сверху в специальном приспособлении фиксировалась аддитивная заготовка. Снятие данных происходило с частотой 5...10 кГц в течение 5...10 секунд с момента входа всех зубьев фрезы в заготовку. Для каждого режима резания выполняли по 4-5 повторений при измерениях сил резания, рассчитывая при этом среднее значение. Разница в показаниях обычно не превышала 7...10 %. При выполнении фрезерования собирали характерную стружку, а также изношенные фрезы и их осколки, которые затем исследовали с применением методов рентгеноструктурного анализа (РСА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Для фрезерования использовали твердосплавные концевые фрезы (твердый сплав марки H10F) диаметром $d_{\text{фр}} = 12$ мм, изготовленные ООО «ПК «МИОН» (г. Томск) (рис. 3). Эти инструменты не имели износостойкого покрытия для снижения числа факторов, способных повлиять на чистоту эксперимента. Универсальная геометрия фрез следующая: задний угол $\alpha = +10^\circ$, передний угол $\gamma = +8^\circ$; угол наклона винтовой канавки $\omega = +40^\circ$, число зубьев $z = 4$, радиус округления режущих кромок $\rho = 4 \pm 2$ мкм.

Применение фрезы диаметром 12 мм обусловлено тем, что стоимость инструмента возрастает пропорционально квадрату диаметра. Увеличение свыше 12 мм влечет за собой существенное удорожание оснастки при необходимости многократных измерений для получения

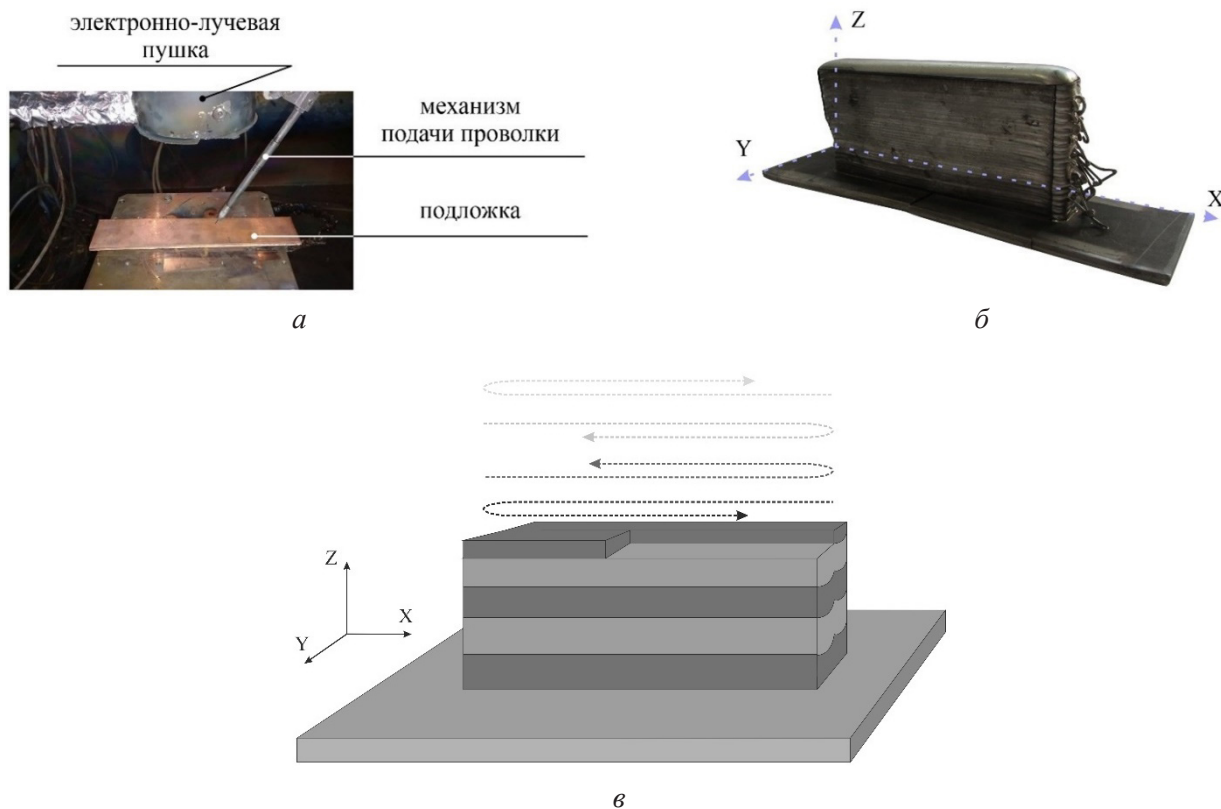


Рис. 1. Рабочая область лабораторной установки (*a*), внешний вид (*б*) образца Inconel 625 и схема сканирования (*в*)

Fig. 1. Work area of the laboratory setup (*a*), appearance (*b*) of the Inconel 625 sample, and scanning scheme (*c*)

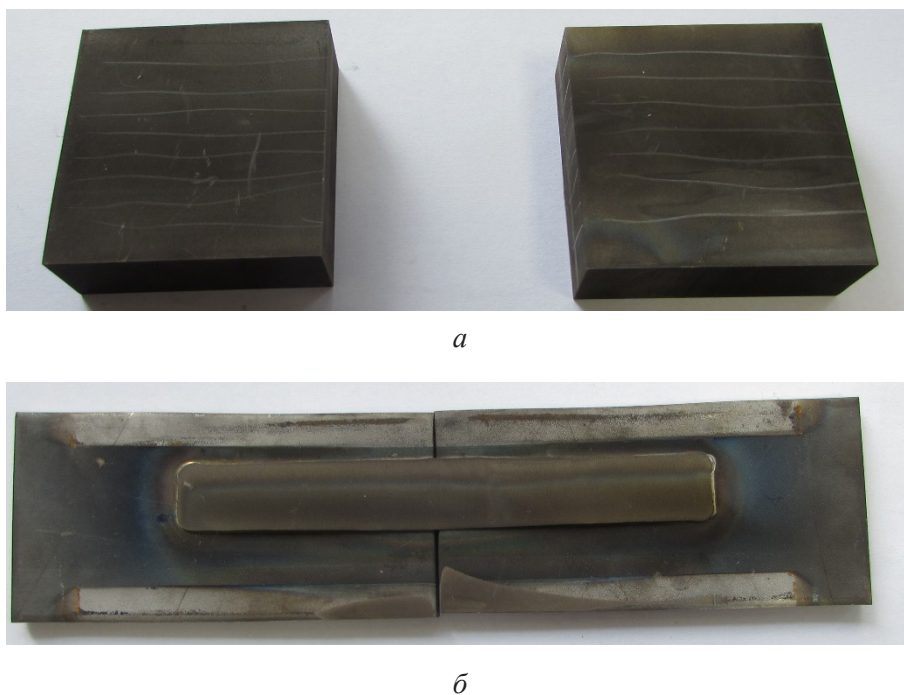
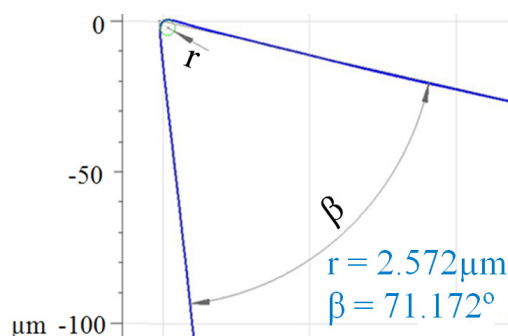


Рис. 2. Внешний вид после электроэрозионной резки: *a* – образцы, подготовленные для фрезерования; *б* – подложка из стали

Fig. 2. Appearance after electrical discharge machining: samples prepared for milling (*a*); steel backing (*b*)



а



б

Рис. 3. Изображение сечения режущей кромки (а) с указанием фрагмента измерений микрогеометрии (б)

Fig. 3. Image of the cutting edge section (а) with an indication of the microgeometry measurement fragment (б)

достоверных данных. Фрезы большего диаметра, чем в этом эксперименте, позволяют работать с повышенными подачей и шириной фрезерования, однако экономическая целесообразность такого подхода оценивается как крайне низкая. С другой стороны, увеличение диаметра может создавать ограничения при фрезеровании тонкостенных и небольших заготовок в рамках комбинированной аддитивно-субтрактивной технологии.

Фрезерование заготовок проводили на обрабатывающем центре DMU 50 фирмы DMG MORI (Япония) как вдоль, так и поперек направления синтеза при аддитивном производстве (рис. 1, б). Для исключения влияния смазывающего и охлаждающих эффектов при фрезеровании все опыты проводили без подачи смазочно-охлаждающей жидкости. В ходе экспериментов использовали схемы, представленные на рис. 4.

Измеряли следующие составляющие силы резания: Ph – сила, направленная вдоль направления подачи (сила подачи); Pv – сила, направленная перпендикулярно направлению подачи (боковая сила); Px – сила, направленная вдоль оси фрезы (осевая сила). Эти силы непрерывно изменяются из-за изменения толщины среза [22].

При вращении фрезы происходит смена ориентации двух базовых составляющих силы резания: тангенциальной Pz (действует вдоль направления скорости резания, перпендикулярно радиус-вектору от оси вращения до режущей кромки) и радиальной Py (действует вдоль радиус-вектора от режущей кромки к оси вращения фрезы). Эти составляющие являются первичными, однако при фрезеровании их невозможно измерить напрямую из-за поворота зуба инструмента. На основе Pz и Py формируются силы Ph

и Pv , которые регистрировали с помощью токарного динамометра Kistler 9257BA.

Сила подачи Ph совпадает с направлением силы Pz в начале врезания зуба фрезы в заготовку, но при вращении фрезы и повороте силы Pz эта составляющая начинает изменяться в пользу увеличения боковой силы Pv . С другой стороны, в начале процесса резания боковая компонента Pv направлена одинаково с радиальной силой Py . При повороте фрезы ориентация Py меняется, что вызывает рост силы подачи Ph . В случае острой режущей кромки и при значении угла наклона режущей кромки $\omega = 40$ данная сила может быть ориентирована от заготовки (вертикально вверх), что приводит к попытке фрезы оторвать или приподнять обрабатываемую заготовку. Более подробно эти эффекты раскрыты в статье [23].

В ходе предварительных экспериментов выявлено, что при попутной схеме фрезерования по сравнению со встречной на одинаковых режимах ($n = 315$ об/мин, $B = 7$ мм, $t = 1$ мм, $S_{\text{мин}} = 25$ мм/мин) значения максимальных составляющих сил Ph_{max} и Pv_{max} оказываются выше в 3...6 раз. Такие же результаты были выявлены и для других режимов резания вплоть до подачи 250 мм/мин, но при подаче более 80 мм/мин начинаются ощутимые вибрации, что приводит иногда к перегрузке и сбою программы DynoWare, а также выкрашиванию режущей кромки фрезы. Это затрудняет неоднократный повтор обработки для определения достоверного интервала.

Данное явление объясняется кинематикой схемы попутного фрезерования. При врезании в заготовку (в образец) толщина среза наибольшая.

Режимы фрезерования Inconel 625
Milling parameters of Inconel 625

№ опыта / Test No.	Частота вращения фрезы n , об/мин / Milling cutter rotation speed n , (rpm)	Скорость резания v , м/мин / Cutting speed v , (m/min)	Минутная подача $S_{\text{мин}}$, мм/мин / Feed rate $S_{\text{мин}}$, (mm/min)	Глубина резания t , мм / Depth of cut $t (a_e)$, mm	Ширина резания B , мм / Width of cut $B (a_p)$, mm
1	315	11,9	25	1	7
2			50		
3			80		
4			200		
5	630	23,8	25		
6			50		
7			80		
8			200		

или самих фрез при работе в течение первых 10 секунд.

Для получения возможности увеличения подачи до 250 мм/мин ширину фрезерования B принимали равной 7 мм [23].

Экспериментальные данные, регистрируемые в процессе измерений, подвергались статистической обработке на основе классических методов математической статистики и теории планирования эксперимента. В частности, вычисляли выборочное среднее с 95 % доверительным интервалом по Стьюденту, проводили оценку экстремумов, а также применяли метод bootstrap. Расчетные процедуры были автоматизированы с помощью прикладного пакета STATISTICA v.8.

Фазовый анализ заготовок и фрез выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург) с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ с шагом $0,05^\circ$ и временем экспозиции 20 с на шаг. Микроструктурные изображения, снимки стружки и зон износа получали на двух сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) – MIRA 3 LMU (Tescan, Чехия), оснащенном приставкой для энергодисперсионного микроанализа (EDX) с безазотным детектором Ultim MAX 40; СЭМ высокого разрешения с полевой эмиссией Apreo 2 S (ThermoFisher Scientific, США), оснащенном детектором энергодисперсионного спектрального анализа (EDS) OctaneElect.

Микроструктуру, химический состав и свойства исходного образца изучали по стандарт-

зированным методикам с применением металлографического микроскопа Axio ObserverA1.m (Carl Zeiss, Германия); портативного рентгенофлуоресцентного анализатора S1 TITANSPX (Bruker, США); стационарного микротвердомера Durascan-10 и универсальной испытательной машины 50ST (Tinius Olsen, США). Микрогеометрию кромок фрез (острота, шероховатость) измеряли с использованием высокоточного бесконтактного метода на установке EdgeMaster (Alicona, Австрия).

Результаты и их обсуждение

Результаты химического анализа приведены в табл. 2.

Рассматриваемый образец из Inconel 625 базируется на механизме дисперсионного твердения [21]. После выполнения травления в структуре фиксируется равномерное дендритное распределение, где четко идентифицируются границы зерен. При анализе переходных участков, а также зон сплавления проволоочных слоев выявляется наличие столбчатой морфологии. Происхождение последней связано с тем, что ранее закристаллизовавшийся металл подвергался вторичному нагреву (рис. 5, а).

На рис. 5, а и б темные участки соответствуют границам дендритов $\gamma\text{-Ni}$, которые появились после химического травления. Формирование дендритной морфологии связано с неполной взаимной растворимостью фаз на основе Ni

Химический состав проволоки и исследуемого образца

Chemical composition of the wire and the test sample

Объект исследования и требования по стандарту / Test object and the require- ments of the standard	Массовая доля элементов, % / Mass fraction of elements (%)										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb+Ta
Образец Inconel 625 / Inconel 625 sample	< 0,1	0,3	0,3	21,5	9,0	63,5	0,4	–	0,4	0,5	3,7
ГОСТ 5632–2014 / GOST 5632–2014		< 0,5	< 0,5	20...23	8...10	> 58	< 0,4	–	< 0,4	< 5,0	3,2...4,2

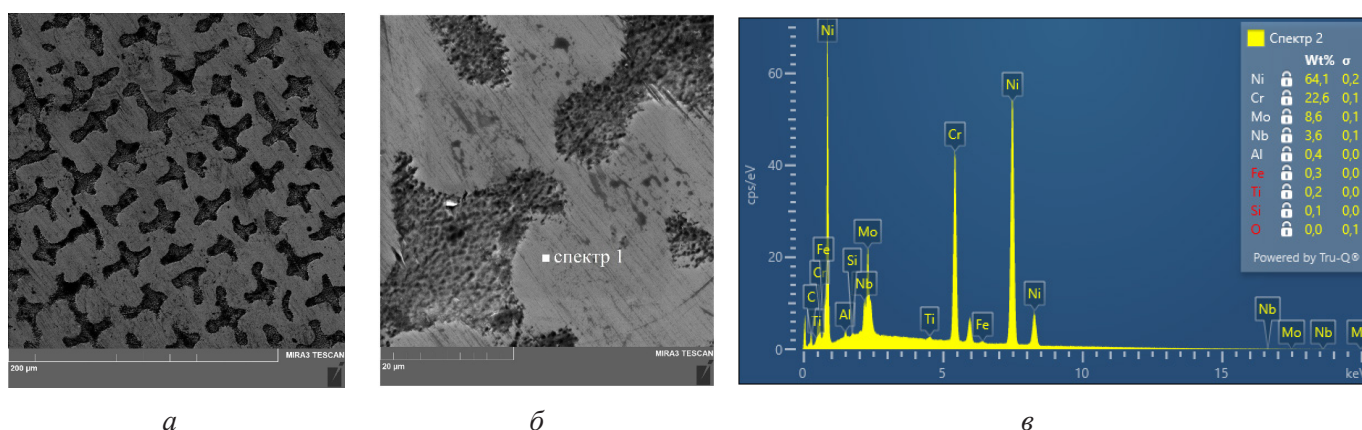


Рис. 5. Фрагмент микроструктуры образца Inconel 625 в продольном сечении (ZOX) (а, б, увеличения $\times 1240$ и $\times 6220$ соответственно) и карта распределения интенсивностей (в) в точке «спектр 1»

Fig. 5. Microstructure fragment of the Inconel 625 sample in the longitudinal section (ZOX): (a, б) magnifications $\times 1,240$ and $\times 6,220$, respectively; (в) intensity distribution map at point “Spectrum 1”

и Cr. Этот процесс сопровождается образованием мелкодисперсных частиц легированных карбидов (Mo, Nb, Ti), как показано на рис. 5, б. Указанные включения локализуются главным образом в зонах, обогащенных Ni (на изображении они выглядят как светло-серые участки).

Рис. 6 демонстрирует фазовый состав образца сплава Inconel 625 ЕВАМ. На рентгенограмме, зарегистрированной для состояния до фрезерования, фиксируются дифракционные отражения под углами $43,5^\circ$, $50,5^\circ$, $74,5^\circ$ и $90,5^\circ$. Эти пики идентифицируются как отражения от кристаллографических плоскостей (111), (200), (220) и (311), принадлежащих твердому раствору γ -Ni. Следовательно, γ -Ni является базовой фазой образца.

Согласно полученным результатам, микротвердость исследуемых образцов Inconel 625 изменяется в пределах от 200 до 246 HV. В табл. 3

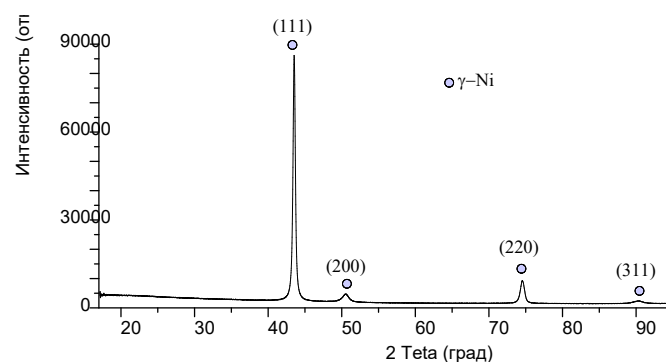


Рис. 6. Рентгенограмма образца Inconel 625

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the Inconel 625 sample

Механические свойства Inconel 625 в зависимости от направления синтеза
Mechanical properties of Inconel 625 as a function of the build direction

Сечение / Section	σ_B , МПа / UTS (σ_u) (MPa)	σ_T , МПа / σ_y (MPa)	δ_5 , %
ZOY (поперек) / ZOY (transverse)	640 ± 20	144 ± 14	56 ± 3
ZOX (вдоль) / ZOX (longitudinal)	647 ± 80	171 ± 5	61 ± 3

представлены данные оценки механических характеристик указанного материала.

Фазовый состав режущих кромок новой фрезы представлен двумя фазами: WC и Co (рис. 7).

На основании измерений сил по времени с использованием динамометра были получены максимальные значения составляющих сил резания (рис. 8). Все измерения повторялись 4-5 раз не только в один день, но и с разницей в несколько дней для определения доверительного интервала, подтвердившего, что отклонения показаний для одного и того же режима не превышают 7...10 %. При построении графиков использовались результаты, полученные в один и тот же день, когда наибольшие силы были самыми большими для последующего гарантированного расчета фрезы на прочность.

На рис. 9 представлены графики влияния подачи $S_{\min}$ на наибольшую величину составляющих сил резания при направлении фрезерования Inconel 625 вдоль и поперек направления подачи при синтезе образцов.

В серии проведенных опытов ширина фрезерования B была принята 7 мм, а глубина резания $t = 1$ мм. Такой выбор режимов обусловлен стремлением достичь максимальной произво-

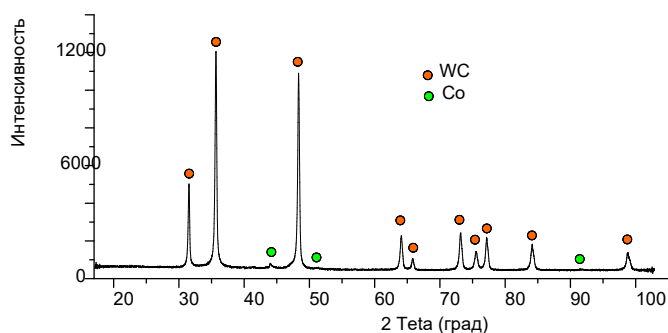


Рис. 7. Рентгенограмма поверхности режущих кромок фрезы до фрезерования

Fig. 7. X-ray diffraction pattern of the cutting edge surface of the milling cutter before milling

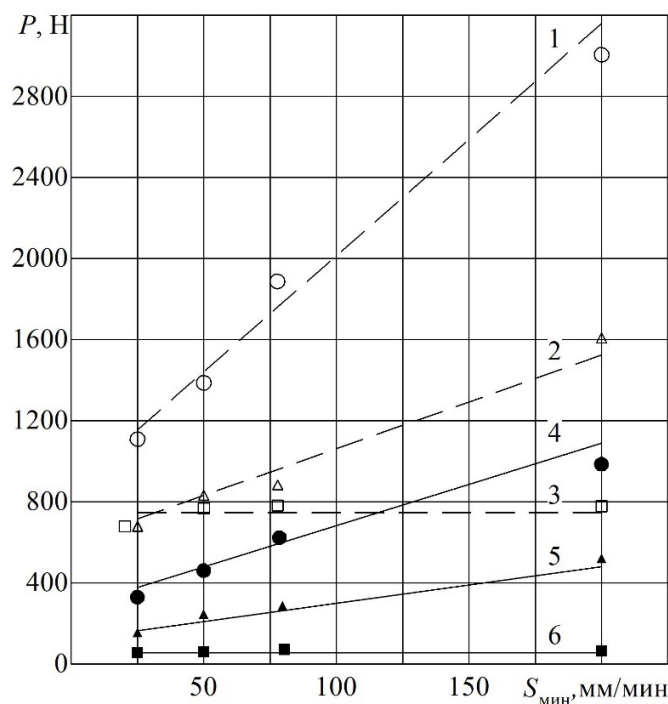


Рис. 8. Влияние минутной подачи $S_{\min}$ и скорости резания v на наибольшие силы при встречном фрезеровании Inconel 625 фрезой диаметром 12 мм:

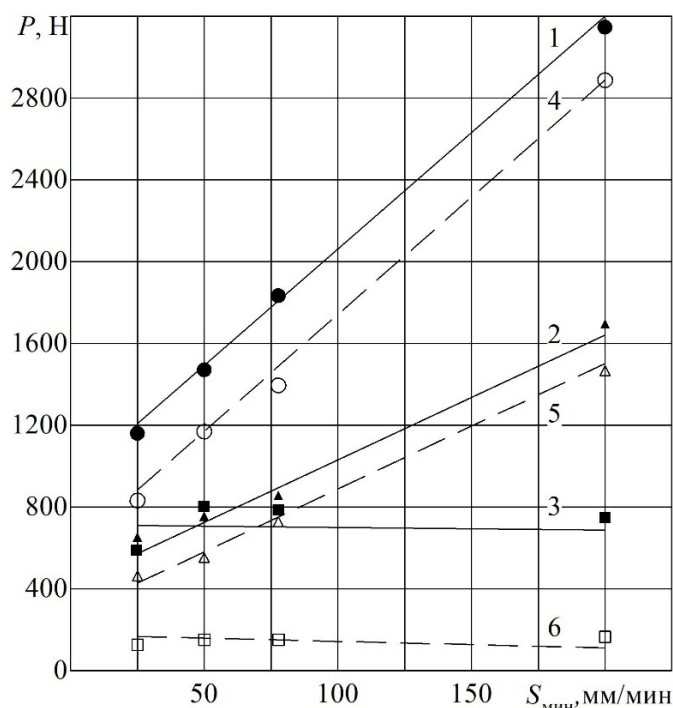
$v = 11,9$ м/мин: 1 – ($\circ$) $Ph_{\max}$; 2 – (Δ) $Pv_{\max}$; 3 – ($\square$) $Px_{\max}$;
 $v = 23,8$ м/мин: 4 – ($\bullet$) $Ph_{\max}$; 5 – ($\blacktriangle$) $Pv_{\max}$; 6 – ($\blacksquare$) $Px_{\max}$

Fig. 8. Effect of the feed rate $S_{\min}$ and cutting speed v on the maximum cutting force components during up-milling of Inconel 625 with a 12 mm diameter milling cutter:

$v = 11.9$ m/min: 1 – ($\circ$) $Ph_{\max}$; 2 – (Δ) $Pv_{\max}$; 3 – ($\square$) $Px_{\max}$;
 $v = 23.8$ m/min: 4 – ($\bullet$) $Ph_{\max}$; 5 – ($\blacktriangle$) $Pv_{\max}$; 6 – ($\blacksquare$) $Px_{\max}$

дительности при сохранении работоспособности концевой фрезы и обеспечении приемлемых экономических затрат.

Предшествующие экспериментальные исследования [24] показали, что при постоянной площади поперечного сечения среза (произведение $B \times t$) предпочтительнее увеличивать ширину фрезерования. При попытках увеличения глубины резания отмечено, что стружка дольше задерживается в стружечной канавке, а ее объем воз-



растает – и под действием высоких температур происходит интенсификация налипания, приводящая к пакетированию.

Повышение минутной подачи S_{min} увеличивает объем металла, остающегося в канавке на протяжении всего периода контакта при резании. Происходит образование комка уплотненной стружки, который, разогреваясь за счет трения, приобретает ярко-красное свечение и еще более прочно приваривается к канавке. Возникновение этого явления происходит только в одной из стружечных канавок, а попытки удалить образовавшийся комок приводят к повреждению режущей кромки. Практический опыт показал, что эффективным способом удаления стружки является фрезерование с глубиной t не более 1 мм.

Данные, представленные на рис. 9, свидетельствуют о том, что максимальное значение силы подачи Ph_{max} возрастает более интенсивно по сравнению с боковой силой Pv_{max} . При этом зависимости обеих величин как в продольном, так и в поперечном направлениях демонстрируют практически идентичный характер. При фрезеровании вдоль направления синтеза силы Ph_{max} и Pv_{max} незначительно превосходят аналогичные значения, полученные при фрезеровании поперек. Такое различие объясняется, с нашей точки зрения, более высоким пределом текучести материала в продольном направлении относительно поперечного (табл. 3).

Рис. 9. Влияние минутной подачи S_{min} на наибольшие силы при встречном фрезеровании при постоянной скорости резания $v = 11,9$ м/мин:

вдоль направления подачи при синтезе: 1 – ($\bullet$) Ph_{max} ; 2 – ($\blacktriangle$) Pv_{max} ; 3 – ($\blacksquare$) Px_{max} ; поперек направления подачи при синтезе: 4 – ($\circ$) Ph_{max} ; 5 – ($\triangle$) Pv_{max} ; 6 – ($\square$) Px_{max}

Fig. 9. Effect of the feed rate S_{min} on the maximum cutting force components during up-milling at a constant cutting speed $v = 11.9$ m/min:

along the feed direction during synthesis: 1 – ($\bullet$) Ph_{max} ; 2 – ($\blacktriangle$) Pv_{max} ; 3 – ($\blacksquare$) Px_{max} ; across the feed direction during synthesis: 4 – ($\circ$) Ph_{max} ; 5 – ($\triangle$) Pv_{max} ; 6 – ($\square$) Px_{max}

Амплитуда осевой силы Px_{max} остается неизменной при росте подачи. Вместе с тем при продольном фрезеровании она оказывается существенно больше, чем при поперечном. Для фрезерования поперек характерно циклическое изменение знака силы Px_{max} (с минуса на плюс). Это явление вызывает вибрационную нестабильность при резании. Например, при фрезеровании заготовок небольших размеров, закрепленных только с боковых сторон, отрицательное значение силы Px может привести к вырыванию заготовки из приспособления: зажимного усилия оказывается недостаточно. Эта проблема возникает и при обработке тонкостенных, а также недостаточно жестких заготовок, где применение высоких усилий закрепления невозможно.

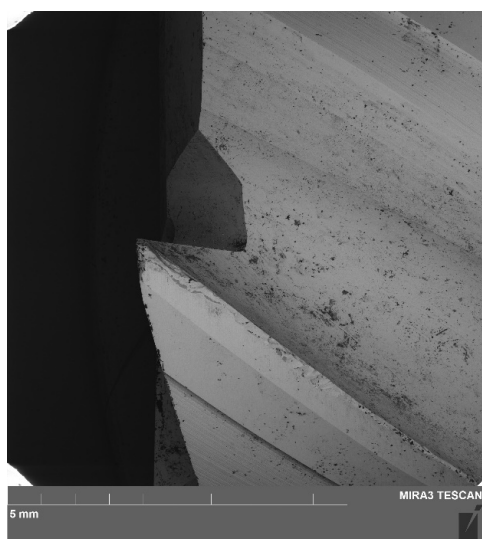
На основании экспериментальных данных (рис. 8 и 9) были определены линейные зависимости сил резания от подачи при скоростях резания $v = 11,9$ м/мин и 23,8 м/мин (табл. 4).

Режимы фрезерования, обеспечивающие максимальную производительность (табл. 2), характеризуются ускоренным повышенным износом режущих кромок, налипанием стружки на заднюю поверхность и пакетированием в стружечной канавке (рис. 10), а также весьма высокими значениями сил резания (рис. 8, 9).

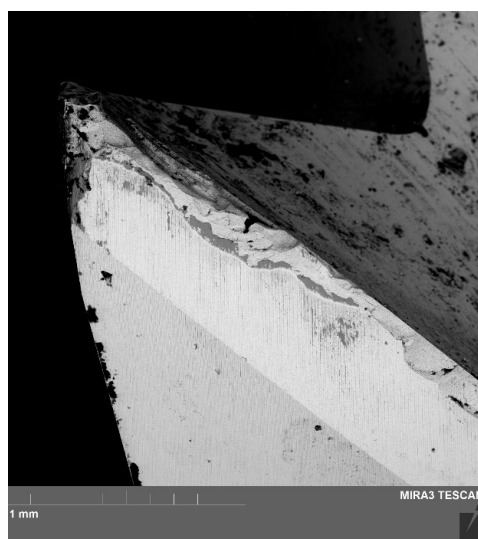
При попытках использовать подачу более 250 мм/мин кромки фрезы неминуемо выходили из строя в первые секунды фрезерования по при-

Уравнения, описывающие влияние минутной подачи $S_{\text{мин}}$ на наибольшие силы при фрезеровании
Regression equations describing the effect of the feed rate S_{min} on the maximum cutting force components

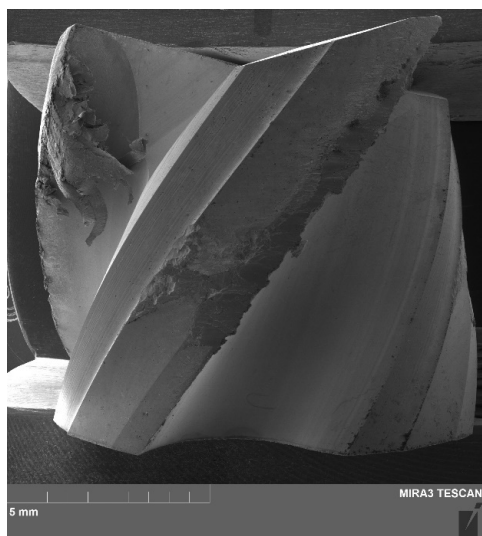
$v = 11,9 \text{ м/мин}; S_{\text{мин}} = 25 \dots 200 \text{ мм/мин} /$ $v = 11.9 \text{ m/min}; S_{\text{min}} = 25 \dots 200 \text{ mm/min}$			$v = 23,8 \text{ м/мин}; S_{\text{мин}} = 25 \dots 200 \text{ мм/мин} /$ $v = 23.8 \text{ m/min}; S_{\text{min}} = 25 \dots 200 \text{ mm/min}$		
Ph_{max}	Pv_{max}	Px_{max}	Ph_{max}	Pv_{max}	Px_{max}
$9,8S_{\text{мин}} + 854$ $R^2 = 0,87$	$4,8S_{\text{мин}} + 508$ $R^2 = 0,89$	$0,2S_{\text{мин}} + 675$ $R^2 = 0,85$	$4,9S_{\text{мин}} + 237$ $R^2 = 0,88$	$2,4S_{\text{мин}} + 100$ $R^2 = 0,91$	$-0,11S_{\text{мин}} + 132$ $R^2 = 0,93$



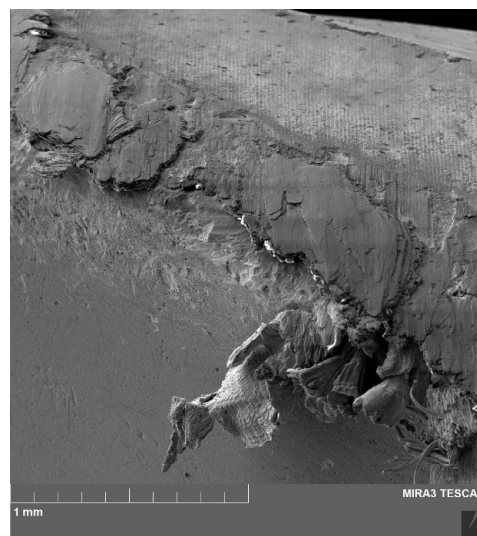
а



б



в



г

Рис. 10. СЭМ режущих кромок твердосплавных фрез:

а, б – после работы около 5 минут (увеличение $\times 59$ и $\times 207$); в, г – после критического износа (увеличение $\times 35$ и $\times 155$)

Fig. 10. SEM images of the cutting edges of cemented carbide end mills:

а, б – after approximately 5 minutes of operation (magnification $\times 59$ and $\times 207$); в, г – after critical wear (magnification $\times 35$ and $\times 155$)

чине скалывания (рис. 11). В этой связи подача была ограничена величиной в 200 мм/мин.

Выполненный после фрезерования РСА режущих кромок показал, что кроме исходных фаз WC и Co в их составе присутствуют фазы, сфор-

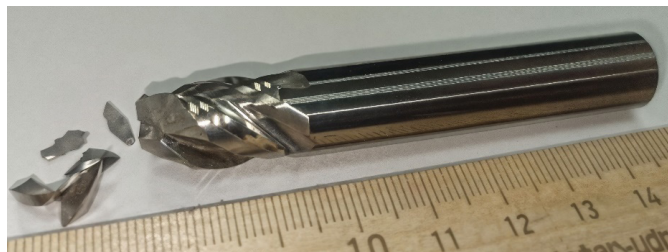


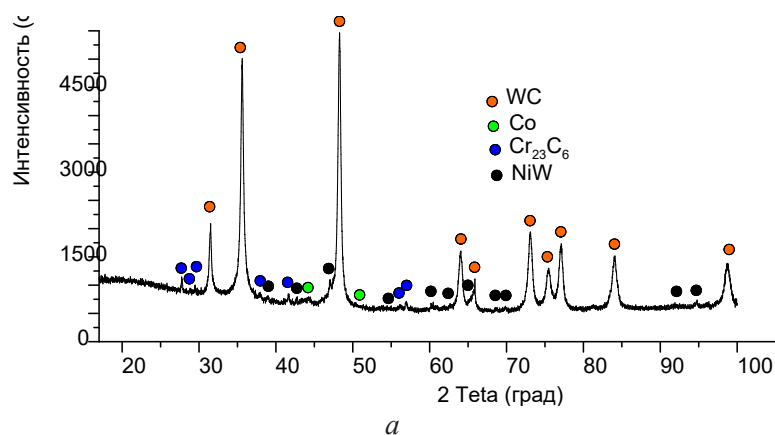
Рис. 11. Фотография типowego разрушения режущих зубьев фрезы

Fig. 11. Photograph of a typical fracture of the cutter teeth

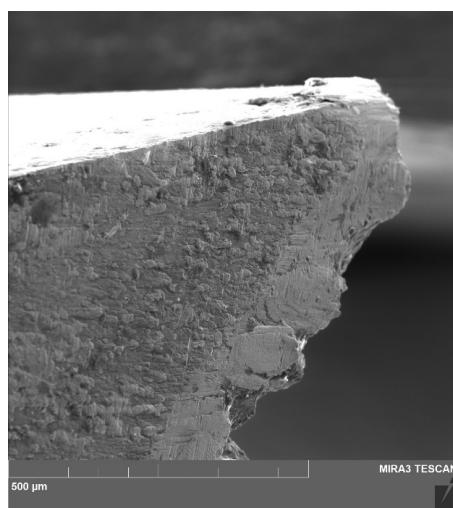
мировавшиеся в результате термомеханического воздействия между элементами материала фрезы и обрабатываемой заготовки. Налипшие фрагменты содержат сложный карбид Cr_{23}C_6 и интерметаллид NiW (рис. 12, а, б). Данные СЭМ свидетельствуют о наличии крупного скопления прочно приварившейся стружки, которая нависает над передней поверхностью (рис. 12, в).

При анализе режущих кромок не зафиксировано фаз, включающих кислород. Следовательно, окислительная составляющая механизма износа инструментального материала в условиях проведенных экспериментов является незначительной.

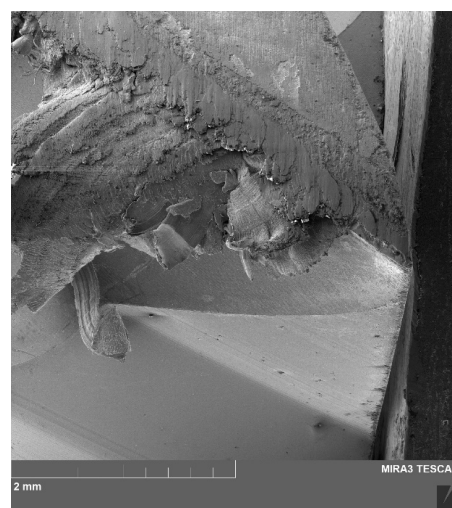
Адгезионные процессы при резании обеспечивают взаимодействие между элементами заготовки и структурными элементами инстру-



а



б



в

Рис. 12. Рентгенограмма (а) и микрофотографии СЭМ (б, в) режущих кромок фрезы после фрезерования (увеличение $\times 414$ и $\times 78$ соответственно)

Fig. 12. X-ray diffraction pattern (a) and SEM micrographs (б, в) of the cutting edges of the milling cutter after milling (magnification $\times 414$ and $\times 78$, respectively)

мента. Под воздействием сил сцепления происходит перемещение одного зерна или группы зерен инструментального материала. Результатом становится существенное ослабление режущей кромки, которое проявляется в виде выкрашивания или образования сколов.

Рассмотрим подробнее микрофотографии и морфологию характерных стружек (рис. 13), полученных при фрезеровании на режимах из табл. 1.

На фотографиях (рис. 13) показана часть стружки, при этом в вертикальном направлении измеряется ее ширина (рис. 14, в). На режущей кромке по винтовой поверхности фрезы ширина стружки $b_{\text{стр}} \approx 4,5$ мм. Однако она меньше длины контакта вдоль главной режущей кромки, составляющей 10,9 мм (рис. 14, а, б).

Небольшая глубина фрезерования $t = 1$ мм (радиальная глубина a_e по англоязычной терминологии) приводит к уменьшению наибольшей длины контакта главной режущей кромки с вертикальной поверхностью обработки $l_{\text{конт } t}$. Она, в свою очередь, зависит от длины дуги контакта вершины зуба фрезы с поверхностью заготовки $l_{\text{дуги}}$ при заданном диаметре фрезы $d_{\text{фр}}$, толщине фрезерования t и подаче на зуб s_z (мм/зуб), т. е. $l_{\text{дуги}} = f(d_{\text{фр}}, t, s_z)$. Поскольку диаметр фрезы и глубина фрезерования при выполнении экспериментов не изменялись, то длина $l_{\text{дуги}}$ зависит только от подачи на зуб.

Подача на зуб рассчитывается по общеизвестной формуле $s_z = S_{\text{мин}} / (nz)$, где $S_{\text{мин}}$ – минутная подача (мм/мин); n – частота вращения фрезы (об/мин); z – количество зубьев (шт.). Так, при наименьшей используемой подаче $S_{\text{мин}} = 25$ мм/мин и наименьшей используемой частоте вращения фрезы $n = 315$ об/мин, $s_z = 0,02$ мм/зуб, тогда $l_{\text{дуги}} = 3,2$ мм. При наибольшей подаче $S_{\text{мин}} = 200$ мм/мин и $n = 315$ об/мин, $s_z = 0,159$ мм/зуб, $l_{\text{дуги}} = 3,42$ мм. Несмотря на увеличение подачи на зуб в 8 раз, увеличение длины дуги произошло всего в 1,07 раза. Таким образом, основное влияние на длину дуги контакта вершины зуба с образцом оказывает диаметр фрезы $d_{\text{фр}}$ и глубина фрезерования t . На схеме рис. 14, а величина подачи на зуб s_z показана схематично в 6 раз больше, чем на самом деле, даже при наибольшей подаче на зуб $s_{z \text{ max}} = 0,159$ мм/зуб ($S_{\text{мин}} = 200$ мм/мин и $n = 315$ об/мин).

Отмечено, что наибольшая длина контакта главной режущей кромки с вертикальной поверхностью обработки $l_{\text{конт } t=1 \text{ мм}} = l_{\text{дуги}} / \cos \omega = 3,42 / \cos 40 = 4,46$ мм, что соответствует ширине стружки ($b_{\text{стр}} \approx 4,5$ мм).

Перпендикулярно винтовой главной режущей кромке происходит перемещение стружки по передней поверхности зуба фрезы. Длина стружки $l_{\text{стр}}$ в этом направлении (на фото рис. 13 это соответствует приблизительно горизонтальному размеру стружки без учета ее скручивания) при минутной подаче $S_{\text{мин}} = 25$ мм/мин и $n = 315$ об/мин, $l_{\text{стр}} \approx 0,3$ мм (рис. 13, а).

Увеличение минутной подачи до 200 мм/мин при $n = 315$ об/мин приводит к увеличению длины стружки до $l_{\text{стр}} \approx 1$ мм (рис. 13, в), а ее ширина увеличивается до $b_{\text{стр}} \approx 10$ мм. Увеличение ширины стружки с 4,5 до 10 мм связано, на наш взгляд, с увеличением температуры, как следствие – увеличением подачи, и свариванием следующего участка стружки по ширине, т. е. эти участки перемещаются как сплошная лента, поскольку очередной участок толкает предыдущий вдоль винтовой стружечной канавки вверх даже после прохождения вершины режущей кромки своей длины дуги $l_{\text{дуги}}$ (рис. 14, а, б). Это происходит из-за того, что участки режущей кромки, расположенные выше вершины, продолжают срезать стружку и толкают ее вверх вдоль винтовой канавки, пока вся главная режущая кромка не выйдет из контакта с вертикальной поверхностью образца высотой B или шириной фрезерования $B = 7$ мм. Поэтому при увеличенной подаче $b_{\text{стр}} \approx l_{\text{конт полн}} = 10,9$ мм. По ширине стружка не делится на части, но на некоторых стружках появляются глухие трещины, предшествующие разделению стружки на части по ширине (рис. 13, г).

Здесь и далее упоминается о повышении температуры в зоне резания (в зоне первичных пластических деформаций) при увеличении подачи, скорости резания и других параметров режима резания, хотя температура резания напрямую не измерялась из-за технической сложности. По результатам экспериментальных исследований авторов [3, 4, 16, 27] и с учетом явлений, наблюдаемых в настоящей работе, установлена корреляция с общепринятыми положениями о влиянии толщины среза и скорости резания на температуру резания.

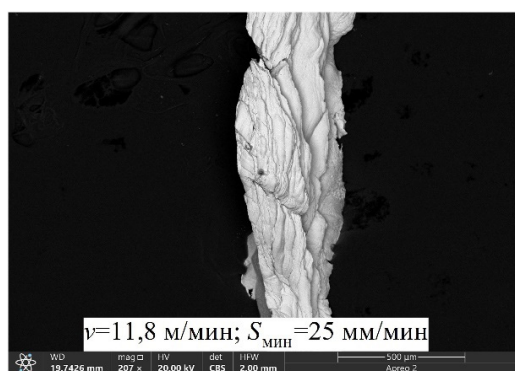
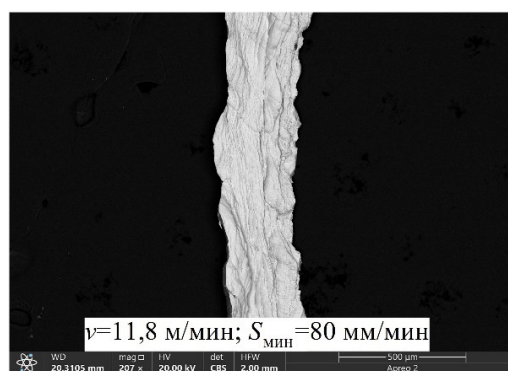
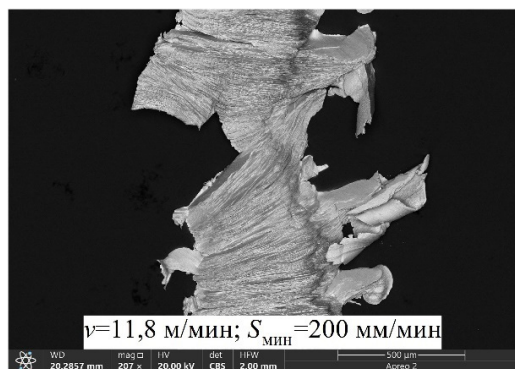
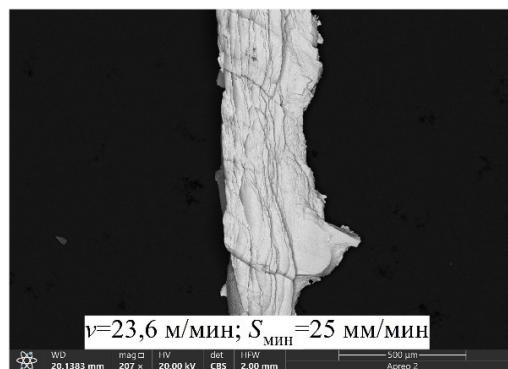
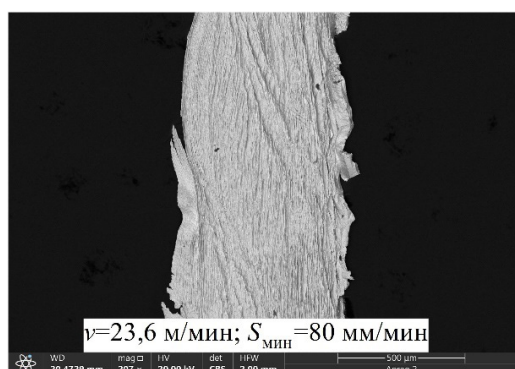
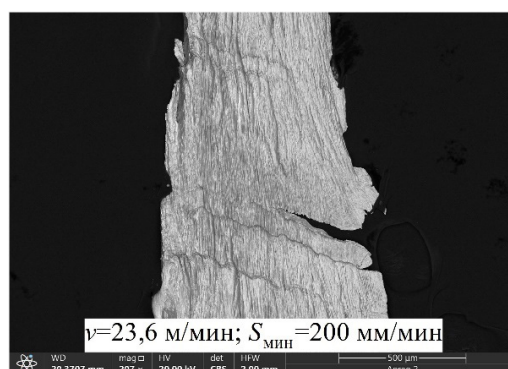
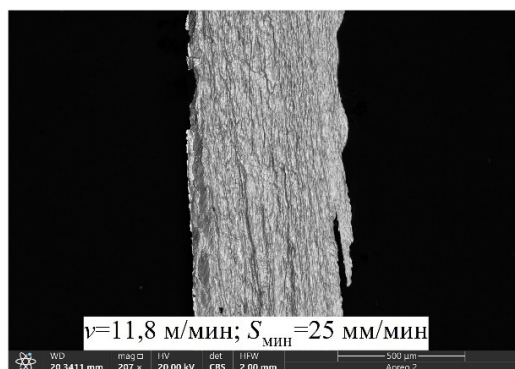
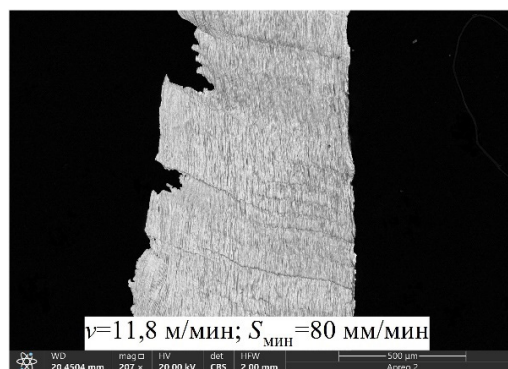
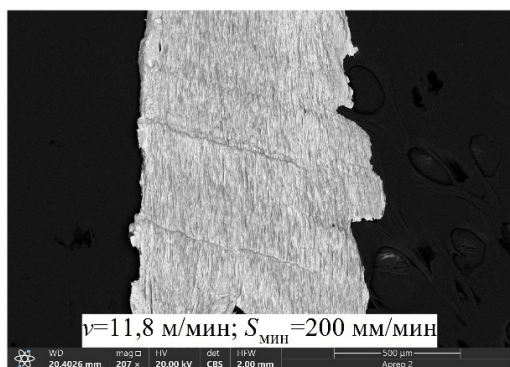

a

б

в

г

д

е

ж

з

Рис. 13. Микрофотографии стружек, полученных на различных режимах фрезерования (увеличение $\times 207$):

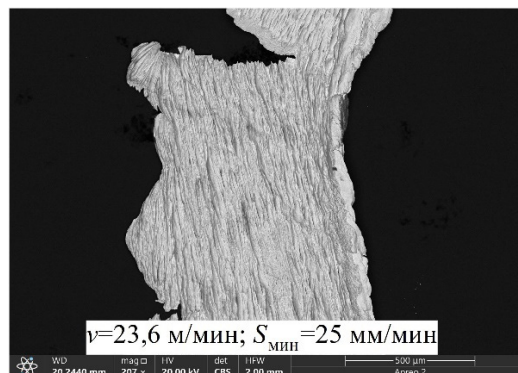
a–e – вдоль; *ж–м* – поперек (см. также с. 87)

Fig. 13. Micrographs of chips obtained under various milling conditions (magnification $\times 207$):

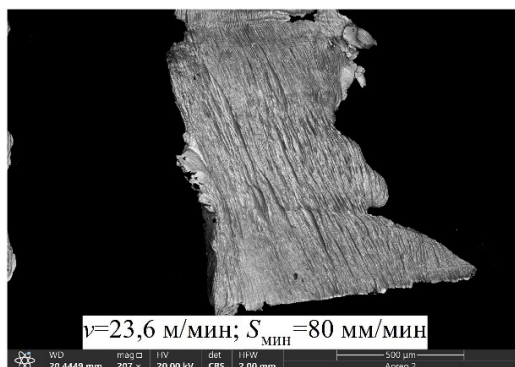
a–e – along the build direction; *ж–м* – across the build direction (see also p. 87)



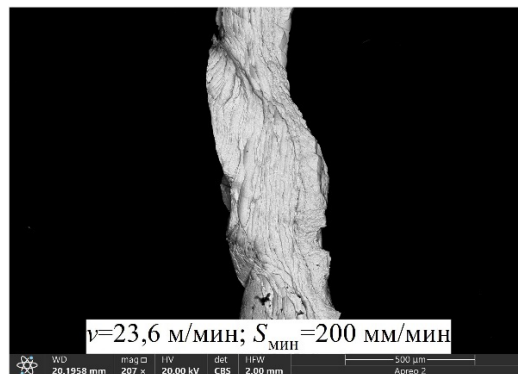
и



к



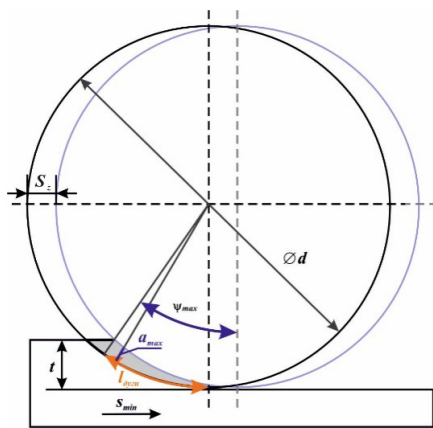
л



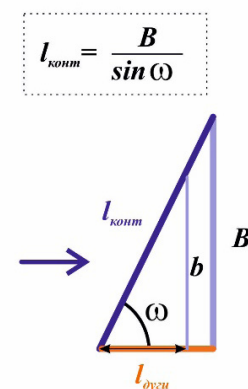
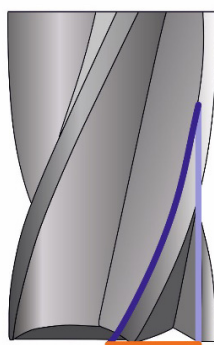
м

Рис. 13. Окончание

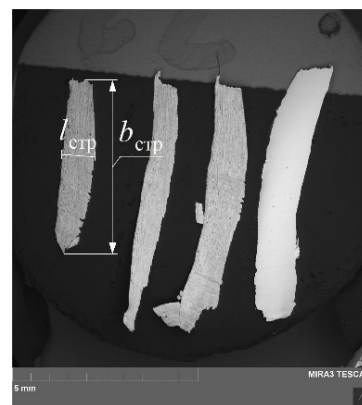
Fig. 13. The End



а



б



в

Рис. 14. Схемы для определения длины дуги контакта вершины зуба с заготовкой (а), определения длины контакта режущей кромки с вертикальной поверхностью заготовки при полном врезании зуба фрезы в заготовку (б) и основные параметры стружки (в)

Fig. 14. Diagrams for determining: (а) the length of the contact arc between the tooth tip and the workpiece; (б) the contact length between the cutting edge and the vertical workpiece surface when the cutter tooth is fully engaged; (в) the main chip parameters

С увеличением частоты вращения до 630 об/мин ($v = 23,8$ м/мин) при $S_{\min} = 25$ мм/мин ожидается уменьшение подачи на зуб до $S_z = 0,01$ мм/зуб, но при этом происходит увеличение длины стружки $l_{\text{стр}}$ до 0,55 мм (рис. 13, в).

Это в 1,8 раза больше, чем при меньшей скорости резания $v = 11,9$ м/мин и такой же подаче на зуб. Причиной данного явления служат два фактора: во-первых, возрастание температуры в области первичной пластической деформации

ции, а во-вторых, увеличение пластичности обрабатываемого материала в условиях нагрева. К тому же если при скорости резания $v = 11,9$ м/мин стружка сворачивалась в трубочку (рис. 13, а), что затрудняло измерение ее истинной длины, то при $v = 23,8$ м/мин стружка идет более плоской (рис. 13, з).

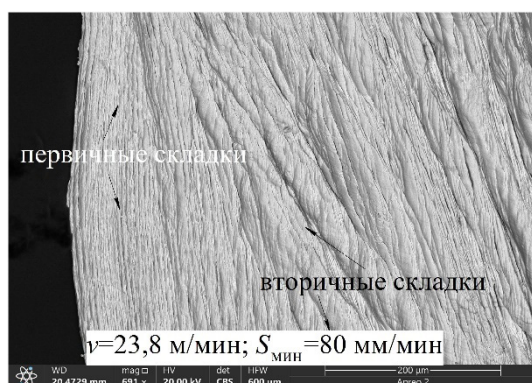
Увеличение минутной подачи до 200 мм/мин при $v = 23,8$ м/мин (подача на зуб $S_z = 0,08$ мм/зуб) приводит к увеличению длины стружки до 1,55 мм (рис. 13, е). По ширине стружка начинает разделяться на приблизительно одинаковые части шириной 0,6 мм, слабо скрепленные друг с другом. С одной стороны, такой эффект может вызвать уменьшение сил на передней поверхности зуба, а с другой – увеличение длины стружки и уменьшение ее скручивания приводит к ухудшению размещения стружки в стружечной канавке, что при дальнейшем увеличении скорости резания или подачи вызывает ее негативное пакетирование.

При фрезеровании поперек направления подачи при синтезе стружка отличается от продольного фрезерования отсутствием скрученности даже при наименьших подачах (рис. 13). В противоположность скрученной форме стружки при продольном фрезеровании при минутной подаче 25, 80 мм/мин при $n = 315$ об/мин (рис. 13, а, б) стружка образуется плоская (рис. 13, ж, з), что, как уже упоминалось выше, затрудняет отвод стружки. При наибольшей подаче 200 мм/мин при продольном фрезеро-

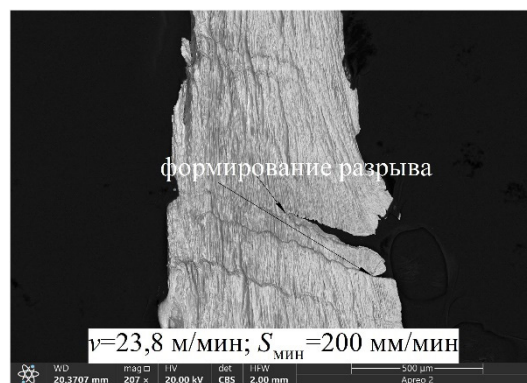
вании стружка образуется длинная и широкая, но рваной формы (рис. 13, в), тогда как при поперечной подаче она сплошная (рис. 13, и). Тем не менее величина сил Ph и Pv при поперечном фрезеровании немного меньше, чем при продольном при всех подачах, а осевая сила Px почти в 4 раза меньше (рис. 9).

Увеличение скорости резания до 23,8 м/мин не изменило форму стружки при фрезеровании поперек синтеза (рис. 13, к, л), а при 80 м/мин форма стружки при поперечном и продольном фрезеровании приблизительно одинакова. Однако при увеличении подачи до 200 мм/мин стружка становится, наоборот, скрученной (рис. 13, м) в противоположность прямой стружке при продольном фрезеровании (рис. 13, е).

Внешняя сторона стружки имеет маленькие зубчики (складки), параллельные ширине стружки (рис. 15), являющиеся вершинами элементов псевдосливной стружки, что характерно при обработке не очень пластичных материалов или когда при обработке происходит упрочнение вследствие большой пластической деформации. Таким образом, в зоне первичной пластической деформации происходит сдвиг сформировавшегося элемента вдоль поверхности сдвига, но высокая температура и давление приводит к свариванию этих элементов стружки. С увеличением подачи происходит более значимое выделение элементов стружки из-за увеличения толщины среза [34], но разглядеть вершины элементов можно только при большом увеличении.



а



б

Рис. 15. Типичные микрофотографии СЭМ стружки:

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

Fig. 15. Typical SEM micrographs of chips:

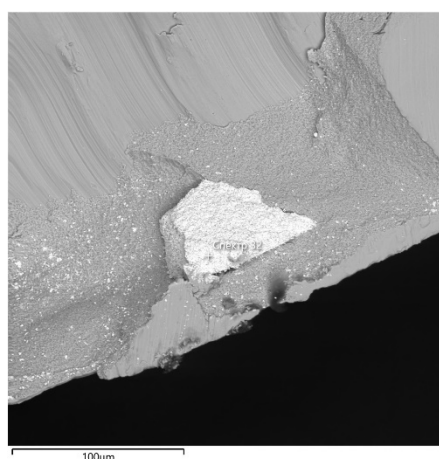
а – formation of folded structures; б – formation and propagation of a main crack

На микрофотографиях стружек, полученных с помощью СЭМ, на прирезцовой стороне зафиксированы области с внедренными зернами WC (рис. 16). Установлено, что повышение нагрузок при фрезеровании ведет к возникновению на поверхности стружки более крупных обломков инструментального материала – размером до 150 мкм и более. Это наблюдение является косвенным признаком адгезионно-усталостного износа, суть которого заключается в том, что высокотемпературное воздействие в сочетании с накопленными в поверхностном слое инструмента напряжениями ослабляет кобальтовую связку. В результате зерна WC отрываются и переносятся на поверхность стружки.

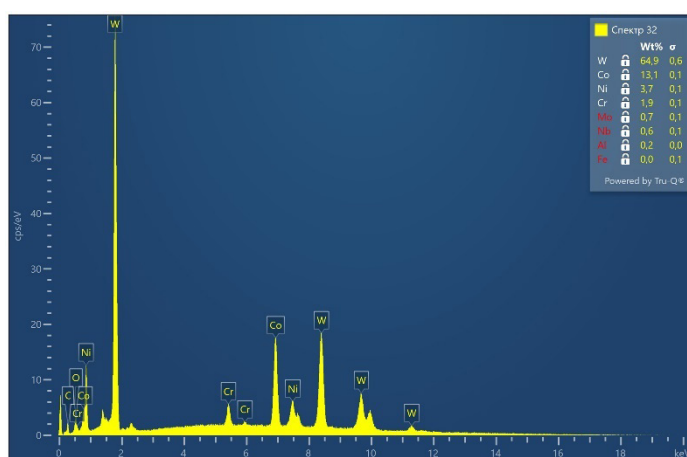
Исследование возможных структурно-фазовых превращений, происходящих в обрабаты-

ваемом материале при высокотемпературном воздействии и деформировании, выполняли методом РСА. Анализ подвергали стружку [26], сформированную при различных значениях скорости резания и подачи, а также поверхность образца после фрезерования (рис. 17).

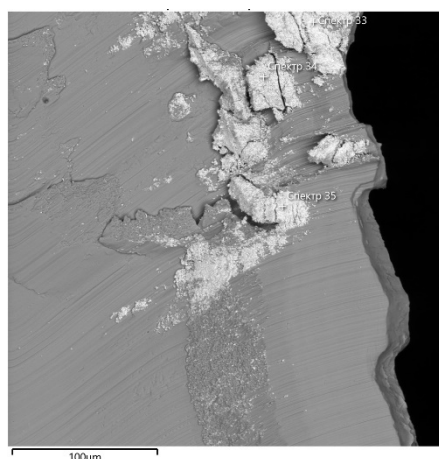
На поверхности заготовки после фрезерования и в стружках, полученных при режимах $v = 11,9$ м/мин, $S_{\text{мин}} = 25$ мм/мин и 200 мм/мин (рис. 17), образование новых фаз по сравнению с исходным состоянием материала до фрезерования обнаружено не было (рис. 6). При этом отмечено, что рентгенографическая текстура, которая наблюдалась в исходном состоянии и обусловлена дендритным ростом, характерным для аддитивных материалов [27], заметно ослабевает после фрезерования – как на обрабо-



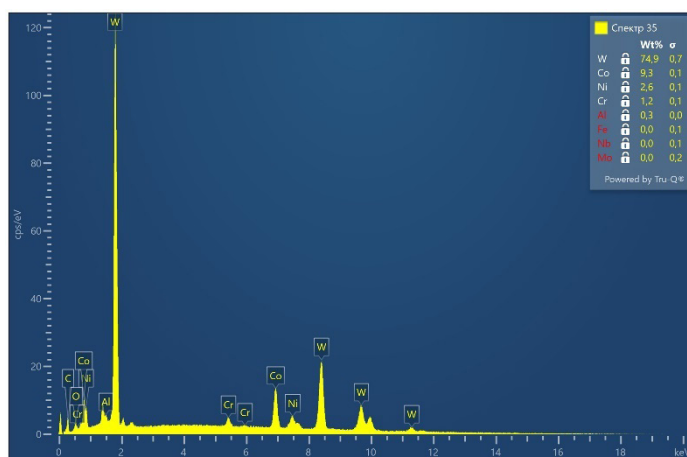
а



б



в



г

Рис. 16. Микрофотографии СЭМ и EDX прирезцовой поверхности стружки:

а, б – режим 23,8 м/мин, 80 мм/мин; в, г – режим 23,8 м/мин, 200 мм/мин

Fig. 16. SEM micrographs and EDX analysis of the rake surface of chips:

а, б – conditions: 23.8 m/min, 80 mm/min; в, г – conditions: 23.8 m/min, 200 mm/min

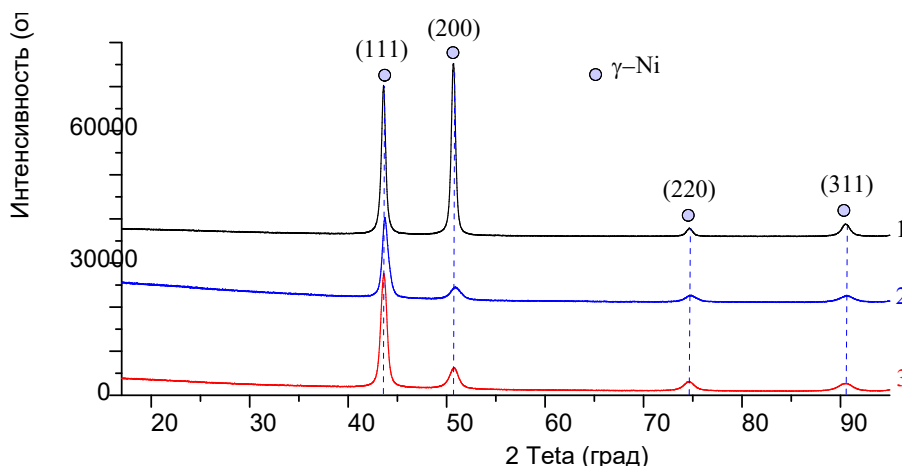


Рис. 17. Рентгенограммы (фрезерование вдоль):

1 – Inconel 625 после фрезерования, $v = 23,8$ м/мин, $S_{\text{мин}} = 200$ мм/мин; 2 – стружка, полученная при $v = 11,9$ м/мин, $S_{\text{мин}} = 200$ мм/мин; 3 – стружка, полученная при $v = 11,9$ м/мин, $S_{\text{мин}} = 25$ мм/мин

Fig. 17. X-ray diffraction patterns (milling along the build direction):

1 – Inconel 625 after milling ($v = 23.8$ m/min, $S_{\text{min}} = 200$ mm/min); 2 – chips ($v = 11.9$ m/min, $S_{\text{min}} = 200$ mm/min); 3 – chips ($v = 11.9$ m/min, $S_{\text{min}} = 25$ mm/min)

танной поверхности, так и в стружке (рис. 16). Такая текстура проявляется в преимущественной ориентации плоскостей (111) γ -Ni.

Для количественной оценки степени текстуры до и после фрезерования Inconel 625 вычислялись коэффициенты текстуры. Последние были рассчитаны для исходного образца Inconel 625 до фрезерования, для образца Inconel 625 после фрезерования, а также для стружек, и эти данные были сравнены с коэффициентами текстуры, рассчитанными по пиковым интенсивностям и взятыми из стандартной базы данных для γ -Ni (00-023-0297) (рис. 18).

Приведенные результаты подтверждают два факта. Во-первых, в исходном Inconel 625 до фрезерования присутствует выраженная текстура, обусловленная дендритным ростом. Во-вторых, после проведения фрезерной обработки на поверхности заготовки, а также в стружке фиксируется ослабление данной текстуры. Подобное уменьшение интенсивности текстуры, предположительно, обусловлено воздействием значительных пластических деформаций. Под их влиянием исходная высокотекстурированная структура претерпевает изменения, которые вызывают спонтанную дезориентацию кристаллографических плоскостей обрабатываемого материала.

Помимо снижения выраженности рентгенографической текстуры на поверхности после

фрезерования и в стружке, в рамках настоящего исследования были выявлены структурные перестройки. Они выражаются в уширении дифракционных рефлексов по сравнению с исходным уровнем, что служит типичным признаком протекания интенсивных пластических деформаций (рис. 19).

Пики в образцах и стружках после фрезерования также смещались относительно исходного состояния в область больших углов (рис. 19), что приводит к уменьшению параметра кубической решетки γ -Ni в стружке и может быть связано с повышенным уровнем сжимающих напряжений.

Износ твердосплавного инструмента без покрытия при резании принято описывать с помощью трех механизмов: абразивного, адгезионного и окислительного [28]. В условиях низких скоростей доминирует абразивный износ из-за низкой температуры, недостаточной для активации иных механизмов.

Для случая обработки суперсплавов на основе никеля абразивный износ является характерным [30] из-за наличия в составе обрабатываемого материала частиц твердых карбидов и оксидов, которые формируют на поверхности режущих кромок характерные борозды (царапины). Вместе с тем с ростом температуры может усиливаться роль окислительного износа, ускоряющего абразивные процессы износа инструмента.

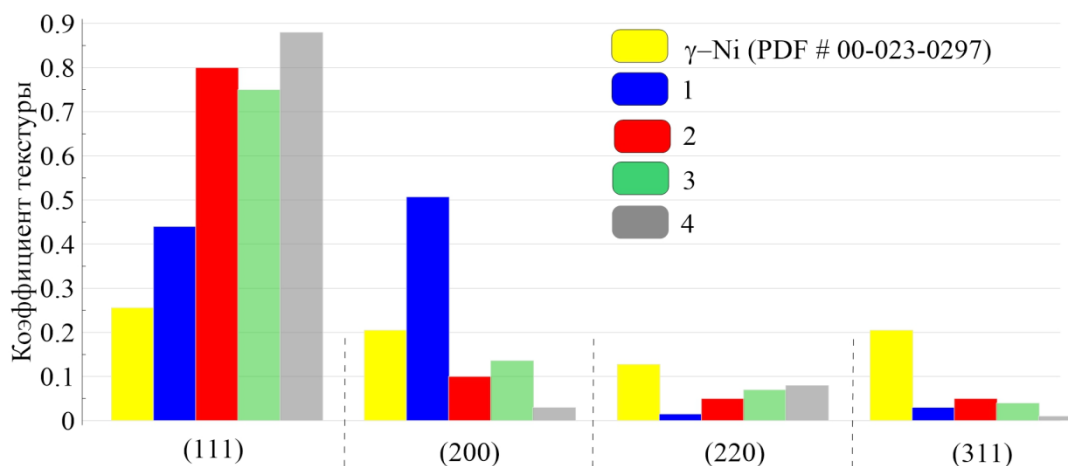


Рис. 18. Коэффициенты текстуры, рассчитанные по рентгенограммам, представленным на рис. 7 и рис. 19, в сравнении с полученными из стандартной базы данных:

1 – Inconel 625 после фрезерования, $v = 23,8$ м/мин, $S_{\min} = 200$ мм/мин; 2 – стружка, полученная при $v = 11,9$ м/мин, $S_{\min} = 200$ мм/мин; 3 – стружка, полученная при $v = 11,9$ м/мин, $S_{\min} = 25$ мм/мин; 4 – исходный образец Inconel 625 до фрезерования

Fig. 18. Texture coefficients calculated from the X-ray diffraction patterns shown in Figs. 7 and 19 compared with those obtained from the standard database:

1 – Inconel 625 after milling ($v = 23.8$ m/min, $S_{\min} = 200$ mm/min); 2 – chips ($v = 11.9$ m/min, $S_{\min} = 200$ mm/min); 3 – chips ($v = 11.9$ m/min, $S_{\min} = 25$ mm/min); 4 – initial Inconel 625 sample before milling

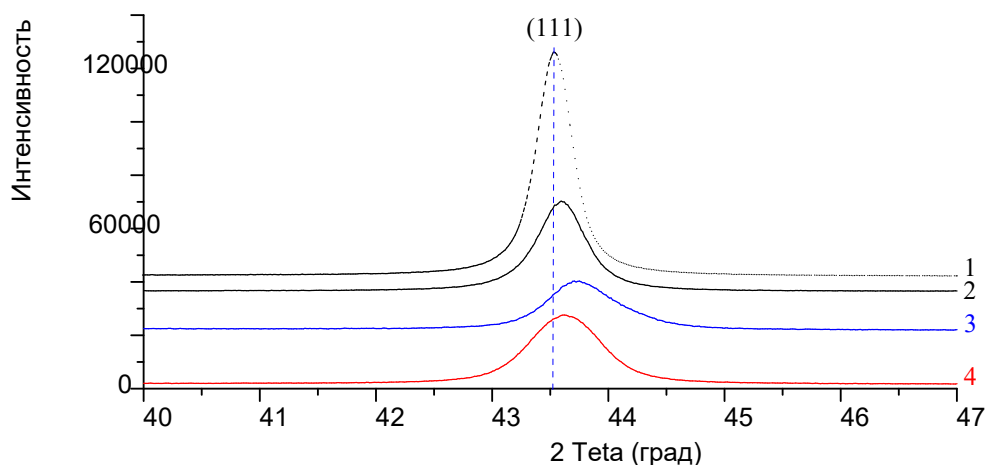


Рис. 19. Рентгенограммы:

1 – исходный образец Inconel 625; 2 – поверхность Inconel 625 после фрезерования, $v = 23,8$ м/мин, $S_{\min} = 200$ мм/мин; 3 – стружка, полученная при $v = 11,9$ м/мин, $S_{\min} = 200$ мм/мин; 4 – стружка, полученная при $v = 11,9$ м/мин, $S_{\min} = 25$ мм/мин

Fig. 19. X-ray diffraction patterns:

1 – initial Inconel 625 sample; 2 – Inconel 625 after milling ($v = 23.8$ m/min, $S_{\min} = 200$ mm/min); 3 – chips ($v = 11.9$ m/min, $S_{\min} = 200$ mm/min); 4 – chips ($v = 11.9$ m/min, $S_{\min} = 25$ mm/min)

Адгезионный износ возникает при высоких давлениях и температурах на передней грани инструмента в месте ее контакта со стружкой. Под действием этих факторов активизируется интенсивная пластическая деформация, приводящая к

обнажению свежих поверхностных слоев. Происходит адсорбция атомов взаимодействующих материалов с образованием межатомных связей, формирующих участки сцепления. Относительное перемещение зуба фрезы и заготовки вызы-

вает разрушение этих связей, что влечет за собой смещение либо вытягивание отдельных зерен или их групп. Таким образом, реализуется износ, обусловленный адгезией.

Пластическая деформация инструментального материала связана с ползучестью при высоких температурах [31]. Кобальтовая связка деформируется более интенсивно, так как ее сопротивление ползучести в условиях высоких температур недостаточно [32]. Размягчение кобальтовой связки провоцирует вырыв зерен WC из структуры материала инструмента.

О наличии адгезионного взаимодействия между обрабатываемым материалом и инструментом в процессе резания свидетельствуют два обстоятельства. Во-первых, на прирезцовой стороне стружки обнаружены элементы W, Co, Ni и Cr (рис. 16). Во-вторых, после фрезерования на режущих кромках фрезы WC-Co зафиксировано образование новых фаз $Cr_{23}C_6$ и NiW (рис. 12). Высказывается предположение, что под действием сил сцепления, возникающих между элементами обрабатываемого материала и инструментального материала, инициируется смещение одного либо нескольких расположенных рядом зерен инструмента. Результатом становится существенное ослабление режущей кромки, что способно вызвать ее разрушение. Исходя из вышесказанного, для минимизации адгезионного изнашивания режимы резания должны назначаться на научной основе.

Условиями для возникновения окислительного износа служат плотный контакт передней грани инструмента со стружкой и одновременный контакт задней поверхности с обработанной стороной заготовки. В месте такого контакта развивается трение с высокой интенсивностью, что сопровождается активным выделением тепловой энергии. Низкая теплопроводность, присущая сплаву Inconel 625, приводит к тому, что в паре «инструмент – стружка» устанавливаются чрезвычайно высокие температуры. В этих условиях Co и WC взаимодействуют с кислородом из воздуха с образованием оксидов (CoO , WO_3 , Co_3O_4 и др.), которые ухудшают режущие свойства инструмента и вызывают интенсификацию износа [33].

В рамках проведенного исследования признаки окислительного износа не подтвердились. Метод EDX не зарегистрировал кислорода

(рис. 16), а РСА не выявил кислородсодержащих фаз на режущих кромках фрезы после фрезерования (рис. 12). Таким образом, вклад окислительного износа в разрушение режущего инструмента в настоящей работе можно считать незначительным.

Выводы

1. В результате проведенных исследований установлено, что фрезерование сплава Inconel 625, полученного по аддитивной технологии EBAM, сопровождается весьма высокими силами резания. С увеличением минутной подачи сила Ph возрастает более интенсивно, чем боковая сила Pv . Обнаружена анизотропия обрабатываемости: при фрезеровании вдоль направления синтеза силы резания незначительно превосходят соответствующие значения при фрезеровании поперек, что коррелирует с более высоким пределом текучести в продольном направлении.

2. Для скоростей резания 11,9 и 23,8 м/мин получены линейные регрессионные модели, описывающие зависимость составляющих сил резания от минутной подачи. Увеличение скорости резания в указанном интервале сопровождается снижением абсолютных значений сил резания, но одновременно возрастает длина стружки, что осложняет ее эвакуацию по стружечной канавке из зоны резания. Установлено, что Inconel 625 EBAM в состоянии as-built характеризуется пониженным пределом текучести (144...171 МПа) вследствие крупнозернистой столбчатой структуры и отсутствия дисперсионного твердения, однако сохраняет выраженную анизотропию свойств (~19 % разницы между продольным и поперечным направлениями), что необходимо учитывать при назначении режимов резания.

3. Показано, что морфология стружки существенно зависит от режимов резания. С увеличением подачи и скорости резания наблюдается увеличение длины стружки (до 1,55 мм и более), исчезновение ее скручивания и появление глубоких трещин, что при дальнейшей интенсификации режимов приводит к пакетированию в стружечной канавке и поломке инструмента. При поперечном фрезеровании даже при малых подачах, в противоположность скрученной форме стружки при продольном фрезеровании, стружка



образуется плоская, что затрудняет ее отвод. Однако это не увеличивает силы фрезерования.

4. Установлено, что доминирующим механизмом износа твердосплавных концевых фрез при обработке Inconel 625, полученного по аддитивной технологии ЕВАМ, является адгезионно-усталостный износ. Об этом свидетельствует обнаружение на прирезцовых поверхностях стружки частиц WC инструментального материала, а также наличие на режущих кромках фаз Cr_{23}C_6 и NiW, образовавшихся в результате термомеханического взаимодействия материала инструмента и заготовки.

5. Рентгеноструктурный анализ показал, что процесс фрезерования приводит к снижению исходной кристаллографической текстуры аддитивно полученного материала, уширению дифракционных пиков и их смещению, что свидетельствует о протекании интенсивной пластической деформации в поверхностном слое заготовки и стружке. Несмотря на обработку без СОЖ, кислородсодержащих фаз на режущих кромках обнаружено не было, что указывает на несущественную роль окислительного износа в исследованных условиях фрезерования.

6. Экспериментально определены рациональные режимы фрезерования (встречная подача, скорость резания не более 23,8 м/мин, подача до 200 мм/мин, глубина резания 1 мм, ширина фрезерования 7 мм), обеспечивающие работоспособность твердосплавного инструмента. Превышение подачи до 250 мм/мин приводит к катастрофическому скалыванию режущих кромок в первые секунды резания.

Список литературы

1. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products / R. M'Saoubi, J.C. Outeiro, H. Chandrasekaran, O.W. Dillon Jr., I.S. Jawahir // *International Journal of Sustainable Manufacturing*. – 2008. – Vol. 1 (1–2). – P. 203–236. – DOI: 10.1504/IJSM.2008.019234.

2. Part functionality alterations induced by changes of surface integrity in metal milling process / C. Yue, H. Gao, X. Liu, S.Y. Liang // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8. – DOI: 10.3390/app8122550.

3. Kaya E., Akyüz B. Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys // *Open Engineering*. – 2017. – Vol. 7. – P. 330–342. – DOI: 10.1515/eng-2017-0037.

4. Deshpande Y.V., Andhare A.B., Padole P.M. How cryogenic techniques help in machining of nickel alloys? // *Machining Science and Technology*. – 2018. – Vol. 22. – P. 543–584. – DOI: 10.1080/10910344.2017.1382512.

5. Experimental investigation on surface integrity of end milling nickel based alloy – Inconel 718 / X. Cai, S. Qin, J. Li, Q. An, M. Chen // *Machining Science and Technology*. – 2014. – Vol. 18. – DOI: 10.1080/10910344.2014.863627.

6. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity / A. Devillez, G. Le Coz, S. Dominiak, D. Dudzinski // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.04.011.

7. Deshpande et al. Enhancing the machinability of Inconel 625 milling using cryogen and blend of biodegradable oils and application of advanced algorithms / Y.V. Deshpande, S. Binani, A. Singh, M. Mohatkar, A.S. Chatpalliwar, P.S. Barve // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2023. – Vol. 45. – Art. 587. – DOI: 10.1007/s40430-023-04509-y.

8. Inconel 625 sustainable milling surface integrity and the dependence on alloy processing route / R.H.L. Silva, J. Schoop, A. Hassui, I.S. Jawahir // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 130. – P. 4493–4512. – DOI: 10.1007/s00170-023-12938-1.

9. Akgün M., Demir H. Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy // *Journal of Polytechnic*. – 2021. – Vol. 24 (2). – P. 391–400. – DOI: 10.2339/politeknik.706605.

10. Akgün M., Demir H. Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 superalloy // *Surface Review and Letters*. – 2021. – Vol. 28 (4). – DOI: 10.1142/S0218625X21500116.

11. Jarosz K., Patel K.V., Özel T. Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 111. – P. 1535–1551. – DOI: 10.1007/s00170-020-06222-9.

12. Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625 / A. Abeni, D. Loda, T. Özel, A. Attanasio // *Production Engineering*. – 2020. – Vol. 14. – P. 613–627. – DOI: 10.1007/s11740-020-00980-x.

13. Tool life and wear mechanisms during Alloy 625 face milling / M.A. Rodrigues, A. Hassui, R.H.L. Silva, D. Loureiro // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 85. – P. 1439–1448. – DOI: 10.1007/s00170-015-8056-4.

14. The effect of finish-milling operation on surface quality and wear resistance of Inconel 625 produced by selective laser melting additive manufacturing / E. Tascioglu, Y. Kaynak, Ö. Poyraz, A. Orhangül, S. Ören // *Advanced Surface Enhancement*. – Singapore: Springer, 2020. – P. 263–272. – DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_27.
15. Chauhan S., Trehan R., Singh R.P. Classification of surface roughness for CNC face milling of Inconel 625 superalloy utilizing cutting force signal features with SVM and ANN // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 113. – P. 9–18. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.101.
16. Energy consumption and economic modelling of performance measures in machining of wire arc additively manufactured Inconel-625 / P. Raval, D. Patel, R. Prajapati, V. Badheka, M.K. Gupta, N. Khanna // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2022. – Vol. 32. – DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00434.
17. Effects of machining parameters on finishing additively manufactured nickel-based alloy Inconel 625 / J. Fei, G. Liu, K. Patel, T. Özel // *Journal of Manufacturing Materials Processing*. – 2020. – Vol. 4. – DOI: 10.3390/jmmp4020032.
18. Kaynak Y., Tascioglu E. Finish machining-induced surface roughness, microhardness and XRD analysis of selective laser melted Inconel 718 alloy // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 71. – P. 500–504. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.05.013.
19. Characterization of Inconel 718® superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing: effect on mechanical properties and machinability/ U. Alonso, F. Veiga, A. Suárez, A.G. Del Val // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2665–2676. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.132.
20. Development of a multimaterial structure based on CuAl9MN2 bronze and Inconel 625 alloy by double-wire-feed additive manufacturing / K. Kalashnikov, T. Kalashnikova, V. Semenchuk, E. Knyazhev, A. Panfilov, A. Cheremnov, A. Chumaevskii, S. Nikonov, A. Vorontsov, V. Rubtsov, E. Kolubaev // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (12). – DOI: 10.3390/met12122048.
21. Структура заготовок из сплава Inconel 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча / А.Е. Болтрушевич, Н.В. Мартюшев, В.Н. Козлов, Ю.С. Кузнецова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 206–217. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217.
22. Choi J.G., Yang M.Y. In-process prediction of cutting depths in end milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – Vol. 39 (5). – P. 705–721. – DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00067-4.
23. Исследование сил резания и обрабатываемости при фрезеровании порошковой коррозионно-стойкой стали, полученной по технологии прямого лазерного выращивания (LMD) / А.С. Бабаев, В.Н. Козлов, А.Р. Семёнов, А.С. Шевчук, В.А. Овчаренко, Е.А. Сударев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 38–56. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-38-56.
24. Study of the machinability of an Inconel 625 composite with added NiTi-tib2 fabricated by direct laser deposition / A. Arlyapov, S. Volkov, V. Promakhov, A. Matveev, A. Babaev, A. Vorozhtsov, A. Zhukov // *Metals*. – 2022. – Vol. 12. – DOI: 10.3390/met12111956.
25. Episodes of chip formation in micro-to-nanoscale cutting of Inconel 625 / M.A. Rahman, M. Rahman, K.S. Woon, M. Mia // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2021. – Vol. 199. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106407.
26. The machinability of stainless steel 316 L fabricated by selective laser melting: Typical cutting responses, white layer and evolution of chip morphology / G. Li, W. Xu, X. Jin, L. Liu, S. Ding, C. Li // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2023. – Vol. 315. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.117926.
27. Effect of post-deposition heat treatments on high-temperature wear and corrosion behavior of Inconel 625 / E. Kocaman, U. Gürol, A. Günen, G. Çam // *Materials Today Communications*. – 2025. – Vol. 42. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.111101.
28. Experimental study of cutting-parameter and tool life reliability optimization in Inconel 625 machining based on wear map approach / E. Liu, W. An, Z. Xu, H. Zhang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 53. – P. 34–42. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.006.
29. 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 / Ç.V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvak, Ş. Şirin // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 134. – P. 443–456. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.02.027.
30. Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: a review / W. Akhtar, J. Sun, P. Sun, W. Chen, Z. Saleem // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 9. – P. 106–119. – DOI: 10.1007/s11465-014-0301-2.
31. Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44. – P. 637–647. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006.
32. Degradation modes and tool wear mechanisms in finish and rough machining of Ti17 Titanium alloy under

high-pressure water jet assistance / Y. Ayed, G. Germain, A. Ammar, B. Furet // *Wear*. – 2013. – Vol. 305 (1–2). – P. 228–237. – DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.018.

33. Experimental study on the oxidation and diffusion behavior of Inconel 625 and tool materials / E. Liu, N. Wang, J. Qi, Z. Xu, X. Liu, H. Zhang // *Crystals*. – 2018. – Vol. 8 (12). – DOI: 10.3390/cryst8120471.

34. Study of a methodology for calculating contact stresses during blade processing of structural steel / V. Kozlov, A. Babaev, N. Schulz, A. Semenov, A. Shevchuk // *Metals*. – 2023. – Vol. 13 (12). – DOI: 10.3390/met13122009.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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



Cutting forces, chip morphology and wear characteristics in milling of Inconel 625 alloy produced by EBAM

Artem Babaev^{a, *}, Viktor Kozlov^b, Nikolai Savchenko^c, Artem Semenov^d, Roman Tsygankov^e

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

^a <https://orcid.org/0000-0003-2334-1679>, temkams@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>, kozlov-victor@bk.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0001-8254-5853>, savnick@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>, artems2102@yandex.ru;
^e <https://orcid.org/0000-0002-2660-2312>, tsygankovrs@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 March 2026

Revised: 11 April 2026

Accepted: 14 April 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Inconel 625

Milling

Additive technologies

Cutting force

Chip

Wear

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-79-10166, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10166/>).

ABSTRACT

Introduction. Nickel-based alloys such as *Inconel 625* are widely used in the aerospace industry due to their high heat resistance and corrosion resistance. However, their machining is complicated by the low thermal conductivity of the material, its tendency to work hardening, and accelerated tool wear. The advent of additive technologies makes it possible to obtain blanks close to the final shape, but the machinability of such materials has not been sufficiently studied, especially taking into account the anisotropy of properties caused by synthesis conditions. In this regard, the study of cutting forces, the explanation of chip morphology, and the description of the causes of tool wear during milling of additively manufactured *Inconel 625* is an urgent task. **Methods.** The samples were obtained by electron beam additive manufacturing (EBAM) from *Inconel 625* wire. Milling was carried out with uncoated cemented carbide end mills. The cutting forces were recorded using a three-component dynamometer *Kistler mod. 9257BA*. The microstructure, chip morphology, and tool wear were studied by scanning electron microscopy using energy-dispersive analysis and X-ray diffraction analysis. **Results and discussion.** It has been found that in conventional milling, the cutting forces increase linearly with increasing feed rate. The cutting speed of 23.8 m/min reduces cutting forces compared to 11.9 m/min, but leads to an increase in chip length and deterioration of its removal. Machinability anisotropy is revealed: the cutting forces along the synthesis direction exceed the corresponding values when milling transversely across, which correlates with a higher yield strength in the longitudinal direction. The chip length increases with increasing feed rate and cutting speed, reaching 1.55 mm under maximum conditions, while the chips lose their coiled shape and become cracked. The dominant wear mechanism is adhesion-fatigue wear, confirmed by the presence of *WC* particles on the rake surface of the chips and the formation of $Cr_{23}C_6$ and *NiW* phases on the cutting edges. Oxidative wear does not play a significant role. X-ray diffraction analysis showed a decrease in the initial crystallographic texture in the chips and on the machined surface, as well as a broadening of the peaks, indicating severe plastic deformation. **Conclusions.** Rational milling parameters have been determined (cutting speed from 11.9 to 23.8 m/min, feed rate of no more than 200 mm/min, depth of cut up to 1 mm, width of cut up to 7 mm), ensuring tool operability. An increase in the feed rate to 250 mm/min leads to catastrophic failure of the cutting edges. The results obtained can be used to develop technological recommendations for the subtractive machining of parts made of additively manufactured *Inconel 625* (EBAM).

For citation: Babaev A.S., Kozlov V.N., Savchenko N.L., Semenov A.R., Tsygankov R.S. Cutting forces, chip morphology and wear characteristics in milling of Inconel 625 alloy produced by EBAM. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 72–98. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-72-98. (In Russian).

References

1. M'Saoubi R., Outeiro J.C., Chandrasekaran H., Dillon O.W. Jr., Jawahir I.S. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 2008, vol. 1 (1–2). pp. 203–236. DOI: 10.1504/IJSM.2008.019234.

* Corresponding author

Babaev Artem S., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher
 National Research Tomsk State University,
 36 Lenin Avenue,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 952 805-09-26, e-mail: temkams@mail.ru

2. Yue C., Gao H., Liu X., Liang S.Y. Part functionality alterations induced by changes of surface integrity in metal milling process. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8. DOI: 10.3390/app8122550.
3. Kaya E., Akyüz B. Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys. *Open Engineering*, 2017, vol. 7, pp. 330–342. DOI: 10.1515/eng-2017-0037.
4. Deshpande Y.V., Andhare A.B., Padole P.M. How cryogenic techniques help in machining of nickel alloys? *Machining Science and Technology*, 2018, vol. 22, pp. 543–584 DOI: 10.1080/10910344.2017.1382512.
5. Cai X., Qin S., Li J., An Q., Chen M. Experimental investigation on surface integrity of end milling nickel based alloy – Inconel 718. *Machining Science and Technology*, 2014, vol. 18. DOI: 10.1080/10910344.2014.863627.
6. Devillez A., Le Coz G., Dominiak S., Dudzinski D. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.04.011.
7. Deshpande Y.V., Binani S., Singh A., Mohatkar M., Chatpalliwar A.S., Barve P.S. Enhancing the machinability of Inconel 625 milling using cryogen and blend of biodegradable oils and application of advanced algorithms. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, vol. 45, art. 587. DOI: 10.1007/s40430-023-04509-y.
8. Silva R.H.L., Schoop J., Hassui A., Jawahir I.S. Inconel 625 sustainable milling surface integrity and the dependence on alloy processing route. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 130, pp. 4493–4512. DOI: 10.1007/s00170-023-12938-1.
9. Akgün M., Demir H. Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy. *Journal of Polytechnic*, 2021, vol. 24 (2), pp. 391–400. DOI: doi.org/10.2339/politeknik.706605.
10. Akgün M., Demir H. Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 superalloy. *Surface Review and Letters*, 2021, vol. 28 (4). DOI: 10.1142/S0218625X21500116.
11. Jarosz K., Patel K.V., Özel T. Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 111, pp. 1535–1551. DOI: 10.1007/s00170-020-06222-9.
12. Abeni A., Loda D., Özel T., Attanasio A. Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625. *Production Engineering*, 2020, vol. 14, pp. 613–627. DOI: 10.1007/s11740-020-00980-x.
13. Rodrigues M.A., Hassui A., Silva R.H.L., Loureiro D. Tool life and wear mechanisms during Alloy 625 face milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 85, pp. 1439–1448. DOI: 10.1007/s00170-015-8056-4.
14. Tascioglu E., Kaynak Y., Poyraz Ö., Orhangül A., Ören S. The effect of finish-milling operation on surface quality and wear resistance of Inconel 625 produced by selective laser melting additive manufacturing. *Advanced Surface Enhancement*, Singapore: Springer, 2020, pp. 263–272. DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_27.
15. Chauhan S., Trehan R., Singh R.P. Classification of surface roughness for CNC face milling of Inconel 625 superalloy utilizing cutting force signal features with SVM and ANN. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 113, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.101.
16. Raval P., Patel D., Prajapati R., Badheka V., Gupta M.K., Khanna N. Energy consumption and economic modelling of performance measures in machining of wire arc additively manufactured Inconel-625. *Sustainable Materials and Technologies*, 2022, vol. 32. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00434.
17. Fei J., Liu G., Patel K., Özel T. Effects of machining parameters on finishing additively manufactured nickel-based alloy Inconel 625. *Journal of Manufacturing Materials Processing*, 2020, vol. 4. DOI: 10.3390/jmmp4020032.
18. Kaynak Y., Tascioglu E. Finish machining-induced surface roughness, microhardness and XRD analysis of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 71, pp. 500–504. DOI: 10.1016/j.procir.2018.05.013.
19. Alonso U., Veiga F., Suárez A., Del Val A.G. Characterization of Inconel 718® superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing: effect on mechanical properties and machinability. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 14, pp. 2665–2676. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.132.
20. Kalashnikov K., Kalashnikova T., Semenchuk V., Knyazhev E., Panfilov A., Cheremnov A., Chumaevskii A., Nikonov S., Vorontsov A., Rubtsov V., Kolubaev E. Development of a multimaterial structure based on CuAl9MN2 bronze and Inconel 625 alloy by double-wire-feed additive manufacturing. *Metals*, 2022, vol. 12 (12). DOI: 10.3390/met12122048.
21. Boltrushevich A.E., Martyushev N.V., Kozlov V.N., Kuznetsova Yu.S. Struktura zagotovok iz splava Inconel 625, poluchennykh elektrodugovoi naplavkoi i naplavkoi s pomoshch'yu elektronnoy luchi [Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217.

22. Choi J.G., Yang M.Y. In-process prediction of cutting depths in end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39 (5), pp. 705–721. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00067-4.
23. Babaev A.S., Kozlov V.N., Semenov A.R., Shevchuk A.S., Ovcharenko V.A., Sudarev E.A. Issledovanie sil rezaniya i obrabatyvaemosti pri frezerovanii poroshkovoi korrozionno-stoikoï stali, poluchennoi po tekhnologii pryamogo lazernogo vyrashchivaniya (LMD) [Investigation of cutting forces and machinability during milling of corrosion-resistant powder steel produced by laser metal deposition]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 38–56. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-38-56.
24. Arlyapov A., Volkov S., Promakhov V., Matveev A., Babaev A., Vorozhtsov A., Zhukov A. Study of the machinability of an Inconel 625 composite with added NiTi-TiB₂ fabricated by direct laser deposition. *Metals*, 2022, vol. 12. DOI: 10.3390/met12111956.
25. Rahman M.A., Rahman M., Woon K.S., Mia M. Episodes of chip formation in micro-to-nanoscale cutting of Inconel 625. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 199. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106407.
26. Li G., Xu W., Jin X., Liu L., Ding S., Li C. The machinability of stainless steel 316 L fabricated by selective laser melting: Typical cutting responses, white layer and evolution of chip morphology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, vol. 315. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.117926.
27. 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. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.111101.
28. 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, pp. 34–42. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.006.
29. Yıldırım Ç.V., 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, pp. 443–456. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.02.027.
30. Akhtar W., Sun J., Sun P., Chen W., Saleem Z. Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: a review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2014, vol. 9, pp. 106–119. DOI: 10.1007/s11465-014-0301-2.
31. Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 637–647. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006.
32. 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 (1–2), pp. 228–237. DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.018.
33. Liu E., Wang N., Qi J., Xu Z., Liu X., Zhang H. Experimental study on the oxidation and diffusion behavior of Inconel 625 and tool materials. *Crystals*, 2018, vol. 8 (12). DOI: 10.3390/cryst8120471.
34. Kozlov V., Babaev A., Schulz N., Semenov A., Shevchuk A. Study of a methodology for calculating contact stresses during blade processing of structural steel. *Metals*, 2023, vol. 13 (12). DOI: 10.3390/met13122009.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 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>).