

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование особенностей образования стружки и износа рабочих площадок фрезерных пластин с CVD-покрытием при высокоскоростной обработке α -Ti

Пётр Пивкин^{1, a}, Артём Бабаев^{2, b, *}, Николай Савченко^{3, c}, Виктор Козлов^{3, d}, Артём Семёнов^{3, e},
 Владимир Гречишников^{1, f}, Людмила Уварова^{1, g}, Алексей Надыкто^{1, h}

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Вадковский пер., 3а, г. Москва, 127055, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7547-4652>,  pmpivkin@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-2334-1679>,  temkams@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8254-5853>,  savnick@ispms.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>,  kozlov-victor@bk.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>,  artems2102@yandex.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0001-5535-0724>,  grechishnikov1935@gmail.com;

^g  <https://orcid.org/0000-0003-1137-6436>,  l.uvarova@stankin.ru; ^h  <https://orcid.org/0000-0003-3652-7421>,  abnadykto@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 04 апреля 2026

Рецензирование: 14 апреля 2026

Принята к печати: 30 апреля 2026

Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Титановый сплав

Высокоскоростное фрезерование

Стружка

Износ

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ № 22-79-10353-П.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ЦКП ФХМА (ТПУ).

АННОТАЦИЯ

Введение. Ввиду широкого применения технически чистого α -титана в ответственных изделиях, актуальна задача интенсификации его обработки резанием. Существующие исследования преимущественно сфокусированы на легированных сплавах, в то время как особенности высокоскоростного сухого фрезерования чистого α -Ti изучены недостаточно. **Целью работы** являлось исследование влияния режимов фрезерования на износ CVD-покрытия ($Al_2O_3/TiCN+TiN$) твердосплавных пластин, морфологию стружки и деформационные процессы в поверхностном слое сплава BT1-0. **Методология.** Эксперименты проводились методом торцевого попутного фрезерования в диапазоне скоростей резания (v) 100...300 м/мин, подачи (f) 50...100 мм/мин и глубин резания (a_p) 0,2...0,4 мм без СОЖ. Состояние режущих кромок и морфология стружки исследовались с помощью СЭМ и EDX. Данные обрабатывались методами корреляционного и регрессионного анализа. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что с ростом скорости резания интенсифицируются адгезионные процессы и термомеханические напряжения, приводящие к локальным сколам и отслоениям CVD-покрытия на передней поверхности. При скорости 300 м/мин наблюдаются значительные налипы материала, формирующие нестабильный нарост. Исследование стружки выявило переход от сливной к элементной форме. Установлена сильная отрицательная корреляция ($r = -0,81$) между скоростью резания и высотой выступов (h_3) на стружке, а также умеренное положительное влияние глубины резания на коэффициент её сплошности ($r = 0,55$). Полученные результаты значимы для оптимизации режимов высокоскоростной сухой обработки изделий из технически чистого титана, используемых в криогенной технике и теплообменниках. **Выводы.** Доминирующими механизмами износа являются адгезия и термомеханическое усталостное разрушение покрытия. Предельным режимом, приводящим к интенсивному налипообразованию, является комбинация $v = 300$ м/мин, $f = 100$ мм/мин, $a_p = 0,4$ мм. Для снижения износа рекомендуется контроль тепловыделения путём оптимизации скорости резания и глубины фрезерования.

Для цитирования: Исследование особенностей образования стружки и износа рабочих площадок фрезерных пластин с CVD-покрытием при высокоскоростной обработке α -Ti / П.М. Пивкин, А.С. Бабаев, Н.Л. Савченко, В.Н. Козлов, А.Р. Семёнов, В.А. Гречишников, Л.А. Уварова, А.Б. Надыкто // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 196–222. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-196-222.

Введение

Титановые сплавы широко используются в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и автомобильная, благодаря их достаточной прочности. Титановые сплавы также применяются в нефтехимической промышленности, архитектуре и в различных медицинских устройствах. Это обусловлено высокой удельной прочностью и химической

*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



стабильностью указанных сплавов. Однако некоторые свойства сплавов вызывают трудности при механической обработке. Обработка титана сложна из-за его плохой теплопроводности, высоких температурных напряжений и формирующихся на рабочих поверхностях режущего клина высоких сжимающих нагрузок, приводящих к износу и разрушению инструмента. Еще большие сложности возникают при интенсификации обработки, т. е. высоких скоростях резания, что оправдано при необходимости ускорения выпуска изделий. Повышение скорости резания сопровождается ростом температуры обработки, способствующей разупрочнению инструментального материала, тем самым сокращается срок его службы.

Известно, что титан обладает полиморфизмом и существует в двух аллотропических модификациях – низкотемпературная модификация α -титан и высокотемпературная модификация β -титан. Низкотемпературная модификация имеет место при температуре до 882,5 °C и характеризуется гексагональной решеткой с плотной упаковкой атомов. Высокотемпературная модификация существует при температурах выше 882,5 °C и имеет кубическую объемноцентрированную решетку. Исследуемый в настоящей работе сплав BT1-0 относится к α -сплавам титана и характеризуется сохранением пластических свойств после длительного совместного воздействия высоких температур и напряжений.

Трудности обработки титановых сплавов приводятся в работе Р. Командури [1]. К основным сложностям относятся короткий срок службы инструмента и низкая скорость съема металла, которые в основном обусловлены плохими термическими свойствами сплава (низкой теплопроводностью), периодической грубой неоднородной деформацией, нестабильностью процесса стружкообразования, колебаниями составляющих силы резания, высокой температурой в области контакта инструмента со стружкой, высокой химической реактивностью сплава и низким модулем упругости. Последнее вызывает большую упругую деформацию части металла (толщину слоя), уходящего под режущую кромку инструмента, что впоследствии вызывает большую величину упругого восстановления поверхности резания, находящейся в контакте с задней поверхностью инструмента, и, как

следствие, большую величину нормальных контактных напряжений на задней поверхности и особенно на фаске износа по задней поверхности инструмента [2].

Так, например, при токарной обработке титановых сплавов рекомендуется применять твердосплавный инструмент (группа WC+Co) на скоростях резания менее 60 м/мин, что весьма ограничивает возможности по ускорению выпуска готовой продукции.

Для достижения более высокой эффективности обработки необходимо максимально уменьшить температуру резания, быстро отводить тепло из зоны обработки. В соответствии с этим принципом желательно применять инструмент с высокой теплопроводностью и большим передним углом для уменьшения тепловыделения, но большие контактные напряжения на передней поверхности инструмента при обработке труднообрабатываемых групп титановых сплавов вынуждают использовать отрицательные передние углы γ до минус 30° [3], а также применять обильную подачу охлаждающей жидкости на водной основе или иные методы охлаждения [4–6].

С другой стороны, применение СОЖ нежелательно из-за загрязнения дорогой титановой стружки и невозможности её дальнейшей переработки [7].

По данным исследований [8–14] высокоскоростной обработкой резанием для титановых сплавов считается режим, при котором скорость резания превосходит диапазон 150...200 м/мин при различных подачах и глубинах резания. Такое утверждение справедливо для легкообрабатываемых групп титановых сплавов и технически чистого титана, а для труднообрабатываемых групп титановых сплавов скорость резания v не должна превышать 30 м/мин [7].

Обзор литературы показывает, что высокоскоростное фрезерование титановых сплавов в основном рассматривается в контексте обработки легированных сплавов, например, Ti-6Al-4V [15–17].

Так, в работе [18] исследователи Jawaid, Sharif и Koksai использовали твердосплавные инструменты с покрытиями PVD-TiN и CVD-TiCN/Al₂O₃ для торцевого фрезерования сплава Ti-6Al-4V с различными скоростями резания – 55, 65, 80 и 100 м/мин, с подачей 0,1 и 0,15 мм на

зуб, осевой глубиной резания 2 мм и радиальной глубиной резания 58 мм. Оценку эффективности резания выполняли с точки зрения механизмов износа, стойкости инструмента и видов отказов. Авторы отметили чрезмерное выкрашивание и пластическую деформацию режущей кромки, отслаивание и (или) выкрашивание передней поверхности, а также неравномерный износ задней поверхности, что является доминирующим признаком износа инструментов как с PVD-, так и с CVD-покрытием.

В работе [19] обрабатываемость сплава Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V при высокоскоростном фрезеровании исследовалась с точки зрения износа инструмента и целостности поверхности. Износ режущих инструментов с образованием проточки увеличивается с повышением скорости резания, что приводит к снижению стойкости инструмента. При высокоскоростном фрезеровании удалось добиться хорошей целостности поверхности заготовки.

В исследовании [20] авторы проводили опыты по сухому фрезерованию пазов на заготовке из сплава Ti-6Al-4V твердосплавными инструментами с покрытием и без покрытия при различных скоростях резания – 50, 80 и 105 м/мин, при подачах 0,1, 0,15 и 2 мм/зуб и глубине резания 1, 1,5 и 2 мм соответственно. Эффективность режущего инструмента определялась стойкостью и качеством обработки поверхности. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что твердосплавный инструмент с покрытием PVD имеет более высокую стойкость, составляющую максимум 11,5 минут, а шероховатость поверхности Ra более чувствительна к подаче и глубине резания.

В работе [21] авторами показано, что при высокоскоростной обработке оптимальное значение шероховатости поверхности $Ra = 0,51$ мкм достигается при следующих параметрах: скорость резания $v = 450$ м/мин, подача $f = 2100$ мм/мин, глубина резания $a_p = 0,3$ мм и шаг обработки 60 %. Результаты подтверждающих испытаний со значением менее 10 % подтвердили полученные результаты. Сделан вывод о хорошем соответствии с экспериментальными результатами. Результаты настоящего исследования показывают, что метод Taguchi способен анализировать сложные особенности, сопровождающие процессы высокоскоростного резания.

В работе [22] Ginting и Nouari использовали инструменты из твердого сплава (группа WC+Co) без покрытия в условиях сухого фрезерования концевыми фрезами со скоростями резания 60, 75, 100, 15 и 150 м/мин сплава Ti-6242S, который применяется для аэрокосмической промышленности. Осевая и радиальная глубины резания поддерживались постоянными и составляли 2,0 и 8,8 мм, а значения подачи – 0,1 и 0,15 мм/зуб. Анализ изношенных инструментов методом сканирующей электронной микроскопии показал, что основными причинами выхода из строя инструмента являются износ по задней поверхности и чрезмерное выкрашивание режущей кромки.

В работе [10] Huang, Li, Sun и Ge использовали цельную твердосплавную концевую фрезу для попутного фрезерования сплава Ti-6Al-4V с различной скоростью резания от 80 до 360 м/мин, постоянной подачей на зуб 0,08 мм/зуб, осевой глубиной резания 20 мм и радиальной глубиной резания 0,5 мм в условиях сухого резания. Исследование вибрации при обработке проводилось с использованием концевой фрезы с переменным шагом зубьев с применением методов анализа сигналов и в сравнении с результатами при стабильном и нестабильном процессе фрезерования. Было установлено, что вибрация возникает из-за скорости фрезерования и ударных сил, это приводит к усилению деформационного упрочнения заготовки и термическому размягчению с повышением температуры фрезерования. Оптимальная скорость резания была достигнута при 160 м/мин, что позволило добиться хорошего качества обработанной поверхности и уменьшения усилия фрезерования при указанной скорости резания.

Несмотря на сравнительно большое количество публикаций по высокоскоростной обработке титановых сплавов, выполненная работа представляет интерес ввиду системного подхода к описанию и раскрытию деформационных явлений через изучение элементарного износа поверхностей режущих кромок, характера морфологии стружки и качества поверхностного слоя после обработки.

Однако сравнительное малое количество данных по интенсификации формообразования путем резания для изделий из чистого α -Ti, обладающих высокой прочностью при достаточ-

ной пластичности и вязкости, с высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, используемых при изготовлении изделий криогенной техники и теплообменников, делает настоящую работу актуальной. В этой связи **целью** настоящей работы является изучение влияния режимов фрезерования на формирование износа режущих кромок и особенности формирования стружки при высокоскоростной обработке α -Ti марки Grade 2.

На основании обзора ранее выполненных исследований основополагающими **задачами** настоящего исследования являются следующие:

- выявить характер и причины разрушения покрытия режущих пластин при резании, включая анализ термомеханических напряжений в рабочей зоне, а также исследовать прочность связи покрытий на передней и задней поверхностях в области режущей кромки;

- изучить влияние скорости резания на формирование дефектов режущей кромки, а также установить роль наростов (налипов) в защите или разрушении покрытия в зависимости от адгезионных свойств системы «обрабатываемый материал – покрытие – материал пластины»;

- определить источники теплообразования и механизмы теплопереноса при резании титанового сплава BT1-0, а также выяснить роль стружки как теплоносителя в формировании температурного поля на передней поверхности;

- исследовать морфологию и механизм образования стружки и проанализировать влияние температурного градиента по толщине стружки и зоны контакта с передней поверхностью на её разделение;

- установить влияние режимов резания (скорости, подачи, глубины фрезерования) на геометрические характеристики элементов стружки и на условия разрушения стружки;

- изучить строение стружки в продольном сечении – характер границ между элементами, их наклон, наличие зон торможения у передней поверхности, распределение пластичности по толщине стружки и зависимость границ от режимов резания;

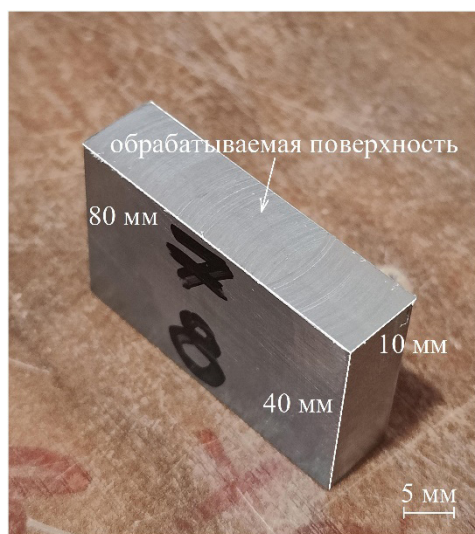
- оценить количественное влияние параметров обработки (скорости, подачи, глубины фрезерования) на параметры стружки с помощью корреляционного анализа, выявить наиболее значимые факторы.

Методика исследований

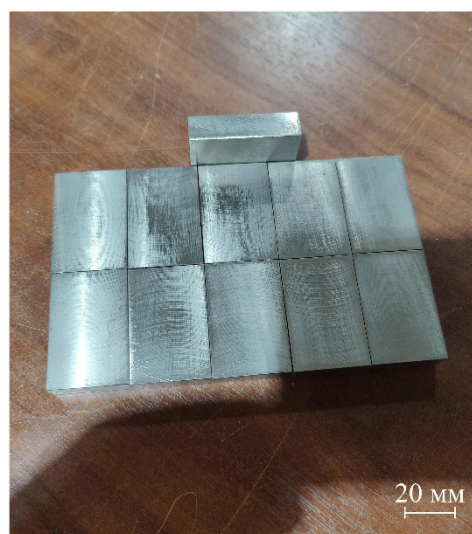
Заготовка, матрица эксперимента и режущий инструмент

Образцы из титана марки BT1-0 размером 80×40 мм были подготовлены из отожженного листа толщиной 10 мм (рис. 1), произведенного по ГОСТ 23755 (твёрдость 110...120 НВ).

Для закрепления образцов использовали механические тисы, а привязку инструмента



а



б

Рис. 1. Внешний вид образцов BT1-0, используемых для фрезерования

Fig. 1. Appearance of Ti Grade 2 samples used for milling

и единообразие установки обеспечивали путем базирования по трем плоскостям. Каждая обрабатываемая (исследуемая) площадка 10×40 мм была промаркирована и зашифрована в зависимости от режимов обработки (табл. 1 и 2).

Обработка выполнялась на станке мод. 2440СФ4 (Куйбышевское станкостроительное производственное объединение, Россия). Станок относится к особо высокому классу точности – «С» по ГОСТ 8–82. Это прецизионное

Таблица 1

Table 1

Режимы фрезерования

Milling modes

Параметр / Parameter	Уровень 1 / Level 1	Уровень 2 / Level 2	Уровень 3 / Level 3
Частота вращения n , мин ⁻¹ / Spindle speed n , min ⁻¹	800	1590	2390
Скорость резания v , м/мин / Cutting speed v , m/min	100	200	300
Подача f , мм/мин / Feed rate f , mm/min	50	100	–
Глубина резания a_p , мм / Depth of cut a_p , mm	0,2	0,4	–
Ширина резания a_e , мм / Width of cut a_e , mm	10		

Таблица 2

Table 2

Соответствие номеров экспериментов уровням варьирования

Correspondence of experiment numbers to variation levels

№ эксперимента / Experiment No.	Уровень (v) / Level (v)	Уровень (f) / Level (f)	Уровень (a_p) / Level (a_p)
1	100	50 (0,02)	0,2
2			0,4
3		100 (0,04)	0,2
4			0,4
5	200	50 (0,01)	0,2
6			0,4
7		100 (0,02)	0,2
8			0,4
9	300	50 (0,007)	0,2
10			0,4
11		100 (0,014)	0,2
12			0,4

Примечание: для оценки повторяемости эксперименты № 1, 4, 5, 8, 9 и 12 повторяли по два раза.

оборудование предназначено для чистовой обработки деталей и обладает достаточной жесткостью и точностью перемещений, что исключает ошибки эксперимента, вызванные динамическими характеристиками применяемого оборудования. Выполнялось симметричное торцевое фрезерование (рис. 2), длина пути резания в направлении подачи при фрезеровании составляла не менее 30 мм ($l_{\text{фрез}} \geq 30$ мм), что позволяло исследовать элементарный износ без трудозатратных стойкостных испытаний. Направление вращения фрезы и перемещение при подаче осуществлялось по схеме попутного фрезерования, т. е. направление вращения (скорости резания v) фрезы совпадало с вектором подачи f .

При попутном фрезеровании режущая пластина фрезы начинает резать с наибольшей толщиной среза. Поэтому режущая кромка воспринимает наибольшие усилия с постепенной разгрузкой до момента выхода из полного контакта с обрабатываемой поверхностью. В этой связи рационально использовать режущую кромку с некоторым округлением, которое описывается радиусом ρ , зависящим от степени износа режущих кромок, а для нового инструмента – от зернистости инструментального материала, переднего и заднего угла, а также наличия износостойкого покрытия заготовки [23, 24].

Во избежание влияния округления режущих кромок на параметры резания и износа все пластины для эксперимента были взяты из одной партии, а затем изучены на СЭМ. Таким обра-

зом, все режущие пластины были идентичны и не вносили сторонних возмущающих факторов на получаемые результаты.

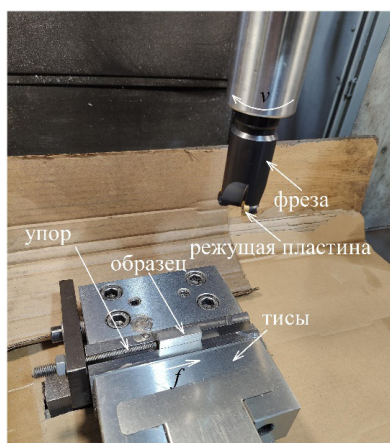
Для фрезерования была использована корпусная концевая фреза 330-04000MKR03RD1206 ($\varnothing D = 40$ мм, $l = 70$ мм, $L = 179$ мм, $z = 3$) с механическим креплением сменных режущих пластин круглой формы RCKT 1204 MO-PM 4330 фирмы Sandvik Coromant (Швеция) (рис. 3 и табл. 3).

Опорная сторона пластин была промаркирована таким образом, чтобы после фрезерования образца можно было повернуть все три пластины вокруг оси на 90° для последующего использования. Маркировка пластин и режимы фрезерования (табл. 1) были сгруппированы и зашифрованы в едином формате, на основании этого была составлена матрица эксперимента вида $L_{12} (3^2 + 3)$ (табл. 4).

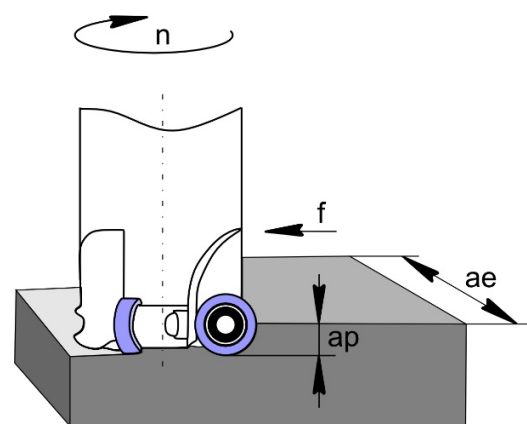
Аналитическое оборудование и методы исследований

Идентификация фаз поверхностей заготовки в исходном состоянии проводилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург) с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ с шагом $0,05^\circ$ и временем выдержки не менее 20 с на шаг [25, 26].

Получение снимков стружек, а также рабочих поверхностей сменных режущих пластин, CVD-покрытия в исходном состоянии и после износа проводили с высоким контрастом



а



б

Рис. 2. Внешний вид зоны фрезерования (а) и схема фрезерования (б) с указанием элементов резания

Fig. 2. Appearance of the milling zone (a) and milling scheme (b) showing the cutting elements

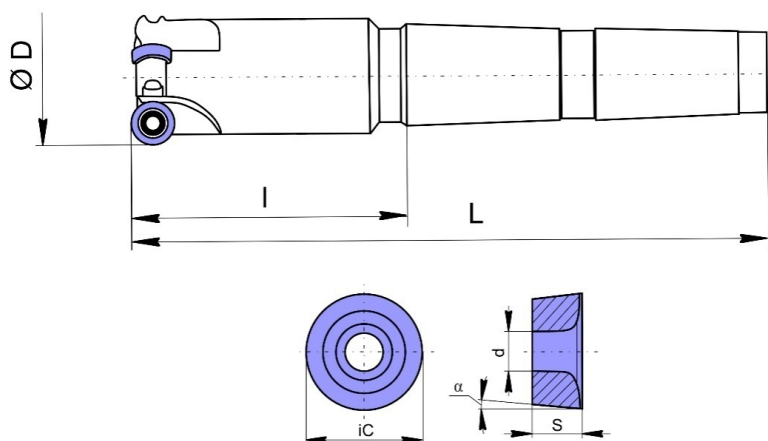


Рис. 3. Схема и геометрические параметры фрезы и сменной режущей пластины

Fig. 3. Layout view and geometric parameters of the milling cutter and removable cutting insert

Таблица 3

Table 3

Основные характеристики сменных многогранных пластин (СМП)

Main characteristics of removable polyhedral inserts (RPI)

Марка сплава / Alloy grade	Вид покрытия / Coating type	Диаметр вписанной окружности iC , мм / Inscribed circle diameter iC , mm	Толщина пластины s , мм / Insert thickness s , mm	Задний угол α , град / Clearance angle α , degree	Радиус округления режущих кромок ρ , мм / Edge rounding radius ρ , mm
4330	Chemical vapor deposition (CVD)	12	4,762	15	0,03

Таблица 4

Table 4

Матрица эксперимента

Experimental design matrix

№ эксперимента / Experiment No.	Уровень (v) / Level (v)	Уровень (f) / Level (f)	Уровень (a_p) / Level (a_p)
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2
9	3	1	1
10	3	1	2
11	3	2	1
12	3	2	2

и разрешением (4096×2288 пикселей на дюйм) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA 3 LMU (Tescan, Чехия), оснащённом приставкой для энергодисперсионного микроанализа (EDX) с безазотным детектором Ultim MAX 40. Измерение микротвёрдости по методу Виккерса осуществляли на микротвердомере 502 («Металаб», Россия) при нагрузке на алмазный индентор 0,098 Н (10 грамм) с выдержкой 10 секунд согласно ISO 6507-1:2005.

Для пробоподготовки с последующим изучением на СЭМ поперечного сечения покрытий применяли шлифование режущих пластин под углом $1...2^\circ$ абразивными листами на основе

Al_2O_3 зернистостью P2000 с добавлением слабощелочного водного раствора.

Обработку данных выполняли с использованием положений математической статистики. Для анализа взаимосвязи между зависимой переменной и несколькими независимыми переменными задействовали метод множественной регрессии, который был автоматизирован с применением программного обеспечения STATISTICA V. 8. Для понимания возможных связей вычисляли коэффициенты корреляции r (табл. 5). Принимали допущение, что если вычисляемый уровень значимости модели $p < 0,05$, то регрессия принимается значимой в целом.

Таблица 5

Table 5

Интервалы значений коэффициента корреляции и их связи
Correlation coefficient ranges and their interpretation

Интервал значений коэффициента корреляции / Correlation coefficient range	Связь / Correlation
$0,01 < r \leq 0,29$	Слабая положительная / Weak positive
$0,30 < r \leq 0,69$	Умеренная положительная / Moderate positive
$0,70 < r \leq 1,00$	Сильная положительная / Strong positive
$-0,01 > r \geq -0,29$	Слабая отрицательная / Weak negative
$-0,30 > r \geq -0,69$	Умеренная отрицательная / Moderate negative
$-0,70 > r \geq -1,00$	Сильная отрицательная / Strong negative

Результаты и их обсуждение

Исходное состояние режущих кромок

Рентгеновская дифрактография показала, что применяемый в исследовании в качестве обрабатываемого материала титановый сплав состоит из α -Ti без наличия каких-либо иных фаз. Микротвёрдость поверхности исследуемого образца составляла HV 0,1/10 248 $\pm$ 15.

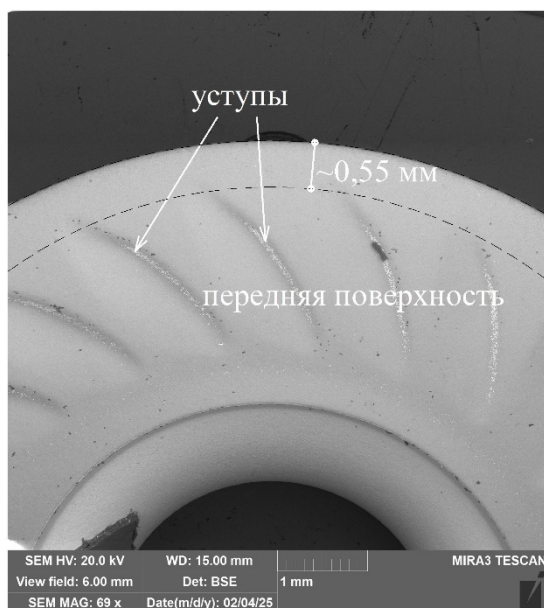
На рис. 4 представлен внешний вид исходного состояния рабочих кромок новой режущей пластины. На передней поверхности имеются стружкодробящие криволинейные канавки, препятствующие образованию длинной сплошной стружки и разделяющие ее по длине на отдельные сегменты (элементы) в процессе фрезерования. Для эффективной работы уступов толщина стружки должна составлять не менее 1 мм.

Покрытие CVD нанесено на рабочую поверхность режущих пластин в два слоя, о чем

свидетельствуют снимки СЭМ в режиме BSE (рис. 5). Граница раздела покрытий проходит по режущей кромке, разделяя ее на две части. На передней поверхности сформировано покрытие, полученное двумя последовательными технологическими процедурами осаждения, а на задней поверхности – одной. Об этом также свидетельствуют данные элементного состава, полученные с приставки EDX.

Поперечное сечение и данные о химическом составе покрытия показаны на рис. 6.

Покрытие представлено комбинацией слоев, состоящих из верхнего слоя Al_2O_3 толщиной $\approx 3,7$ мкм (нормализованные массовые %, Al = 44; O = 48) и комбинированного переходного слоя TiCN+TiN толщиной $\approx 4,4$ мкм (нормализованные массовые %, Ti = 57; N = 50; C = 9). Таким образом, общая толщина CVD-покрытия составляет $\approx 8,1$ мкм, что является характерным для химических методов осаждения.



а



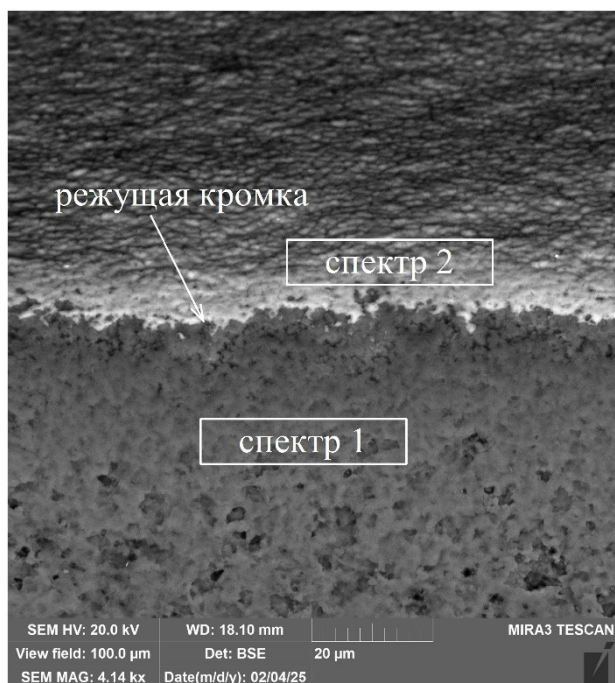
б

Рис. 4. СЭМ-BSE-изображение новой режущей пластины RCKT 1204 MO-PM 4330:

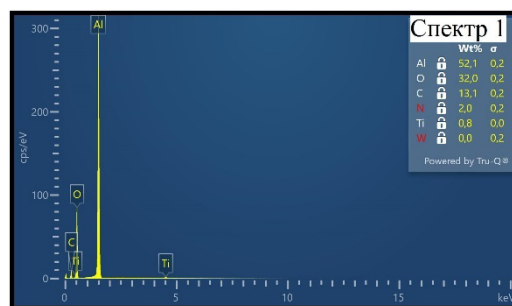
а – ортогональный вид на переднюю поверхность; б – вид по биссектрисе угла заострения

Fig. 4. SEM-BSE images of a new RCKT 1204 MO-PM 4330 cutting insert:

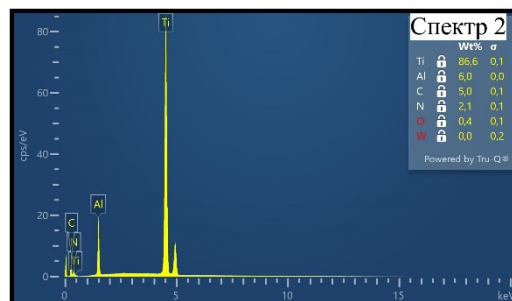
а – rake face view; б – view along the bisector of the wedge angle



а



б



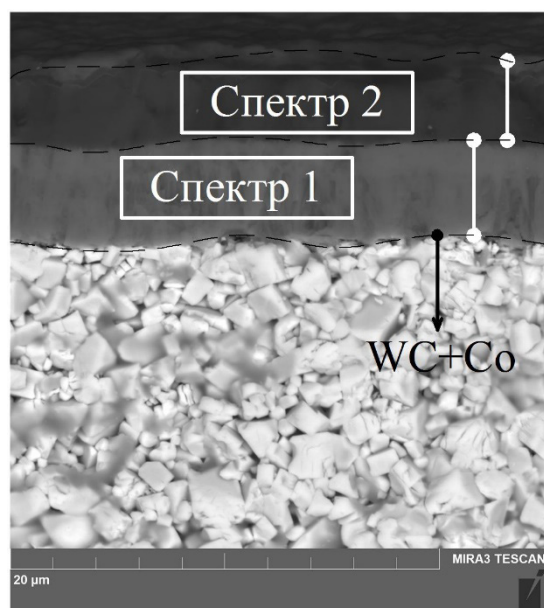
в

Рис. 5. СЭМ-BSE-изображение покрытия вблизи режущей кромки:

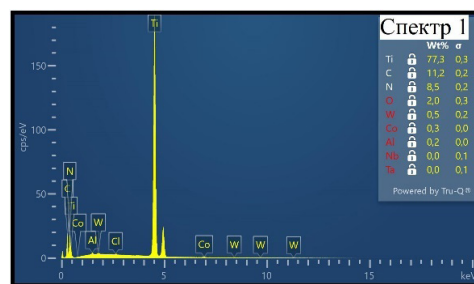
а – общий вид с указанием мест снятия спектров; б – интенсивности спектра № 1; в – интенсивности спектра № 2

Fig. 5. SEM-BSE images of the coating near the cutting edge:

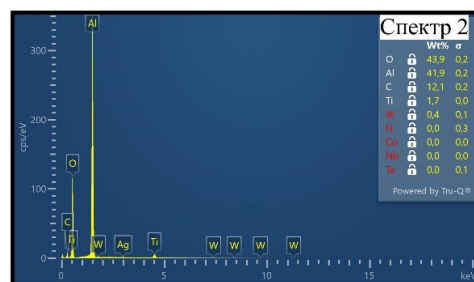
а – general view showing the locations of the spectra; б – spectrum No. 1; в – spectrum No. 2



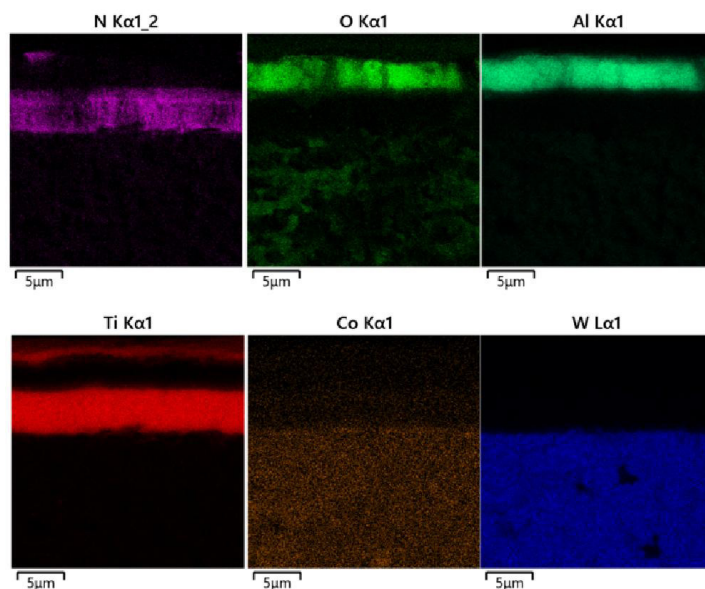
a



б



в



г

Рис. 6. СЭМ-BSE-изображение покрытия в сечении:

а – общий вид с указанием мест снятия спектров; б, в – интенсивности спектров № 1 и № 2 соответственно;
г – xEDS-карты химических элементов

Fig. 6. SEM-BSE image of the coating in cross-section:

а – general view showing the locations of the spectra; б, в – spectra No. 1 and No. 2, respectively;
г – XEDS elemental maps

Износ режущих кромок

С использованием режимов резания (табл. 1) проведена серия экспериментов по фрезерованию образцов из титанового сплава BT1-0.

Отобранные в ходе эксперимента режущие пластины исследовали на СЭМ. В процессе их осмотра анализировали износ покрытия, локаль-

ные сколы и отслоения, а также наличие налипов обрабатываемого материала на режущих кромках (рис. 7). Под сколами понимается участок режущей кромки или поверхности, на котором после контакта с обрабатываемым материалом была нарушена сплошность покрытия в результате хрупкого разрушения.

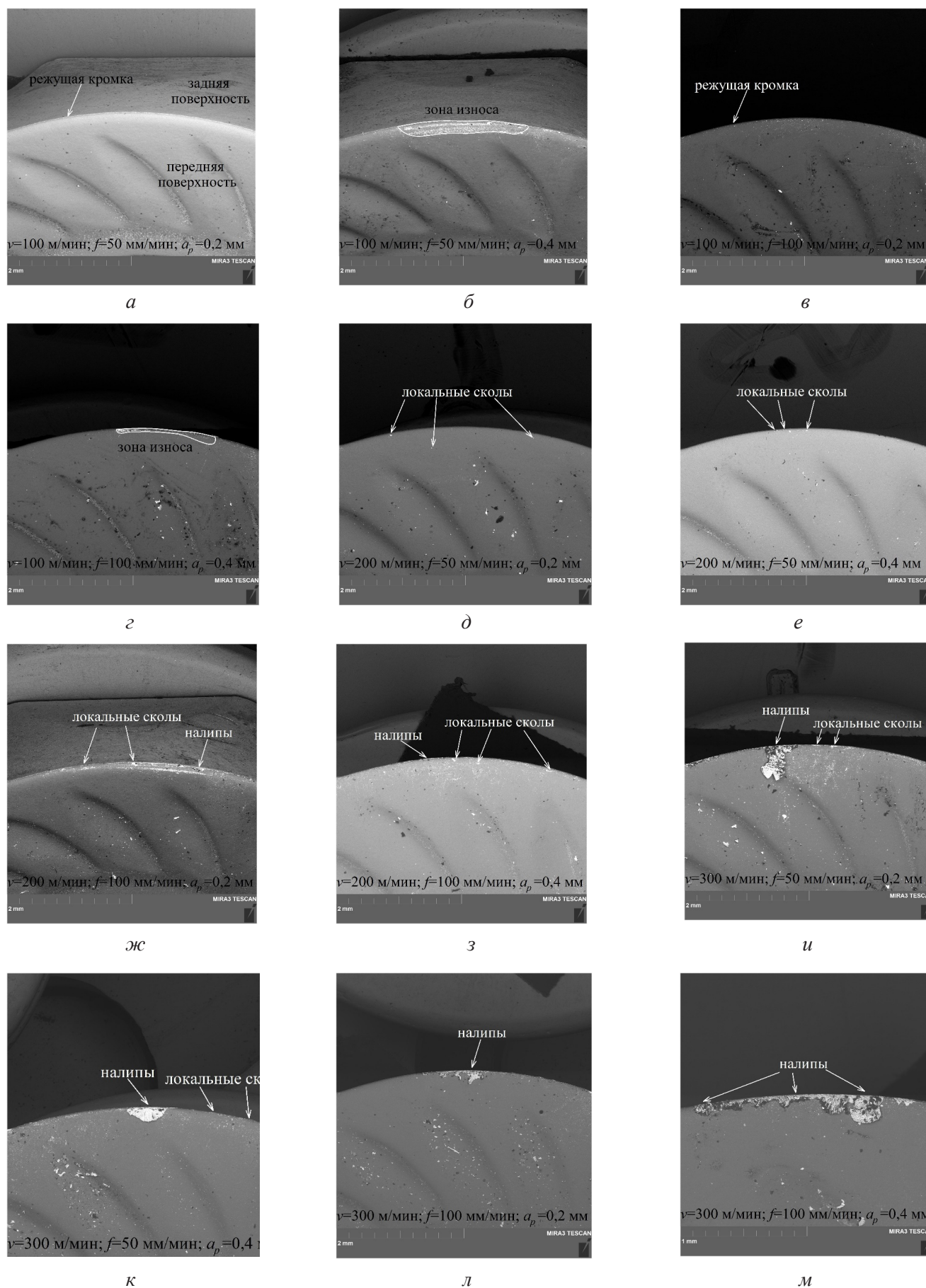


Рис. 7. Снимки с СЭМ режущих кромок пластин после фрезерования BT1-0 на различных режимах

Fig. 7. SEM images of the cutting edges of inserts after milling of Ti Grade 2 under different conditions

На рис. 7, а показано состояние передней и задней поверхностей режущей пластины, а также радиусной режущей кромки после непродолжительного фрезерования без видимого износа. На фото отчётливо видна фаска на режущей кромке, полученная при изготовлении СМП. После более продолжительного фрезерования с глубиной фрезерования $a_p = 0,4$ мм появляется зона износа на фаске режущей кромки, но захватывающая и небольшой участок передней поверхности, примыкающей к режущей кромке.

При скорости резания 100 м/мин и постоянной подаче 50 мм/мин увеличение толщины резания a_p с 0,2 до 0,4 мм в эксперименте № 2 приводит к расширению границ контакта стружки с режущей кромкой, что подтверждается характерным снимком (см. рис. 7, б). Ширина зоны контакта стружки с передней поверхностью составляет $\approx 1,8$ мм по длине криволинейной части режущей кромки.

На рис. 7, г видно, что при немного менее продолжительном времени фрезерования износ более интенсивно развивается на участке, относящемся к вспомогательной режущей кромке СМП, т. е. контактирующей с поверхностью резания, которая граничит с уже обработанной поверхностью образца. При увеличении скорости резания до 200 м/мин на передней поверхности (рис. 7, д) и режущей кромке (рис. 7, е, ж) появляются локальные сколы, лучше видимые при увеличении глубины фрезерования до $a_p = 0,4$ мм (рис. 7, е) и подаче $f = 100$ мм/мин (рис. 7, ж). На наш взгляд, это связано с возрастающей со скоростью резания температурой и увеличением адгезии обрабатываемого материала с материалом режущих пластин.

В пользу этого предположения говорит увеличение интенсивности появления наливов обрабатываемого материала ВТ1-0 и сколов при увеличении скорости резания до 300 м/мин (рис. 7, и–л).

При толщине резания $a_p = 0,4$ мм на передней поверхности начинают формироваться точечные участки с налипками из обрабатываемого материала (рис. 8). В свою очередь, на задней поверхности налипсы представлены сплошным слоем шириной не более 0,1 мм.

Близкая по износу картина наблюдается при той же скорости и увеличении подачи с 50 до 100 мм/мин (эксперимент № 4, рис. 7, з), однако

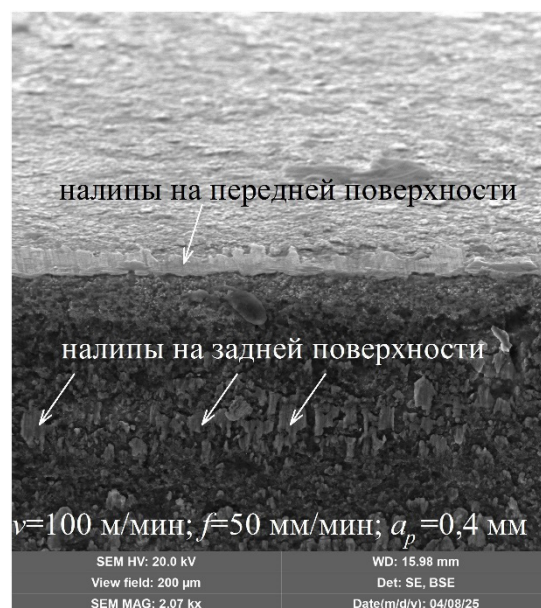


Рис. 8. Фрагмент СЭМ режущей кромки пластины с налипками на задней и передней поверхностях

Fig. 8. SEM image fragment of the cutting edge of an insert with built-up material on the flank and rake surfaces

в этом случае зона износа отчетливо проявляется со смещением относительно геометрического центра режущей пластины. Такое явление наблюдается при схеме попутного фрезерования, когда стружка начинает интенсивно деформироваться с изменением толщины срезаемого слоя от нуля до максимального значения a_p , что впоследствии приводит к её закручиванию.

При увеличении скорости резания со 100 до 200 м/мин (эксперименты № 5 и 6, рис. 7, д, е) на передней поверхности режущих пластин формируются локальные сколы, что при прочих равных условиях работы свидетельствует о росте температуры в зоне контакта режущих кромок пластин с обрабатываемым материалом. Так, в рабочей области покрытия формируются термомеханические напряжения величиной, превосходящей прочность на сжатие покрытия, что приводит к существенным нарушениям покрытия (рис. 9).

При этом покрытие на задней поверхности осталось неповреждённым и имеет вид тонкой стенки, что свидетельствует о недостаточной прочности покрытий на передней и задней поверхностях, т. е. на режущей кромке.

Увеличение подачи с 50 до 100 мм/мин при скорости резания 200 м/мин приводит к интен-

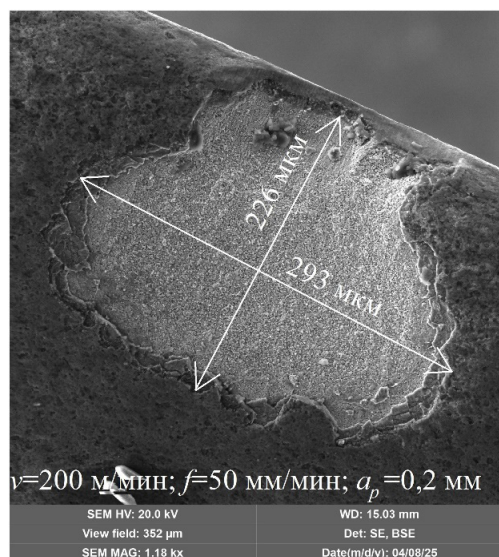


Рис. 9. Фрагмент СЭМ передней поверхности режущей пластины с разрушением и отслоением покрытия

Fig. 9. SEM image fragment of the rake face of a cutting insert with coating fracture and delamination

сификации общей площади сколов, а также появляются налипы обрабатываемого материала (эксперимент № 7, рис. 7, ж и рис. 10).

Дальнейшее увеличение скорости резания с 200 до 300 м/мин (эксперименты № 9–12,

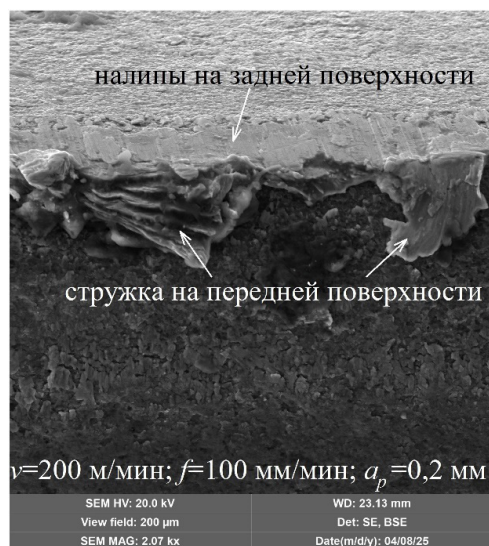


Рис. 10. Фрагмент СЭМ режущей кромки пластины со сформированными налипами на задней поверхности и стружкой на передней поверхности

Fig. 10. SEM image fragment of the cutting edge of an insert with built-up material on the flank face and chip on the rake face

рис. 7, з–к) вызывает появление на режущей кромке локальных сколов, достигающих по длине $\approx 0,3 \dots 0,4$ мм. Налипы на передней поверхности также существенно увеличиваются в сравнении с предыдущими режимами фрезерования. При более детальном рассмотрении режущей кромки можно заметить, что она скрыта под слоями прилипшей стружки, это характерно для процессов наростообразования. Нарост, нависающий над задней поверхностью, будучи упрочнённым обрабатываемым материалом в ходе термомеханического влияния, с одной стороны, защищает режущую кромку от прямого контакта с обрабатываемым материалом, а с другой стороны – при его отрыве происходит повышенный износ поверхностных слоёв покрытия в результате адгезионного сцепления (рис. 11). Наличие нароста также негативно сказывается на шероховатости обрабатываемой поверхности.

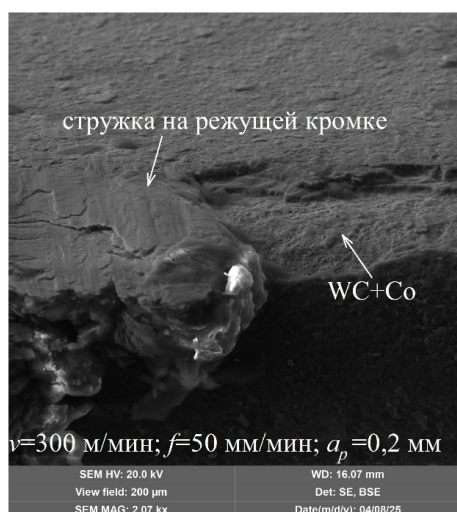
Существенно выступающий налип выше передней поверхности (рис. 11, а) вызван процессами, происходящими в момент прекращения подачи и образования стружки в конце резания, когда режущая кромка скребёт по поверхности резания без образования стружки, которая должна была удалить этот выступающий объём в виде стружки.

Увеличение ширины налива по сравнению с ее шириной на режущей кромке (рис. 11, б) свидетельствует о расползании налива при отдалении от режущей кромки, что косвенно указывает на существенное сопротивление движению стружки. Обычно длина участка налива на передней поверхности соответствует длине пластического контакта стружки с передней поверхностью [27, 28].

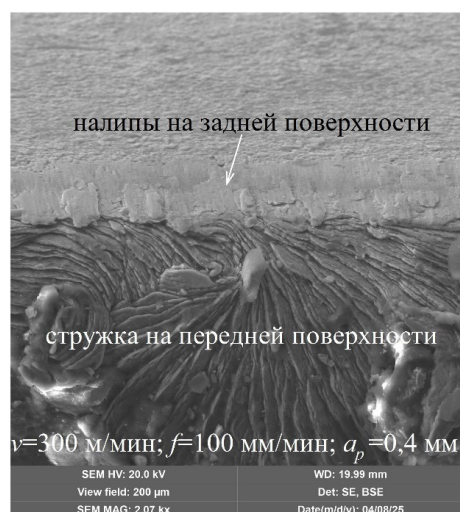
В табл. 6 суммировано описание отдельных представительных снимков, демонстрирующих в увеличенном масштабе износ покрытия, сколы и локальные налипы.

Истирание покрытия (абразивный износ) не наблюдалось на протяжении всех экспериментов.

Источником тепла при резании является теплота деформации, а в роли теплоносителя выступает стружка, которая успевает передать тепло режущим кромкам только от слоев, лежащих в непосредственной близости к зоне соприкосновения. Стоит отметить, что при таком явлении значительная часть тепла, получаемая режущим клином, отводится в его тело и в окружающую среду. Температура в зоне резания по данным



а



б

Рис. 11. Фрагмент СЭМ режущих кромок пластин с наростами и демонстрацией разрушения износостойкого покрытия:

а – эксперимент № 9; б – эксперимент № 12

Fig. 11. SEM image fragments of the cutting edges of inserts with built-up edges and demonstration of wear-resistant coating fracture:

а – Experiment No. 9; б – Experiment No. 12

Таблица 6

Table 6

Состояние режущих кромок пластин после фрезерования

Condition of cutting edge plates after milling

№ эксперимента / Experiment No.	Уровень (v) / Level (v)	Уровень (f) / Level (f)	Уровень (a_p) / Level (a_p)	Состояние кромок / Condition of edges
1	100	50	0,2	Износ отсутствует / No wear
2			0,4	Зона износа и налипсы / Wear zone and built-up material
3		100	0,2	Локальные сколы / Local chipping
4			0,4	Зона износа и налипсы / Wear zone and built-up material
5	200	50	0,2	Локальные сколы / Local chipping
6			0,4	Локальные сколы / Local chipping
7		100	0,2	Локальные сколы и налипсы / Local chipping and built-up material
8			0,4	Локальные сколы и налипсы / Local chipping and built-up material
9	300	50	0,2	Локальные сколы и увеличенные налипсы / Local chipping and increased built-up material
10			0,4	Локальные сколы и увеличенные налипсы / Local chipping and increased built-up material
11		100	0,2	Локальные сколы и налипсы / Local chipping and built-up material
12			0,4	Локальные сколы и увеличенные налипсы / Local chipping and increased built-up material

[29] может достигать значений от 500 до 650 °С в диапазоне скоростей 100...700 м/мин для легкообрабатываемых групп титановых сплавов и существенно зависит от износа режущих кромок, особенно по задней поверхности, когда может достигать 1200 °С для труднообрабатываемых групп титановых сплавов [2].

Поскольку деформационные процессы при резании напрямую связаны с количеством тепла, выделяемого при фрезеровании, то пластическое течение срезаемой толщины стружки с увеличением скорости резания способствует увеличению общей площади наливов. Наибольшее по площади количество стружки, оставшейся на передней поверхности режущих пластин, наблюдается на режимах $v = 300$ м/мин, $f = 100$ мм/мин и $a_p = 0,4$ мм, являющихся предельными в рамках настоящего исследования.

Морфология стружки

Подробное рассмотрение стружки как продуктов износа в процессе упругопластических деформаций при резании вносит вклад в понимание физических явлений, сопровождающих износ режущих кромок. В рамках данной работы была проведена пробоподготовка стружки с последующей СЭМ на одинаковых увеличениях (рис. 12).

На виде сверху стружка имеет форму секторов диска, на внутренних поверхностях которых присутствуют зазубрины (зубцы), указывающие на формирование элементов стружки, плотно приваренных друг к другу. Такое расположение зубцов указывает на более пластичное состояние стружки на внешней стороне, формируемой у вершины режущей кромки, где температура выше. Внутренняя сторона охлаждается быстрее, так как контактирует с более холодной частью передней поверхности круглой режущей пластины. Разрыв сливной стружки на сектора может начаться как с внутренней стороны (рис. 12, б) и с внешней стороны (рис. 12, е, ж, л, м), так и с обеих сторон одновременно (рис. 12, д, и, к).

Расстояния между вершинами (зубцами) элементов примерно одинаковы для одного и того же сектора, но могут различаться для разных секторов даже при одинаковых режимах резания (рис. 12, а, б). При скорости резания 100 м/мин внешний вид примерно одинаковый при различной подаче и глубине резания, но с повыше-

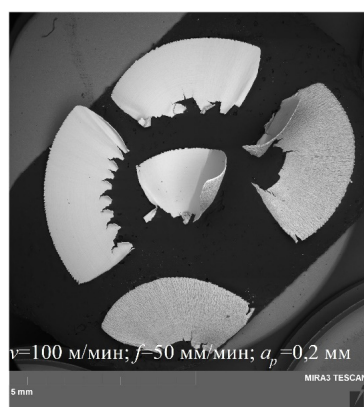
нием подачи $f_{\text{мин}}$ до 100 мм/мин высота зубцов увеличивается, и они становятся более явными (рис. 12, а, в). Повышение глубины фрезерования a_p с 0,2 до 0,4 мм не оказывает видимого влияния на шаг зубцов и их высоту (рис. 12, в, з).

Увеличение скорости резания до 200 м/мин при подаче 50 мм/мин приводит к исчезновению зубцов (рис. 12, д, е), но при подаче 100 мм/мин и глубине фрезерования 0,2 мм они вновь становятся заметными (рис. 12, ж), а при глубине фрезерования 0,4 мм шаг между зубцами увеличивается (рис. 12, з), сектора становятся менее изогнутыми, иногда даже бесформенными (рис. 12, з, внизу слева), а на некоторых появляются зубцы с двух сторон (рис. 12, з, вверху). Это говорит о неопределенности пластического деформирования, по-видимому, вызванного изменением градиента температуры, специфичного для высокоскоростного фрезерования.

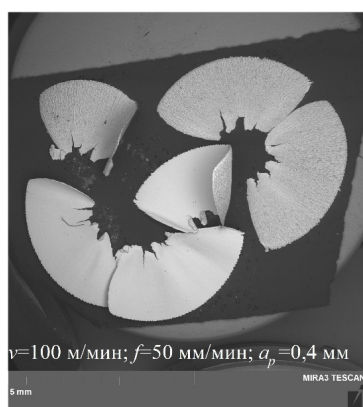
Увеличение скорости резания до 300 м/мин при подаче 50 мм/мин опять приводит к исчезновению зубцов (рис. 12, и, к), сектора становятся более крупными и менее изогнутыми. Увеличение подачи до 100 мм/мин при глубине фрезерования 0,2 мм приводит к сращиванию секторов, и появившиеся в этом виде зубцы имеют большую высоту (рис. 12, л). Увеличение глубины фрезерования до 0,4 мм приводит к ещё большему сращиванию секторов, и зубцы исчезают, но изредка появляются в виде тонких выступов большой высоты (рис. 12, м).

Можно сделать общий вывод, что с повышением скорости резания увеличивается температура резания, что приводит к увеличению пластичности стружки. Повышение подачи приводит к увеличению объема пластически деформируемого обрабатываемого материала, что вызывает разрыв между элементами сливной стружки на внутренней стороне за счет превышения предела прочности обрабатываемого материала.

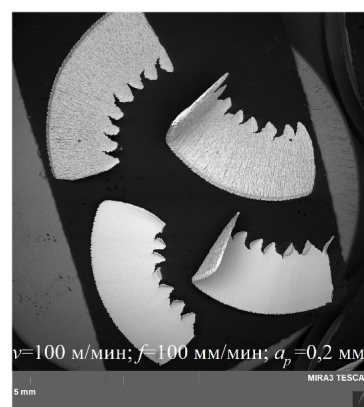
Длина контакта стружки с передней поверхностью при обработке титановых сплавов, образующих сегментную или даже элементную стружку, гораздо меньше, чем при обработке стали. Это объясняет также образование при резании титановых сплавов больших углов сдвига с малой усадкой стружки; как правило, коэффициент усадки ее по длине близок к единице. Это видно из значений коэффициента усадки раз-



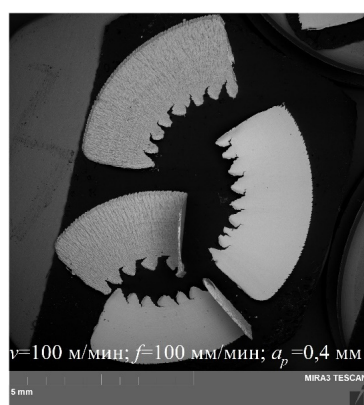
а



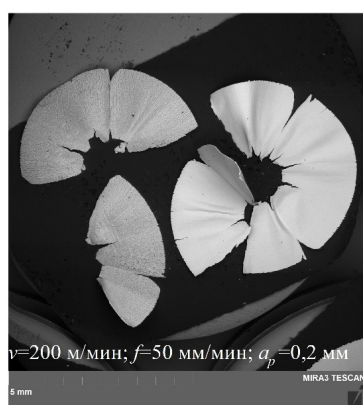
б



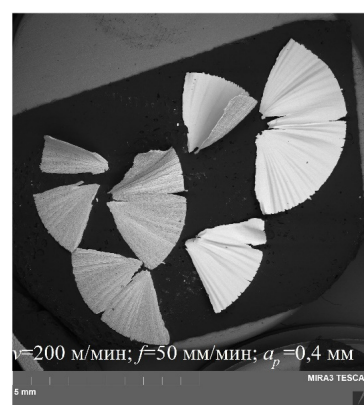
в



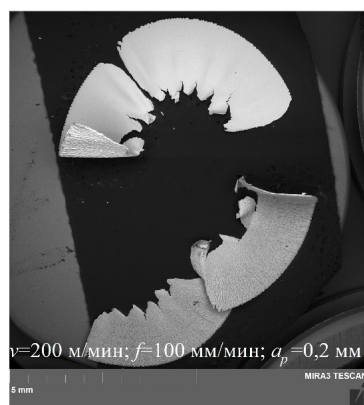
г



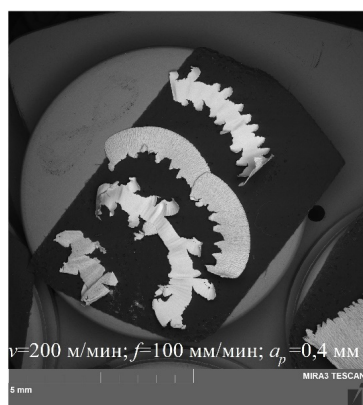
д



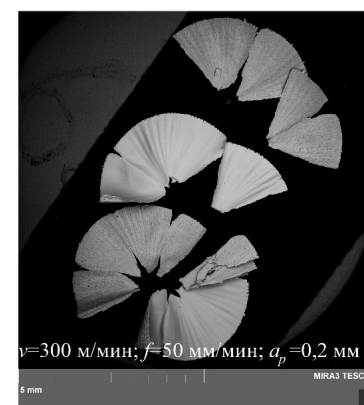
е



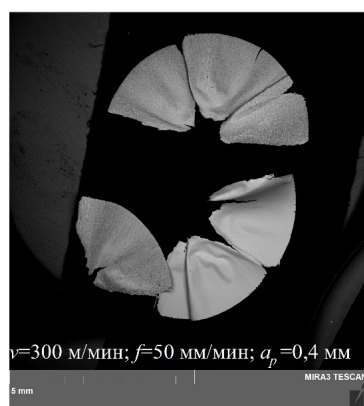
ж



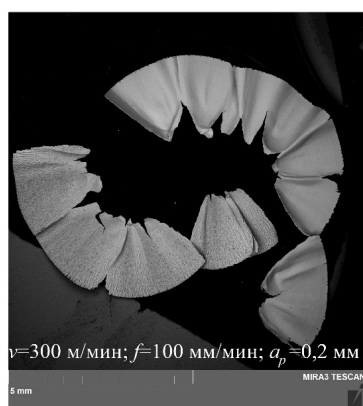
з



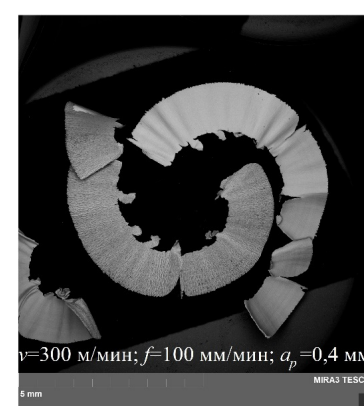
и



к



л



м

Рис. 12. Снимки с СЭМ стружки, полученной на различных режимах

Fig. 12. SEM images of chips obtained under different conditions

личных марок титановых и твердых сплавов, а также из зависимости продольной деформации стружки от скорости резания и подачи.

В ряде случаев в результате поглощения кислорода и азота из воздуха при обработке титановых сплавов получается так называемая отрицательная усадка, т. е. длина образующейся стружки больше пути резания. Уменьшение усадки стружки с ростом скорости резания объясняется также резким снижением сил трения стружки с передней поверхностью режущей части инструмента. Титановые сплавы характеризуются высокими коэффициентами трения при температуре менее 200 °С, что ограничивает их применение для подвижных соединений. Однако при резании температура приконтактного слоя стружки возрастает до 600...1200 °С из-за малой теплопроводности титановых сплавов и концентрации тепла в небольшом объеме зоны первичной пластической деформации. Это приводит к псевдожидкому состоянию приконтактного слоя стружки и очень малому коэффициенту трения на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности. О малом коэффициенте трения говорит и очень небольшой угол наклона границ элементов стружки, которые располагаются практически перпендикулярно прирезцовой поверхности стружки (передней поверхности инструмента) (рис. 13), т. е. отсутствует торможение на передней поверхности инструмента.

При увеличении толщины среза средний условный коэффициент трения $\mu_{\text{ср}}$ уменьшается [2]. Это связано с ростом тепловыделения при увеличении толщины среза. При повышении температуры коэффициент теплопроводности титановых сплавов существенно увеличивается, но это все равно мало компенсирует концентрацию тепла в зоне первичной пластической деформации и на контактных поверхностях инструмента.

Небольшая длина контакта стружки с передней поверхностью при обработке титановых сплавов приводит к тому, что вся нагрузка распределяется на очень малом участке передней поверхности, что приводит к снижению стойкости инструмента и быстрому разрушению его режущей кромки. Этому способствует и образование при резании твердого карбида титана, если содержание углерода в титановом сплаве более 0,2 %, так как углерод растворяется в титановом сплаве только до 0,2 %.

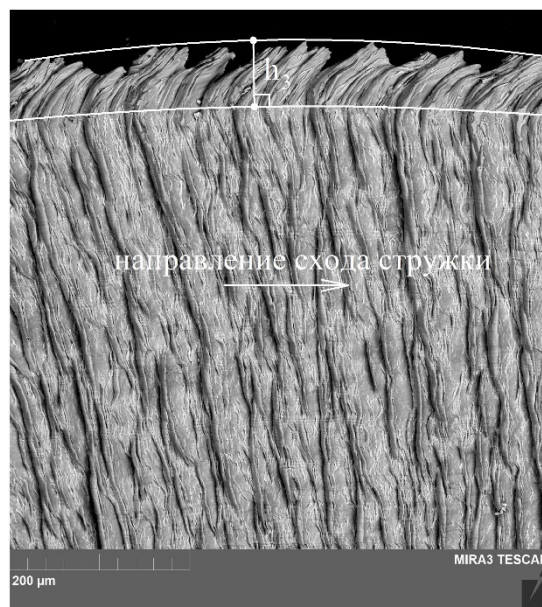


Рис. 13. Схема измерений параметра h_3 с использованием СЭМ (эксперимент № 1)

Fig. 13. Measurement scheme for parameter h_3 using SEM (Experiment No. 1)

При повышении скорости резания из-за возникновения весьма высокой температуры в деформированной зоне значительно интенсифицируется процесс поглощения этим слоем газов (кислорода и азота) из воздуха, что приводит к возрастанию роли охрупчивания и развитию деформации сдвига [30, 31].

Таким образом, стружку, полученную в условиях высокоскоростного сухого фрезерования, можно детально классифицировать согласно описанию в табл. 7.

Эксперимент № 1. Элементы стружки чётко различаются, но плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: выступы (гребешки) на внешней стороне стружки небольшой высоты, границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены.

Эксперимент № 2. Элементы стружки различаются нечётко, особенно в середине и у прирезцовой части, визуально более плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности, выступы (гребешки) на внешней стороне стружки небольшой высоты и практически такие же, как и в № 1.

Эксперимент № 3. Элементы стружки практически не различаются в середине и у прирез-

Описание особенностей стружки BT1-0

Description of features of Ti Grade 2 chips

№ эксперимента / Experiment No.	Особенности стружки / Features of chips
1	Типовая (сливная стружка): элементы стружки чётко различаются, но плотно прижаты и приварены друг к другу, элементы малой толщины, выступы (гребешки) на внешней стороне стружки небольшой высоты / Typical (continuous chip): chip elements are clearly distinguishable but tightly pressed and welded to each other; the elements are thin; the protrusions (ridges) on the outer side of the chip are of small height
2	
3	
4	
5	Развитие трещин с двух сторон / Crack development on both sides
6	Увеличение длины и интенсивности развития трещин / Increase in length and intensity of crack development
7	
8	Тенденция к закручиванию узкой части / Tendency of the narrow part to curl
9	Развитие трещин с двух сторон, волнистость на поверхности стружки / Crack development on both sides; waviness on the chip surface
10	Увеличение длины и появление волнистости на поверхности стружки / Increase in length and appearance of waviness on the chip surface
11	
12	Образование отдельных нерегулярных отростков / Formation of individual irregular outgrowths

Усадка по толщине: на режимах № 4, 8 и 12 наблюдается увеличение плотности деформации.

цовой части, представляя собой одно целое, на внешней стороне элементы больше по толщине по сравнению № 1 и 2, границы между элементами размыты и сильно искривлены. У прирезцовой части перпендикулярны передней поверхности, чуть выше сильно искривляются в сторону, а на внешней стороне значительно искривляются в обратную сторону.

Эксперимент № 4. Элементы стружки практически не различаются в середине и у прирезцовой части, представляя собой одно целое, границы между элементами размыты и сильно искривлены. У прирезцовой части они перпендикулярны передней поверхности, чуть выше сильно искривляются. На внешней стороне элементы меньше по толщине по сравнению с № 3, выступы (гребешки) на внешней стороне стружки большей высоты, чем в остальной части, и четко различаются элементы стружки.

Эксперимент № 5. Элементы стружки чётко различаются, но очень плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены, вы-

ступы (гребешки) на внешней стороне стружки небольшой высоты и меньше, чем у № 1. На этом режиме впервые в экспериментах наблюдается развитие трещин в стружке с двух сторон.

Эксперимент № 6. Элементы стружки не очень чётко различаются, очень плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены, выступы (гребешки) на внешней стороне стружки мало выделяются и меньше, чем у № 5. На внешней стороне имеется трещина небольшой глубины, но широкая на внешней стороне, т. е. трещина начинается с внешней стороны.

Эксперимент № 7. Элементы стружки различаются нечётко, особенно в середине и у прирезцовой части, более плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены. Элементы стружки различаются, практически такие же, как и у № 2, но меньше по высоте.

Эксперимент № 8. Элементы стружки различаются в середине и у прирезцовой части, более плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены влево. Выступы (гребешки) на внешней стороне стружки достаточно большой высоты по сравнению с остальной частью и практически такие же, как и у № 1. Трещин нет, но наблюдается тенденция к закручиванию узкой части.

Эксперимент № 9. Элементы стружки не очень чётко различаются, очень плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены, после разлома наклонены в противоположную сторону. Выступы (гребешки) на внешней стороне стружки практически отсутствуют. Наблюдается разделение стружки по длине (разлом с внешней стороны) и волнистость на поверхности стружки.

Эксперимент № 10. Элементы стружки различаются нечётко, особенно в середине и у прирезцовой части, более плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены. Выступы (гребешки) на внешней стороне стружки отсутствуют, наблюдается развитие трещины с внешней стороны и волнистость на поверхности стружки.

Эксперимент № 11. Элементы стружки различаются нечетко, особенно в середине и у прирезцовой части, более плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности (прирезцовой части), немного наклонены. Выступы (гребешки) на внешней стороне стружки очень небольшой высоты по сравнению с остальной частью, практически такие же, как и у № 7, но меньше по высоте.

Эксперимент № 12. Элементы стружки чётко различаются, но очень плотно прижаты и приварены друг к другу. Элементы малой толщины: границы между элементами прямые и практически перпендикулярны передней поверхности



Рис. 14. Схема измерения параметров h_1 , h_2 , L_1 и L_2 , относящихся к расчёту коэффициента сплошности стружки

Fig. 14. Measurement scheme for parameters h_1 , h_2 , L_1 and L_2 , for calculating the chip continuity coefficient

(прирезцовой части), слева немного наклонены. Выступы (гребешки) на внешней стороне стружки достаточно большой высоты, но меньше, чем у № 1 и 5. Наблюдается образование отдельных нерегулярных отростков, как в эксперименте № 8.

В целом стоит отметить, что режимах № 4, 8 и 12 (предельные режимы для своей группы) наблюдается увеличение плотности деформации.

Оценку коэффициента сплошности стружки [32–36] проводили путем оценки соотношения нормальной ширины стружки h_2 , измеренной от наружной (внешней) поверхности до места начала появления трещин на внутренней поверхности, к общей ширине стружки h_1 (рис. 14). Коэффициент сплошности стружки отражает переход от сливной стружки к элементной. Чем больше коэффициент сплошности стружки, тем ближе к сливной (цельной) стружке.

Путем измерения параметров h_1 , h_2 , L_1 и L_2 была сформирована табл. 8, на основании которой выполнена статистическая обработка и рассчитаны коэффициенты корреляции между параметрами стружки и режимами обработки.

Наибольшее влияние на коэффициент сплошности стружки оказывает глубина фрезерования a_p ($r = 0,55$), при этом наблюдается

Геометрические размеры характерных элементов стружки
Geometric dimensions of characteristic chip elements

№ эксперимента / Experiment No.	h_1 , мм / h_1 , mm	h_2 , мм / h_2 , mm	Коэффициент сплошности стружки h_2/h_1 / Chip continuity coefficient h_2/h_1	L_1 , мм / L_1 , mm	L_2 , мм / L_2 , mm
1	$1,82 \pm 0,09$	$1,37 \pm 0,16$	0,75	0,48	0,56
2	$2,14 \pm 0,11$	$1,73 \pm 0,21$	0,81	0,35	0,50
3	$2,10 \pm 0,12$	$1,53 \pm 0,2$	0,73	0,52	0,37
4	$2,20 \pm 0,11$	$1,74 \pm 0,21$	0,79	0,51	0,39
5	$2,04 \pm 0,15$	$1,54 \pm 0,15$	0,76	0,67	0,45
6	$2,15 \pm 0,16$	$1,60 \pm 0,22$	0,74	0,41	0,25
7	$2,07 \pm 0,09$	$1,64 \pm 0,16$	0,79	0,42	0,39
8	$0,95 \pm 0,1$	$0,69 \pm 0,08$	0,73	0,35	0,29
9	$1,90 \pm 0,1$	$1,15 \pm 0,16$	0,60	0,74	0,30
10	$2,16 \pm 0,08$	$1,82 \pm 0,16$	0,84	1,11	0,47
11	$2,00 \pm 0,09$	$1,21 \pm 0,22$	0,61	0,49	0,66
12	$1,63 \pm 0,12$	$1,32 \pm 0,14$	0,81	0,56	0,50

умеренная положительная корреляция. В свою очередь, скорость резания оказывает слабое отрицательное влияние ($r = -0,31$), а влияние подачи в диапазоне от 50 до 100 мм/мин ничтожно мало ($r = -0,04$) и им можно пренебречь.

Параметр L_1 , характеризующий шаг раскрытия трещин с внутренней поверхности стружки, в большей мере зависит от скорости фрезерования ($r = 0,52$), чем от подачи ($r = -0,37$), а глубина резания не оказывает влияния вовсе ($r = -0,01$).

В диапазоне всех режимов высокоскоростного фрезерования (табл. 1 и 2) не установлено стойкой взаимосвязи между параметрами фрезерования и параметром L_2 , характеризующим шаг выступов на внутренней поверхности стружки после образования трещин по длине.

При изучении деформационных полос стружки проводили измерения высоты выступов h_3 согласно схеме (рис. 13). Размеры параметров высот выступов h_3 приведены в табл. 9.

При оценке корреляционных связей между режимами резания и параметрами высот выступов h_3 было установлено, что наибольшее влияние на деформацию выступов оказывает скорость резания ($r = -0,81$), которая имеет устойчивую сильную отрицательную корреляцию.

Это указывает на то, что при повышении скорости резания в диапазоне от 100 до 300 м/мин происходит уменьшение высоты выступов h_3 . Умеренная корреляция наблюдается при определении влияния подачи ($r = 0,49$). В свою очередь, глубина резания при прочих равных режимов фрезерования абсолютно не оказывает влияния, а коэффициент корреляции стремится к нулю.

Выводы

1. В рабочей зоне покрытия формируются термомеханические напряжения, величина которых превышает прочность покрытия на сжатие или его сцепление с поверхностью режущей пластины, что приводит к значительным дефектам покрытия. Покрытие на задней поверхности остается неповрежденным после разрушения покрытия на передней поверхности и имеет тонкую стенку, что указывает на недостаточную прочность связи покрытий передней и задней поверхностей, т. е. на режущей кромке. Целостность этого износостойкого покрытия задней поверхности в виде тонкой стенки говорит о том, что на задней поверхности вблизи режущей

Геометрические размеры выступов стружки
Geometric dimensions of chip projections

№ эксперимента / Experiment No.	Толщина выступов на верхней части стружки h_3 , мкм / Thickness of projections on the upper part of the chip h_3 , μm
1	$72,05 \pm 12,6$
2	$63,18 \pm 11,1$
3	$114,47 \pm 22,3$
4	$113,29 \pm 16,9$
5	$36,32 \pm 5,6$
6	$28,37 \pm 4,1$
7	$55,40 \pm 8,9$
8	$61,73 \pm 6,1$
9	$15,05 \pm 3,4$
10	$27,09 \pm 4,1$
11	$40,44 \pm 9,3$
12	$38,81 \pm 9,2$

кромки отсутствуют нормальные к ней контактные напряжения, а на режущей кромке возникает застойная зона.

2. Увеличение скорости резания с 200 до 300 м/мин приводит к появлению локальных задигов на режущей кромке, достигающих длины 0,3...0,4 мм. Значительно увеличиваются также накладки и налипы на передней поверхности. Режущая кромка скрыта под слоями липкой стружки, что характерно для грубых процессов резания. Выступ (налип) обрабатываемого материала на задней поверхности, упрочнённый термомеханическим воздействием как нарост, с одной стороны, защищает режущую кромку от прямого контакта с обрабатываемым материалом, а с другой стороны – при его удалении происходит усиленное отслаивание покрытия как результат хорошей адгезии обрабатываемого материала к покрытию и плохой адгезии покрытия к основному материалу режущей пластины.

3. Источником тепла при резании является теплота деформации в первичной зоне пластического деформирования, а в качестве теплоносителя выступает стружка, которая может передавать тепло к передней поверхности только от слоев, лежащих в непосредственной близости от зоны контакта. Теплообразование от трения стружки с передней поверхностью очень мало,

так как коэффициент трения на передней поверхности при резании титанового сплава BT1-0 мал, на что косвенно указывает перпендикулярность границ элементов стружки относительно передней поверхности.

4. На виде сверху стружка имеет форму дисковых секторов, на внутренних поверхностях которых присутствуют насечки (зубцы), указывающие на формирование элементов стружки, плотно приваренных друг к другу. Такое расположение зубьев указывает на более пластичное состояние стружки снаружи, образующейся на вершине режущей кромки, где температура выше. Внутренняя сторона охлаждается быстрее, так как соприкасается с более холодной частью передней поверхности круглой режущей пластины. Разделение (разрушение) стружки с появлением секторов может начинаться изнутри или с внешней стороны, а также с обеих сторон одновременно.

5. Зубцы на внутренней стороне стружки на виде сверху могут изменять свой размер и форму в зависимости от режима резания. Увеличение скорости резания до 300 м/мин при подаче 50 мм/мин приводит к исчезновению зубцов, сектора становятся больше и менее изогнутыми. Увеличение подачи до 100 мм/мин при глубине фрезерования 0,2 мм приводит к сращиванию



секторов, в результате чего зубья имеют большую высоту. Увеличение глубины фрезерования до 0,4 мм приводит к еще большему срачиванию секторов, зубья исчезают, но иногда появляются в виде тонких выступов очень большой высоты.

6. В продольном сечении элементы стружки плотно прижаты и приварены друг к другу, небольшой толщины, в большинстве случаев границы между элементами прямые, у передней поверхности они немного наклонены от режущей кромки, т. е. имеется торможение при сходе с передней поверхности. В большинстве случаев границы хорошо различимы, но в некоторых случаях в зависимости от режима резания в середине они размыты, к тому же искривлены ($v = 100$ м/мин, $f = 100$ мм/мин, $a_p = 0,2$ мм): у передней поверхности границы немного изогнуты в сторону от режущей кромки (т. е. имеется торможение на передней поверхности), чуть выше этот наклон существенно больше (выше лежащие слои стружки двигаются быстрее нижележащих, т. е. имеется промежуточный слой металла с большей пластичностью, чем нижележащий), а выше они значительно изогнуты в обратную сторону, т. е. к режущей кромке, что обусловлено формированием элементов стружки в зоне условной плоскости сдвига. Границы элементов могут выделяться четко, но иногда и нечетко, в зависимости от режима резания, особенно в середине и вблизи передней поверхности.

7. Наибольшее влияние на коэффициент сплошности стружки оказывает глубина фрезерования ($r = 0,55$) с умеренной положительной корреляцией. В свою очередь, скорость резания оказывает незначительное отрицательное влияние ($r = -0,31$), а влияние подачи в диапазоне от 50 до 100 мм/мин незначительно ($r = -0,04$) и им можно пренебречь. Параметр L_1 , который характеризует степень раскрытия трещины изнутри стружки, больше зависит от скорости фрезерования ($r = 0,52$), чем от подачи ($r = -0,37$), а глубина резания на него никак не влияет ($r = -0,01$). При оценке корреляций между режимами резания и параметрами высоты выступов h_3 было обнаружено, что наибольшее влияние на деформацию выступов оказывает скорость резания ($r = -0,81$), которая имеет устойчивую сильную отрицательную корреляцию. Это указывает на то, что при увеличении скорости резания в диапазоне от

100 до 300 м/мин происходит уменьшение высоты выступов h_3 . При определении влияния подачи наблюдается умеренная корреляция ($r = 0,49$). В свою очередь, глубина резания при других равных режимах фрезерования абсолютно не влияет, а коэффициент корреляции стремится к нулю.

Список литературы

1. Komanduri R. Some clarifications of the mechanics of chip formation when machining titanium alloys // *Wear*. – 1982. – Vol. 76. – P. 15–34. – DOI: 10.1016/0043-1648(82)90113-2.
2. Influence of cutting tool wear on contact stresses and temperature distribution in titanium alloy machining / V.N. Kozlov, J.Y. Zhang, E. Letshiner, W.Z. Zhao // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 743. – P. 252–257. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.252.
3. Kozlov V.N., Zhang J.Y. Strength of cutting tool in titanium alloy machining // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – P. 427–431. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.427.
4. Experimental research of milling force and surface quality for TC4 titanium alloy of micro-milling / H. Liu, Y. Sun, Y. Geng, D. Shan // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 79. – P. 705–716. – DOI: 10.1007/s00170-015-6844-5.
5. Oliaei S.N., Karpat Y. Investigating the influence of built-up edge on forces and surface roughness in micro scale orthogonal machining of titanium alloy Ti6Al4V // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 235. – P. 28–40. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.010.
6. Identification of chatter in milling of Ti-6Al-4V titanium alloy thin-walled workpieces based on cutting force signals and surface topography / J. Feng, Z. Sun, Z. Jiang, L. Yang // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 82. – P. 1909–1920. – DOI: 10.1007/s00170-015-7509-0.
7. Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces / M. Bogoljubova, A. Afonarov, V. Kozlov, O. Sumtsova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 124. – P. 012045. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012045.
8. Rahman M., Wang Z.G., Wong Y.S. A review on high-speed machining of titanium alloys // *JSME International Journal. Series C*. – 2006. – Vol. 49. – P. 11–20. – DOI: 10.1299/jsmec.49.11.
9. Li L., He N., Xu J.H. Experimental study on high speed milling of Ti alloys // *Materials Science Forum*. – 2004. – Vol. 471–472. – P. 414–418. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.471-472.414.

10. Milling force vibration analysis in high speed milling of Ti alloy using variable pitch angle mill / P. Huang, J. Li, J. Sun, M. Ge // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 58. – P. 153–160. – DOI: 10.1007/s00170-011-3380-9.
11. Abele E., Fröhlich B. High speed milling of titanium alloys // *Advances in Production Engineering & Management*. – 2008. – Vol. 3. – P. 131–140.
12. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures / R.B. da Silva, Á.R. Machado, E.O. Ezugwu, J. Bonney, W.F. Sales // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213. – P. 1459–1464. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.008.
13. Research on cutting performance and tool life improvement methods of titanium alloy ultra-high speed milling tools / Q. Wang, X. Chen, Q. An, M. Chen, H. Guo, Y. He // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 131. – P. 38–51. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.018.
14. Ullah I., Akinlabi E.T., Songmene V. Thermo-metallo-mechanical based phase transformation modeling for high-speed milling of Ti-6Al-4V through stress-strain and temperature effects // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 30. – P. 894–909. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.03.096.
15. High speed machining of titanium Ti6Al4V alloy components: study and optimisation of cutting parameters using RSM / S. Raghavendra, P.S. Sathyanarayana, S. Selvakumar, V.S. Thangarasu, K.N. Manjunatha // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2020. – Vol. 8. – P. 277–290. – DOI: 10.1080/2374068X.2020.1806684.
16. Towards optimization of surface roughness and productivity aspects during high-speed machining of Ti-6Al-4V / A.T. Abbas, N. Sharma, S. Anwar, F.H. Hashmi, M. Jamil, H. Hegab // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – P. 3749. – DOI: 10.3390/ma12223749.
17. Gao Y., Wang G., Liu B. Chip formation characteristics in the machining of titanium alloys: A review // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2016. – Vol. 18. – P. 155. – DOI: 10.1504/IJMMM.2016.075467.
18. Jawaid A., Sharif S., Koksai S. Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 99. – P. 266–274. – DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00438-0.
19. Zhang Y.P., Xu J.H., Geng G.S. Tool wear and surface integrity in high speed milling of a near alpha titanium alloy // *Materials Science Forum*. – 2006. – Vol. 532–533. – P. 644–647. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.644.
20. High speed milling of Ti-6Al-4V using coated carbide tools / N. Elmagrabi, C.H.C. Haron, A.G. Jaharah, F.M. Shuaib // *European Journal of Scientific Research*. – 2008. – Vol. 22. – P. 153–160.
21. Kumar Khare S., Singh Phull G. Tool wear and surface roughness evaluation of mill insert tools in high-speed machining of Ti-6Al-4 V // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.01.297.
22. Ginting A., Nouari M. Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46. – P. 758–768. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.032.
23. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63. – P. 631–653. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.
24. Denkena B., Koehler J., Rehe M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 1. – P. 190–195. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.033.
25. Jenkins R., Snyder R.L. Introduction to X-ray powder diffractometry. – New York: Wiley, 1996. – 403 p. – ISBN 0-471-51339-3.
26. Stokes A.R., Wilson A.J.C. The diffraction of X-rays by distorted crystal aggregates // *Proceedings of the Physical Society*. – 1944. – Vol. 56. – P. 174–181. – DOI: 10.1088/0959-5309/56/3/303.
27. Zhang J., Kozlov V.N., Liu S. Influence of wear-resistant coating on the reliability of replaceable inserts in cutting steel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 795. – P. 012023. – DOI: 10.1088/1757-899X/795/1/012023.
28. Calculation of contact stresses during titanium alloy cutting / V.N. Kozlov, J.Y. Zhang, Y.B. Guo, S.K. Sabavath // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 769. – P. 364–370. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.364.
29. Cutting temperature in high speed milling of a near alpha titanium alloy / G.S. Geng, J.H. Xu, Y.C. Fu, Y.F. Ge, C. Su // *Key Engineering Materials*. – 2006. – Vol. 315–316. – P. 145–149. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.315-316.145.
30. Pramanik A. Problems and solutions in machining of titanium alloys // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 70. – P. 919–928. – DOI: 10.1007/s00170-013-5326-x.
31. Investigation on morphological evolution of chips for Ti6Al4V alloys with the increasing milling speed / H.G. Liu, J. Zhang, Y. Jiang, Y. He, X. Xu, W. Zhao // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – P. 408–411. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.127.
32. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of

titanium alloys // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49. – P. 561–568. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.

33. *Amin A.K.M.N., Ismail A.F., Nor Khairushima M.K.* Effectiveness of uncoated WC–Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy – Ti-6Al-4V // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 192–193. – P. 147–158. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.095.

34. *Chen Y., Chen T.* Study on cutting performance in ultrasonic-assisted milling of titanium alloy with circular-arc milling cutters // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 120. – P. 415–425. – DOI: 10.1007/s00170-022-08818-9.

35. Analysis of microstructure and chip formation when machining Ti-6Al-4V / I. Shyha, S. Gariani, M.A. El-Sayed, D. Huo // Metals. – 2018. – Vol. 8 (3). – P. 185. – DOI: 10.3390/met8030185.

36. *Sun S.* Observation and quantitative characterization of geometric and cyclical features associated with chip segmentation during machining of Ti6Al4V alloy // Journal of Materials Processing Technology. – 2025. – Vol. 338. – P. 118794. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2025.118794.

37. *Kozlov V., Gerasimov A., Kim A.* Distribution of contact loads over the flank-land of the cutter with a rounded cutting edge // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124. – P. 012173. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012173.

38. *Mesquita R.A.* Tool steels: Properties and performance. – Boca Raton: CRC Press, 2021. – 257 p. – ISBN 9780367782573.

39. *Che-Haron C.H.* Tool life and surface integrity in turning titanium alloy // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 118. – P. 231–237. – DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00926-8.

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



Investigation of the characteristics of chip formation and wear of working surfaces of milling inserts with CVD coating in high-speed α -Ti machining

Petr Pivkin^{1, a}, Artem Babaev^{2, b, *}, Nikolai Savchenko^{3, c}, Viktor Kozlov^{3, d}, Artem Semenov^{3, e},
 Vladimir Grechishnikov^{1, f}, Ludmila Uvarova^{1, g}, Alexey Nadykto^{1, h}

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN", 3a Vadkovski Lane, Moscow, 127055, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-7547-4652>, pmpivkin@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2334-1679>, temkams@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0001-8254-5853>, savnick@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>, kozlov-victor@bk.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>, artems2102@yandex.ru; ^f <https://orcid.org/0009-0001-5535-0724>, grechishnikov1935@gmail.com;

^g <https://orcid.org/0000-0003-1137-6436>, l.uvarova@stankin.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0003-3652-7421>, abnadykto@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 April 2026

Revised: 14 April 2026

Accepted: 30 April 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Titanium alloy

High-speed milling

Chip

Wear and tear

Funding

The research carried out with the financial support of the Russian Federation under project No. 22-79-10353-II.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Center for Collective Use of Physical-Chemical Mathematics (TPU).

ABSTRACT

Introduction. Due to the wide application of pure α -titanium in critical products, the intensification of its machining by cutting is an urgent task. Existing studies focus mainly on alloyed alloys, while the features of high-speed dry milling of pure α -Ti are not well understood. **The aim of this work** was to investigate the influence of milling modes on the wear of a CVD-coating ($Al_2O_3/TiCN+TiN$) on carbide inserts, chip morphology and deformation processes in the surface layer of Ti Grade 2 alloy. **Methodology.** The experiments were carried out using parallel milling in the range of cutting speeds $v = 100\text{--}300$ m/min, feed rates $f = 50\text{--}100$ mm/min and depths of cut $a_p = 0.2\text{--}0.4$ mm without coolant. The condition of the cutting edges and the morphology of the chips were investigated using SEM and EDX. X-ray diffraction analysis was used to assess deformation changes. The data were processed using correlation and regression analysis methods. **Results and discussion.** It has been found that with increasing cutting speed, adhesion processes and thermomechanical stresses are intensified, leading to local scraping and delamination of the CVD coating on the rake surface. At a speed of 300 m/min, there is significant material buildup, forming an unstable built-up edge. The study of the chips revealed a transition from continuous to elemental form. A strong negative correlation ($r = -0.81$) between the cutting speed and the height of protrusions (h_3) on the chip was found, as well as a moderate positive influence of the depth of cut on the continuity coefficient ($r = 0.55$). The results obtained are relevant for the optimization of high-speed dry machining of pure titanium products used in cryogenic engineering and heat exchangers. **Conclusions.** The dominant wear mechanisms are adhesion and thermomechanical degradation of the coating. The critical mode leading to intensive buildup is a combination of $v = 300$ m/min, $f = 100$ mm/min, $a_p = 0.4$ mm. To reduce wear, it is recommended to control heat dissipation by optimizing cutting speed and depth of cut.

For citation: Pivkin P.M., Babaev A.S., Savchenko N.L., Kozlov V.N., Semenov A.R., Grechishnikov V.A., Uvarova L.A., Nadykto A.B. Investigation of the characteristics of chip formation and wear of working surfaces of milling inserts with CVD coating in high-speed α -Ti machining. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 196–222. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-196-222. (In Russian).

* 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



References

1. Komanduri R. Some clarifications of the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. *Wear*, 1982, vol. 76, pp. 15–34. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90113-2.
2. Kozlov V.N., Zhang J.Y., Letshiner E., Zhao W.Z. Influence of cutting tool wear on contact stresses and temperature distribution in titanium alloy machining. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 252–257. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.252.
3. Kozlov V.N., Zhang J.Y. Strength of cutting tool in titanium alloy machining. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 427–431. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.427.
4. Liu H., Sun Y., Geng Y., Shan D. Experimental research of milling force and surface quality for TC4 titanium alloy of micro-milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 79, pp. 705–716. DOI: 10.1007/s00170-015-6844-5.
5. Oliaei S.N., Karpát Y. Investigating the influence of built-up edge on forces and surface roughness in micro scale orthogonal machining of titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 235, pp. 28–40. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.010.
6. Feng J., Sun Z., Jiang Z., Yang L. Identification of chatter in milling of Ti-6Al-4V titanium alloy thin-walled workpieces based on cutting force signals and surface topography. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1909–1920. DOI: 10.1007/s00170-015-7509-0.
7. Bogoljubova M., Afonarov A., Kozlov V., Sumtsova O. Mathematical simulation and optimization of cutting modes in turning of titanium alloy workpieces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, p. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012045.
8. Rahman M., Wang Z.G., Wong Y.S. A review on high-speed machining of titanium alloys. *JSME International Journal. Series C*, 2006, vol. 49, pp. 11–20. DOI: 10.1299/jsmec.49.11.
9. Li L., He N., Xu J.H. Experimental study on high speed milling of Ti alloys. *Materials Science Forum*, 2004, vol. 471–472, pp. 414–418. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.471-472.414.
10. Huang P., Li J., Sun J., Ge M. Milling force vibration analysis in high speed milling of Ti alloy using variable pitch angle mill. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 58, pp. 153–160. DOI: 10.1007/s00170-011-3380-9.
11. Abele E., Fröhlich B. High speed milling of titanium alloys. *Advances in Production Engineering & Management*, 2008, vol. 3, pp. 131–140.
12. Da Silva R.B., Machado Á.R., Ezugwu E.O., Bonney J., Sales W.F. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, pp. 1459–1464. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.008.
13. Wang Q., Chen X., An Q., Chen M., Guo H., He Y. Research on cutting performance and tool life improvement methods of titanium alloy ultra-high speed milling tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 131, pp. 38–51. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.018.
14. Ullah I., Akinlabi E.T., Songmene V. Thermo-metallo-mechanical based phase transformation modeling for high-speed milling of Ti-6Al-4V through stress-strain and temperature effects. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 30, pp. 894–909. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.03.096.
15. Raghavendra S., Sathyanarayanab P.S., Selvakumar S., Thangarasu V.S., Manjunatha K.N. High speed machining of titanium Ti6Al4V alloy components: study and optimisation of cutting parameters using RSM. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2020, vol. 8, pp. 277–290. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1806684.
16. Abbas A.T., Sharma N., Anwar S., Hashmi F.H., Jamil M., Hegab H. Towards optimization of surface roughness and productivity aspects during high-speed machining of Ti-6Al-4V. *Materials*, 2019, vol. 12, p. 3749. DOI: 10.3390/ma12223749.
17. Gao Y., Wang G., Liu B. Chip formation characteristics in the machining of titanium alloys: A review. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2016, vol. 18, p. 155. DOI: 10.1504/IJMMM.2016.075467.
18. Jawaid A., Sharif S., Koksál S. Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 99, pp. 266–274. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00438-0.
19. Zhang Y.P., Xu J.H., Geng G.S. Tool wear and surface integrity in high speed milling of a near alpha titanium alloy. *Materials Science Forum*, 2006, vol. 532–533, pp. 644–647. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.644.
20. Elmagrabi N., Che Haron C.H., Jaharah A.G., Shuaib F.M. High speed milling of Ti-6Al-4V using coated carbide tools. *European Journal of Scientific Research*, 2008, vol. 22, pp. 153–160.

21. Kumar Khare S., Singh Phull G. Tool wear and surface roughness evaluation of mill insert tools in high-speed machining of Ti-6Al-4 V. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.01.297.
22. Ginting A., Nouari M. Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, pp. 758–768. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.032.
23. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, pp. 631–653. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.
24. Denkena B., Koehler J., Rehe M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 190–195. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.033.
25. Jenkins R., Snyder R.L. *Introduction to X-ray powder diffractometry*. New York, Wiley, 1996. 403 p. ISBN 0-471-51339-3.
26. Stokes A.R., Wilson A.J.C. The diffraction of X-rays by distorted crystal aggregates. *Proceedings of the Physical Society*, 1944, vol. 56, pp. 174–181. DOI: 10.1088/0959-5309/56/3/303.
27. Zhang J., Kozlov V.N., Liu S. Influence of wear-resistant coating on the reliability of replaceable inserts in cutting steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, p. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/795/1/012023.
28. Kozlov V.N., Zhang J.Y., Guo Y.B., Sabavath S.K. Calculation of contact stresses during titanium alloy cutting. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 769, pp. 364–370. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.364.
29. Geng G.S. Xu J.H., Fu Y.C., Ge Y.F., Su C. Cutting temperature in high speed milling of a near alpha titanium alloy. *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 315–316, pp. 145–149. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.315-316.145.
30. Pramanik A. Problems and solutions in machining of titanium alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 70, pp. 919–928. DOI: 10.1007/s00170-013-5326-x.
31. Liu H.G., Zhang J., Jiang Y., He Y., Xu X., Zhao W. Investigation on morphological evolution of chips for Ti6Al4V alloys with the increasing milling speed. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 408–411. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.127.
32. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, pp. 561–568. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.
33. Amin A.K.M.N., Ismail A.F., Nor Khairusshima M.K. Effectiveness of uncoated WC–Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy – Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 192–193, pp. 147–158. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.095.
34. Chen Y., Chen T. Study on cutting performance in ultrasonic-assisted milling of titanium alloy with circular-arc milling cutters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 120, pp. 415–425. DOI: 10.1007/s00170-022-08818-9.
35. Shyha I., Gariani S., El-Sayed M.A., Huo D. Analysis of microstructure and chip formation when machining Ti-6Al-4V. *Metals*, 2018, vol. 8 (3), p. 185. DOI: 10.3390/met8030185.
36. Sun S. Observation and quantitative characterization of geometric and cyclical features associated with chip segmentation during machining of Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2025, vol. 338, p. 118794. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2025.118794.
37. Kozlov V., Gerasimov A., Kim A. Distribution of contact loads over the flank-land of the cutter with a rounded cutting edge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, p. 012173. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012173.
38. Mesquita R.A. *Tool steels: Properties and performance*. Boca Raton, CRC Press, 2021. 257 p. ISBN 9780367782573.
39. Che-Haron C.H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 118, pp. 231–237. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00926-8.

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>).