

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Московский государственный технологический университет «Станкин»
(ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»)



На правах рукописи

Тет У

**УЛУЧШЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА
ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ИНСТРУМЕНТА**

Специальность 2.5.5

Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Федоров Сергей Вольдемарович

Москва 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ	11
1.1 Классификация титановых сплавов	11
1.2 Проблемы обрабатываемости титановых сплавов	13
1.3 Режущие инструменты, используемые в обработке титана	18
1.4 Износостойкость твердосплавных инструментов при обработке титана.....	24
1.5 Покрытия на твердосплавных инструментах и их применение при обработке титана.....	32
1.6 Выводы по главе 1.....	45
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	46
2.1 Влияние способа получения заготовки на свойства титанового сплава...	46
2.2 Свойства сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученного по традиционной технологии	46
2.3 Свойства сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученных по технологии селективного электронно-лучевого плавления	48
2.4 Свойства и структура заготовки ВТ18У	54
2.5 Используемое металлорежущее оборудование	56
2.6 Метрологическое оборудование для измерения износа и оценки качества обработанной поверхности	58
2.7 Выводы по главе 2.....	60
ГЛАВА 3. СРАВНЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННЫХ КОВКОЙ И МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЛАВЛЕНИЯ, ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ БЫСТРОРЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ.....	61
3.1 Свойства и покрытия режущего инструмента	63
3.1.1 Добавление малых количеств азота к предварительно обработанной быстрорежущей стали.....	65

3.2 Влияние структуры заготовки на силы резания.....	68
3.3 Определение среднего коэффициента трения по Амонтону	74
3.4 Выводы по главе 3.....	77
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT18У НА СТОЙКОСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ.....	78
4.1 Исследование процесса схватывания титана и материала износостойкого покрытия при сверлении твердосплавными сверлами	78
4.1.1 Покрытия для испытания режущего инструмента при сверлении заготовки из титана	78
4.1.2 Станок и инструменты.....	80
4.1.3 Влияние титанового покрытия на осевую составляющую сдвигающих усилий.....	82
4.2 Стойкостные испытания концевых твердосплавных фрез с износостойкими покрытиями	93
4.3 Выводы по главе 4.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обрабатывающая промышленность добилась заметных успехов в решении проблем обрабатываемости стали, чугуна и высокотемпературных сплавов (например, сплавов на основе никеля), однако получить удовлетворительный результат обработке титана и его сплавов оказалось гораздо сложнее, и по-прежнему она обходится дороже по сравнению с другими металлами [1-3].

Сложность, связанную с относительно сложной обрабатываемостью титана, обычно связывают с его плохой теплопроводностью и высокой химической активностью. Однако, если говорить о количественной оценке влияния этих факторов, то этому посвящено относительно малое количество исследований, проведенных при разнообразных условиях резания, что несколько затрудняет сравнение результатов. Вопрос, касающийся влияния взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалом на параметры обработки резанием, во многом остается открытым.

Существует достаточно много работ, посвященных методам улучшения обрабатываемости титана, и они показывают возможность обеспечения значительных улучшений в процессе резания. В них отмечается, что на температуру в зоне контакта инструмента и заготовки в основном влияет скорость резания, которая значительно повышается во время механической обработки титановых сплавов в результате слишком высокой скорости тепловыделения, которая часто не может быть сбалансирована скоростью отвода тепла из зоны резания.

Однако сложно найти сравнение этих методов с точки зрения определения условий, при которых каждый из них окажется наиболее перспективным. Ощущается недостаток исследований взаимосвязи между условиями резания, скоростью тепловыделения и отвода тепла, интенсивностью процессов схватывания заготовки и инструмента, а также изменением температуры резания. В настоящей работе предпринимается попытка оценить влияние способа

модификации поверхности фрез из быстрорежущей стали и структуры титановой заготовки на силовые параметры процесса резания и коэффициент трения Амонтона, который можно было бы использовать, как некий критерий обрабатываемости. Также рассматривается вопрос поиска подходов, позволяющих осуществить рациональный выбор состава износостойкого покрытия на основе исследования процессов схватывания покрытого твердосплавного инструмента с титановой заготовкой на период стойкости твердосплавных концевых фрез. Методы оценки обрабатываемости фрезами с различной поверхностной обработкой титановых сплавов на примере ВТ6 и ВТ18У, которые предлагаются в настоящей работе вполне способны быть полезны с точки зрения повышения качества, надежности и производительности обработки. Таким образом, тему исследования можно считать актуальной.

Степень разработанности темы. Твердосплавные инструменты без покрытия по-прежнему часто являются предпочтительным выбором для обработки титана, поскольку большинство твердосплавных инструментов с покрытием работают хуже из-за реакционной способности титана с материалами покрытия. Тем не менее, с развитием технологий нанесения стали были внедрены новые конструкции покрытий [4-6], созданных на основе комбинированных процессов, представляющих собой последовательность нескольких технологий с целью получения сочетания свойств, получить которые в отдельном применении каждой не представляется возможным [7].

Другими словами, современные покрытия конструируются, как некий износостойкий комплекс с учетом особенностей предполагаемых условий его работы. В результате в большинстве случаев удается добиться эффекта повышения стойкости режущего инструмента в 3–5 раз при обработке углеродистых и низколегированных сталей. С титаном работать существенно сложнее, и если удастся увеличить период стойкости на 50–70 %, то это уже можно считать успехом. Причину этого видят в особенностях поведения теплового источника при образовании стружки, которое связывают с характером трения на рабочих поверхностях резца.

Таким образом эффективность покрытия, как износостойкого комплекса, будет зависеть от степени уменьшения фрикционного взаимодействия в зоне контакта, что, в свою очередь, должно благоприятно сказываться на термостойкости.

Для этой цели разработаны специальные антифрикционные слои покрытий, которые могут быть нанесены разными способами.

Развитием методов улучшения обрабатываемости и модифицирования инструментальных материалов занимались большое количество ученых, среди которых хочется отметить Верещаку А. С., Григорьева С. Н., Кремнева Л. С., в работах которых раскрыты механизмы и природа изнашивания инструментов с покрытиями для различных условий обработки.

На основе анализа рассмотренных работ можно сделать заключение о перспективности дальнейшего повышения эксплуатационных свойств режущего инструмента при обработке титана путем применения многослойных наноструктурированных износостойких покрытий с рациональной структурой и элементным составом.

Цель работы состоит в определении особенностей взаимодействия между быстрорежущим и твердосплавным инструментом с комбинированными износостойкими покрытиями и титановой заготовкой для качественной оценки ее обрабатываемости фрезерованием.

Научные задачи исследования, которые следует решить в ходе выполнения работы:

1. Определить критерии, позволяющие оценить качество обрабатываемости титановых заготовок быстрорежущим и твердосплавным инструментами с комбинированными износостойкими покрытиями.
2. Провести качественную оценку обрабатываемости титанового сплава фрезерованием на основе оценки измерения составляющих силы резания P_z и коэффициента трения Амонтонна.
3. Выявить особенности влияния комбинированной поверхностной обработки на силы резания и срок службы инструмента.

4. Оценить влияние комбинаций износостойкого и антифрикционного слоев покрытия на осевую силу при сверлении титанового сплава.
5. Предложить износостойкое покрытие на основе сочетания износостойкого и антифрикционного слоев для повышения стойкости концевых твердосплавных фрез при фрезеровании титанового сплава.

Объектом исследования являются процессы взаимодействия режущего инструмента и титановых сплавов, проявляющиеся как изменение силовых параметров, геометрических размеров обработанных заготовок, изменения периода стойкости фрезерных инструментов.

Предметом исследования является комбинация составов слоев покрытия, влияющая на режущую способность быстрорежущего и твердосплавного инструмента при обработке титана.

Научная новизна. состоит в

1. Выявлении того, что применение быстрорежущего инструмента с комбинированной поверхностной обработкой при фрезеровании сплава ВТ6 способно значительно снизить величину составляющей силы резания R_z , хотя величины R_y и R_x меняются незначительно.
2. Выявлено, что средний коэффициент трения Амонтона значительно повышается для инструмента с комбинированной поверхностной обработкой, что связывается с изменением в большую сторону радиуса округления режущей кромки инструмента и состоянием титановой заготовки.
3. Выявлении качественной связи между взаимодействием материалов износостойкого покрытия и титановой заготовки, выражающейся, как соответствие параметров R_z на ленточке сверла и R_a на внутренней поверхности отверстия от номинального при сверлении со стойкостью при фрезеровании.
4. Достижении снижения интенсивности изнашивания твердосплавного инструмента с комбинацией слоев износостойкого покрытия, благодаря рациональному выбору химического состава, который способен снизить

налипание на рабочие поверхности обрабатываемого титанового сплава.

Методы исследования. Методологическую основу составили указанные в диссертации труды ученых, исследовавших процессы обработки титановых сплавов инструментом с износостойкими покрытиями. Для исследования результатов ионно-плазменной обработки поверхности инструментов и обработанных заготовок использованы современные экспериментальные методы металлографического анализа структуры, электронной микроскопии, линейно-угловых измерений, динамометрии сил резания, а также обработки экспериментальных данных.

Практическая значимость работы заключается в

1. Описании особенностей работы инструментов из быстрорежущей стали и твердого сплава с титановыми заготовками, связанными с увеличением силовой нагрузки на инструмент из-за существенного налипания обрабатываемого материала на область, прилегающую к режущей кромке.
2. Способах оценки обрабатываемости по значениям коэффициента трения Амонтона, характеру образовавшегося нароста на ленточке сверла и его влиянии на геометрические параметры полученных отверстий.
3. Технологических рекомендациях по назначению состава и конструкции износостойкого покрытия, включающего нанесение антифрикционного слоя.
4. Оценке работоспособности фрез с различными износостойкими покрытиями при обработке титановых сплавов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности взаимодействия между быстрорежущим и твердосплавным инструментом с комбинированными износостойкими покрытиями и титановой заготовкой пригодные для качественной оценки ее обрабатываемости фрезерованием, проявляющиеся в изменении силовых параметров, изменении коэффициента трения Амонтона и характере налипания обрабатываемого материала на инструмент, влияющего на качественные показатели изделия.

2. Силовые параметры процесса фрезерования титановых заготовок, полученных по аддитивной технологии, существенно отличаются при обработке заготовки металла, полученной ковкой. Так, составляющая силы резания P_z на 15% увеличивается, а сила P_y на 20% падает.
3. Корреляция между данными, полученными в экспериментах по сверлению и фрезерованию, позволила выявить покрытие на основе (TiAlSi)N в комбинации с эпиламинированием, обеспечившее лучшее сочетание параметров качества отверстия при сверлении, также дало повышение стойкости до 2 раз при фрезеровании сплава ВТ18У концевыми фрезами.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами успешной апробации основных положений в рецензируемых научных изданиях и на международных и российских научных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

Materials Science Forum. ISSN:1662-9752, Vol. 1037, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.245>, MSF.1037.245, сс. 245-250, г. Ялта 2021 г.

“Research & Development in material science” 18(3), RDMS. 000937, 2023 г.

"15th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021, сс. 145, г. Екатеринбург 2021 г.

“16th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows Coatings deposition” EFRE 2022: сс. 313, г. Томск 2022 г.

“XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению»” сс. 83–86, г. Москва 2022 г.

Научный электронный журнал «Инновации. Наука. Образование», Отв. ред. Сафронов А. И. – Тольятти. № 103 (июнь) 2024, сс. 103–117. doi: <https://innovjourn.ru/nomer/103-nomer/>.

Инженерный вестник Дона, №10 (2024), <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9548>.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части пунктов 3 и 6 её паспорта.

Публикации. По теме выпускной работы опубликовано 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статей в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 2 печатные работы в сборниках международных научно-технических конференции.

Структура работы. Научный доклад состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка используемой литературы из 170 наименований. Основные содержание диссертации изложено на 124 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок и 15 таблиц.

ГЛАВА 1. ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

1.1 Классификация титановых сплавов.

Применение титана и его сплавов в последнее время стало заметно расширяться в самых различных отраслях промышленности из-за их уникальных свойств. В частности, наиболее широко металл используется в аэрокосмической промышленности для изготовления множества деталей двигателя и планера [8-17], где могут составлять от 30% до 40% от общей массы изделия [18,19], обладая исключительной коррозионной стойкостью [20-24]. Наиболее популярным является сплав Ti-6Al-4V, поскольку на его долю приходится 60% всего производства титана. Благодаря аллотропическому превращению титан существует в двух кристаллографических формах. Ниже 882°C титан представляет собой α -фазу с гексагональной кристаллической структурой. При температурах выше 882°C титан превращается в более пластичную β -фазу, позволяющую более легкое возникновение локальных деформаций. Температура плавления титана 1677°C.

Нелегированный титан обладает отличной коррозионной стойкостью, но его прочность относительно не велика, и поэтому его использование достаточно ограничена.

Температуру аллотропического превращения титана можно изменить как в сторону повышения, так и как с основным металлом, так и с индивидуальными легирующими компонентами. Элементы легирующих добавок, такие как олово (Sn), кремний (Si) и цирконий (Zr), имеют высокую растворимость и практически не воздействуют на температуру превращения, поэтому их принято считать нейтральными компонентами. Олово и цирконий могут значительно повысить прочностные характеристики β -фазы титана. Классификация титановых сплавов осуществляется в зависимости от условий легирования и используемых добавок, что в свою очередь способствует улучшению их эксплуатационных свойств.

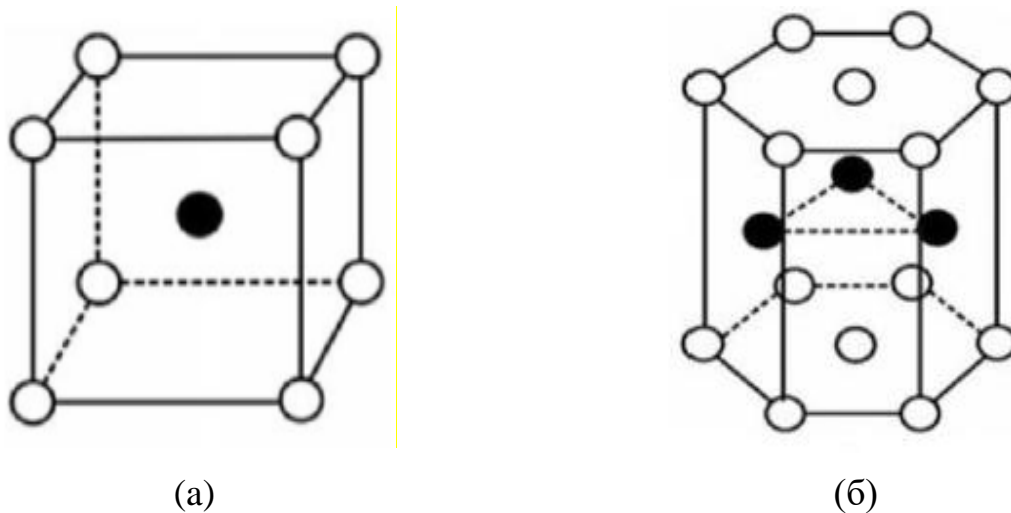


Рисунок 1.1. Титан имеет две аллотропные формы: (а) телоцентрированную кубическую структуру (β -структура) и (б) шестиугольную плотноупакованную структуру (α -структура) [10].

Среди титановых сплавов рассматривают: **α сплавы:** α сплавы, обладающие высокой устойчивостью к ползучести до 300°C , обладают отличной свариваемостью, но практически не поддаются термической обработке. Их предел текучести составляет от 170 до 480 МПа. Это делает их незаменимыми при создании криогенной техники и ряда коррозионностойких конструкций.

Псевдо α -сплавы: это α сплавы, в которые добавлено немного β стабилизаторов (1–2%). Таким образом, их микроструктура характеризуется в основном α фазой с небольшим количеством β , и поэтому их поведение мало отличается от обычных α -сплавов. Добавление β -стабилизаторов заметно улучшает их прочность и обрабатываемость, и делает их способными работать при температурах до 520°C . Такие сплавы широко используются в реактивных двигателях. Примерами таких сплавов являются ВТ6 и ВТ18У.

Сплавы $\alpha+\beta$ содержат до 6% β -стабилизаторов, что превышает уровень в псевдо α -сплавах, обеспечивая хорошую обработку термической обработки и позволяя использовать их при температуре до 400°C . Обладают лучшей прочностью, но за счет снижения температуры ползучести по сравнению с большинством α -сплавов. Эти сплавы наиболее популярны и составляют до 70% от объема производства титана, среди которых ВТ-6 (Ti-6Al-4V) составляет около

60%, поэтому VT-6 был выбран в качестве материала заготовки в настоящем исследовании.

Метастабильные β -сплавы содержат в составе до 15% β -стабилизаторов, и β -фаза в их структуре находится в метастабильном состоянии при нормальных условиях. Кроме того, небольшое количество α стабилизаторов, содержащихся в них, придают этим сплавам дополнительную прочность, ковкость и прокаливаемость. **β -сплавы** содержат до 30% β -стабилизаторов, и обеспечивают высокую прочность, прокаливаемость, устойчивость к ползучести. В то же время, при повышенных температурах их свойства значительно уступают сплавам $\alpha+\beta$, и они имеют тенденцию к худшей обрабатываемости и пластично-хрупкой деформации. Соединения **алюминия с титаном** применяются для укрепления сплавов титана с целью повышения их жаропрочности и достижения улучшенных характеристик. Однако сплавы, содержащие интерметаллиды, демонстрируют низкую ударную вязкость и плохую прочность.

1.2 Проблемы обрабатываемости титановых сплавов.

Под обрабатываемостью обычно понимают комплекс факторов, определяющих сложность, с которой сталкиваются во время обработки того или иного конкретного материала по сравнению с неким другим материалом, например, углеродистой сталью. Обрабатываемость зависит не только от механических свойств материала, но и от способа обработки, режущего инструмента и условий резания.

Срок службы инструмента, шероховатость поверхности, энергопотребление, силовые параметры и форма стружки также дают некое представление об обрабатываемости материала [29,30]. Титановые сплавы считаются труднообрабатываемыми материалами из-за присущих им свойств [31-33]. **Низкая теплопроводность** - Из-за плохой теплопроводности титана значительная доля энергии преобразуется в тепло, которое, в свою очередь, повышает температуру зоны резания. При обработке стали основная часть выделяемого тепла рассеивается

в стружке, в отличие от обработки титана, когда ни стружка, ни заготовка не способны удовлетворительно рассеивать тепло из-за плохой теплопроводности и до 80% тепла направляется в инструмент, что отрицательно сказывается на его износостойкости.

На рисунке 1.2 показано, что для всех инструментальных материалов рассеиваемое в инструменте количество тепловой энергии значительно выше при обработке Ti-6Al-4V по сравнению со сталью SK45.

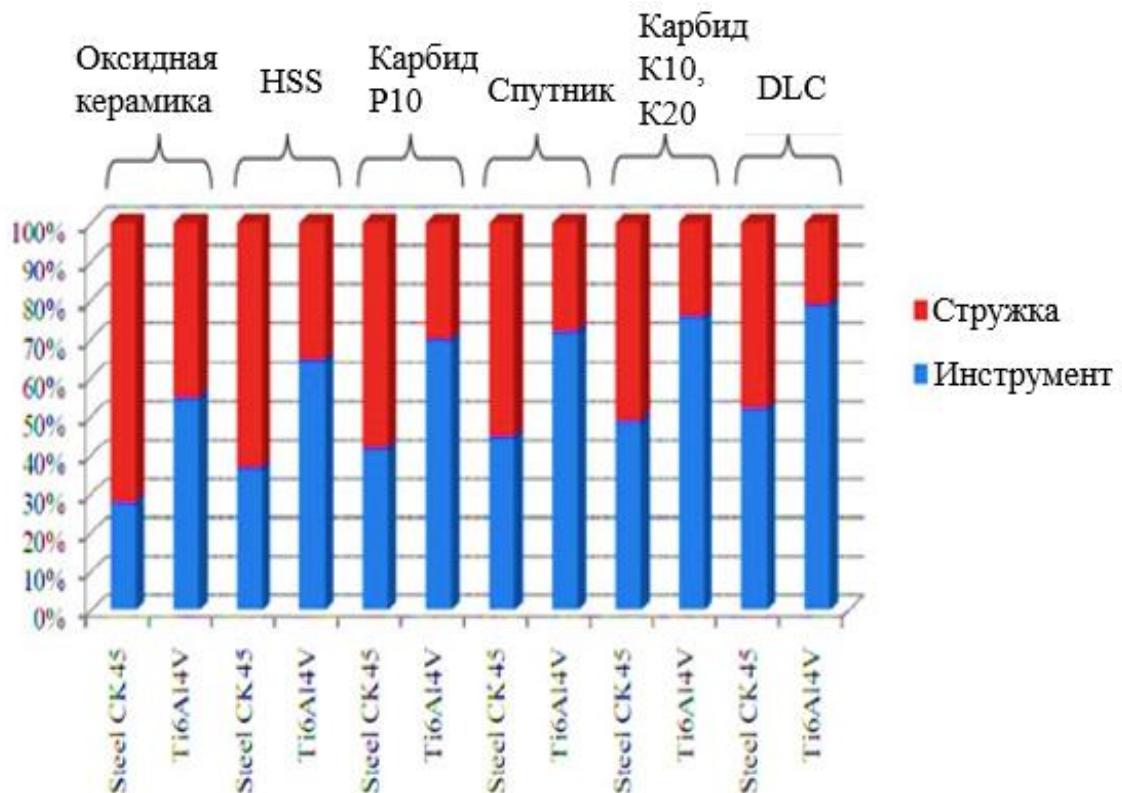


Рисунок 1.2. Выделение тепла в процессе резания сплава VT-6 и стали SK45 [18].

Износ инструмента будет возрастать с увеличением времени обработки, поскольку в зоне резания выделяется всё большее количество тепла. Это особенно актуально при обработке титана, где размеры части малы, а градиент температуры имеет значительные значения из-за короткой длины контакта между рабочей частью инструмента и стружкой, когда зона потока между ними более чем в четыре раза тоньше, чем в случае обработки стали в таких же условиях. В результате температура на контактных площадках может достигнуть 1100°C [16,17].

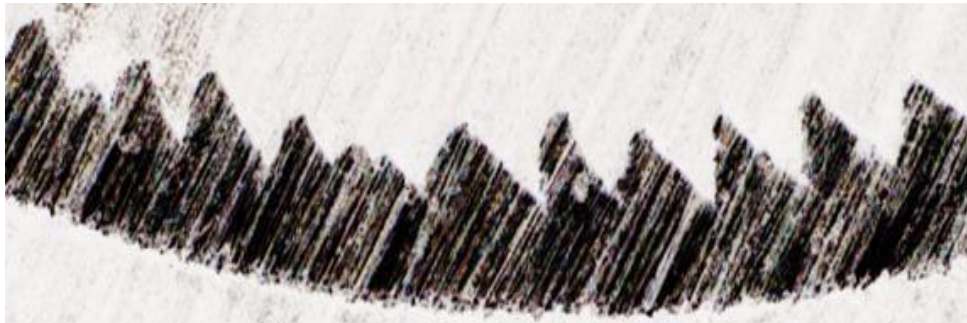
Низкий модуль упругости - Высокая пластичность титана и хорошая трещиностойкость расширяют область применения титановых сплавов, особенно когда требуется низкий модуль упругости. Однако из-за этого контактная площадка по задней поверхности инструмента в случае обработки титана значительно длиннее, из-за того, что титан продавливается под действием резца почти вдвое сильнее, что провоцирует усиление износа и скалывание режущей кромки. Было замечено, что наличие нароста на кромке инструмента при обработке титана, что является обычным явлением, увеличивает силы резания в три-четыре раза. Эта высокая сила в сочетании с низким модулем упругости заставляет заготовку вибрировать. Прогибы приводят к ошибкам в точности размеров и отрицательно сказываются на качестве поверхности готового изделия.

Химическая активность - Титан и сплавы из него достаточно инертны химически при комнатной температуре, но, если их нагреть выше 500°C становятся чрезвычайно активными и взаимодействуют со всеми инструментальными материалами, что проявляется, в частности, в виде налипания на режущую кромку инструмента, что способствует диффузионному износу инструмента.

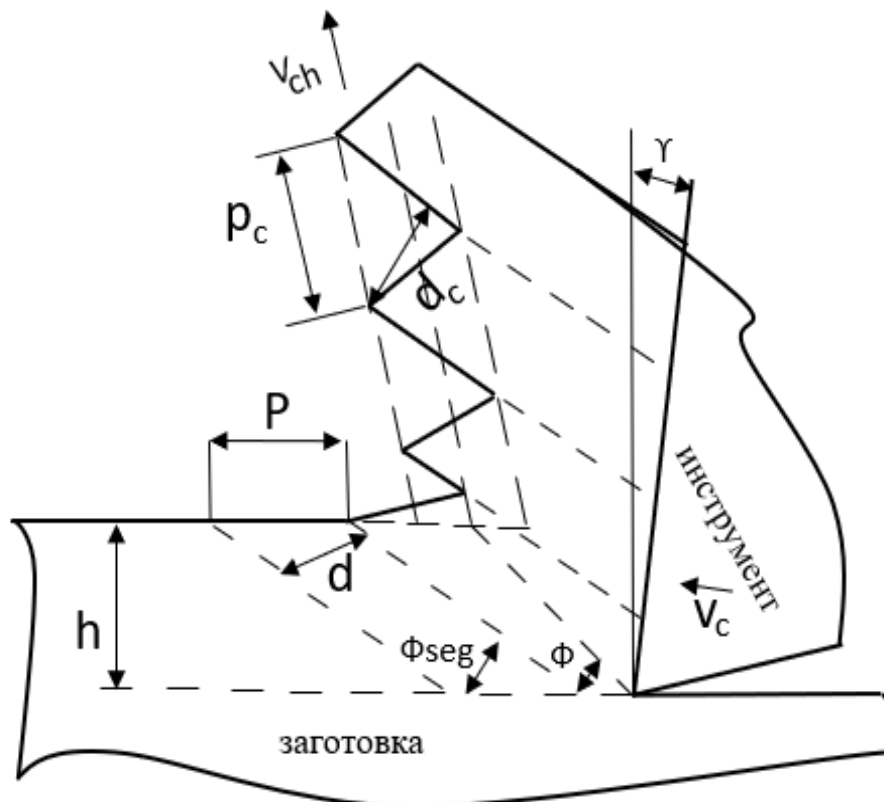
Упрочнение титановых сплавов за счет диффузии и пластической деформации - Режим резания большинства материалов выбирается таким образом, чтобы они в процессе обработки подвергались размягчению под действием термо-силовой нагрузки. Энергия, необходимая для резания при этом уменьшается, а механические характеристики инструментального материала остаются практически прежними. К сожалению, это не относится к резанию титана, который даже упрочняется во время механической обработки. Так что для инструмента, которым предполагается обработать титановый сплав необходима лучшая режущая способность [34,35].

Механизм образования стружки - Отличительные характеристики образования титановых стружек состоят в том, что они зазубренные, сегментированной геометрии с локализованными зонами сдвига. Зазубренные или сегментированные стружки в основном образуются в результате образования адиабатической сдвиговой полосы, обычно начинающейся локальной

деформацией сдвига или распространением трещины с внешней поверхности стружки. На рисунке 1.3 показана сегментированная стружка, обычно наблюдаемая при обработке титана.



а



б

Рисунок 1.3. а) Микроснимок зубчатой пилообразной титановой стружки, б) схема формирования сегментированной стружки при обработке титана [36].

Kumar и Fu [31,32] на основе видеозаписей особенностей формирования титановой стружки при низких и высоких скоростях резания и снимков

поперечного сечения подробно описали механизмы ее образования. На рисунке 1.4 показаны последовательные события, происходящие во время формирования стружки при обработке титана. Их выводы кратко излагаются ниже.

При обработке стали, где деформация распространяется равномерно практически по всей стружке, при обработке титана можно наблюдать узкие зоны между сегментами стружки с интенсивной деформацией металла. При рассмотрении процесса образования сегментной стружки выделяют два этапа. На первом в зоне первичного сдвига происходит локализация деформации вдоль узкой полосы из-за нестабильности материала заготовки. Это начинается на переднем крае и продвигается вверх вогнутостью к свободной поверхности.

На внутренней поверхности сохраняется сильно деформированная зона, которая выглядит как белая полоса при травлении. Второй этап состоит из устойчивого сплющивания оставшейся клиновидной или наклонной поверхности материала заготовки под давлением инструмента, из-за которого образуются сегменты стружки, где деформация существенно ниже. При этом усадка стружки практически полностью отсутствует. Между сегментами можно наблюдать некий белый слой, заполненный высококонцентрированными сдвиговыми полосами, образованными на этом этапе.

По этой причине толщина титановой стружки меньше, чем в случае обработки большинства других металлов и, следовательно, двигается при трении о переднюю поверхность инструмента быстрее, благоприятствуя более интенсивному разогреву в зоне резания, чему также способствует низкая теплопроводность титанового сплава. Также тонкие стружки означают, что площадь контакта мала, тем самым концентрируя тепло, выделяемое над небольшой областью, и повышая контактное напряжение вблизи режущей кромки. Кроме того, локализация сдвига вызывает циклическое изменение сил резания, приводящее к усталости режущего инструмента, и может привести к его сколу. Катастрофический термопластичный сдвиговой механизм образования стружки создает нагретую поверхность, многократно усиливая схватывание и диффузию между инструментом и материалом заготовки.

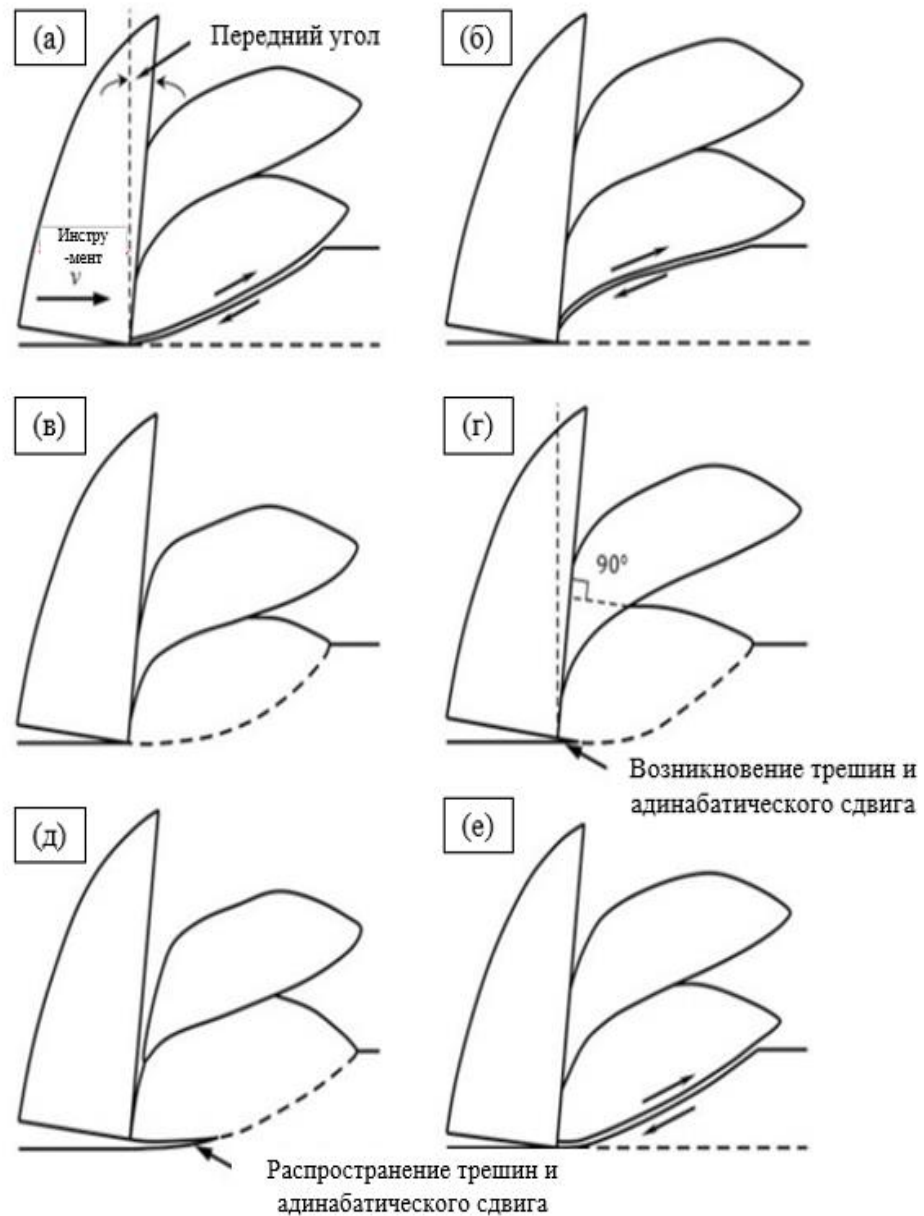


Рисунок 1.4. Последовательные события, иллюстрирующие образование зубчатой стружки при обработке титана [31].

1.3 Режущие инструменты, используемые в обработке титана.

С целью увеличить период стойкости режущих инструментов, предназначенных для обработки титана, было проведено достаточно большое количество научно-исследовательских работ [16-18, 21-23, 37-51], в которых отмечается, что те инструментальные материалы, которые показали превосходные рабочие характеристики при обработке стали, чугуна и даже

труднообрабатываемых никелевых сплавов, оказались малопригодными для улучшения обрабатываемости титана. Причиной этого в первую очередь служит разупрочнение вершины резца, вызванное перегревом из-за плохого отвода интенсивно выделяющегося тепла, что значительно ускоряет изнашивание инструмента и выход его из строя [8,9], [48-52]. В таблице 1.1 показаны Температура, при которой некоторые инструментальные материалы теряют свою твердость, отличается в зависимости от конкретного материала. В графике 1.5 показаны значения горячей твердости различных инструментальных материалов в зависимости от температуры.

Таблица 1.1.

Различные инструментальные материалы демонстрируют разные температуры, при которых они теряют свою твердость. [53]

Инструментальный материал	Температура точки размягчения (°C)
Быстрорежущая сталь (HSS)	600
Карбид вольфрама (WC)	1100
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	1400
Кубический нитрид бора (CBN)	1500
Алмаз	1500

Таким образом, было выявлено, что для обработки титанового сплава режущий инструмент должен обладать следующими особенностями [21-23, 48–51]:

- иметь максимально возможную горячую твердость и быть способным сохранять прочность при воздействии высоких температур и нагрузок.
- обеспечивать эффективный отвод тепла из области резания, чтобы предотвратить перегрев режущей кромки инструмента.
- обладать высокой химической инертностью по отношению к титану.
- обладать значительными пределами прочности при растяжении, сжатие и сдвиг

- быть устойчивым к распространению усталостных трещин и иметь высокую ударную вязкость
- иметь устойчивость к сколам.

В большинстве случаев для обработки титановых сплавов применяют традиционные материалы для режущего инструмента, такие как быстрорежущие стали (HSS), твердые сплавы (WC), кубический нитрид бора (CBN), поликристаллический кубический нитрид бора (PCBN), поликристаллический алмаз (PCD) и керамика, хотя имеются ограничения в их применении.

В свою очередь, каждый из этих материалов обладает уникальными особенностями износостойкости, и выбор между ними зависит от конкретных технологических требований и экономической целесообразности. Несколько исследователей утверждают, что инструменты с поликристаллическими алмазами (PCD) являются наиболее эффективными при обработке титана и его сплавов благодаря исключительной теплопроводности алмазов [56,57]. Результаты исследований подтверждают [58-62], что режущие инструменты из поликристаллического алмаза (PCD) превосходят инструменты из кубического нитрида бора (CBN), поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN), а также твердосплавные инструменты как с покрытием, так и без, при обработке титана. PCD обеспечивает наиболее низкую скорость износа и обеспечивает лучшее качество отделки поверхности заготовки. Согласно [56], вставки PCD могут использоваться на скоростях резания в три раза выше, чем вставки из твердого сплава без покрытия, и могут удалять примерно в два раза больше материала до достижения критерия отказа. Низкий уровень износа инструмента PCD может быть связан с образованием защитного барьера TiC из-за диффузии материалов между инструментом и заготовкой. Однако их относительно высокая стоимость препятствует широкому использованию в промышленности [37-41, 63-69].

Исключая алмазный инструмент, самой высокой твердостью обладает кубический нитрид бора, сохраняя ее до 1500 °C будучи стойким к окислению до 2000°C. [70-74]. Исследователи [75-79] обнаружили, что инструменты из CBN способны поддерживать высокие скорости резания при обработке титановых

сплавов, до 150 м/мин для ВТ6 и 180–220 м/мин для других $\alpha+\beta$ титановых сплавов. Однако их высокая твердость и низкая ударная вязкость делают их восприимчивыми к сколам и разрушению, особенно если используются большие глубины резания. Это ограничивает их применение отделочными операциями во время обработки титана. Кроме того, они примерно в 10–20 раз дороже твердосплавных инструментов, что делает их экономически невыгодными.

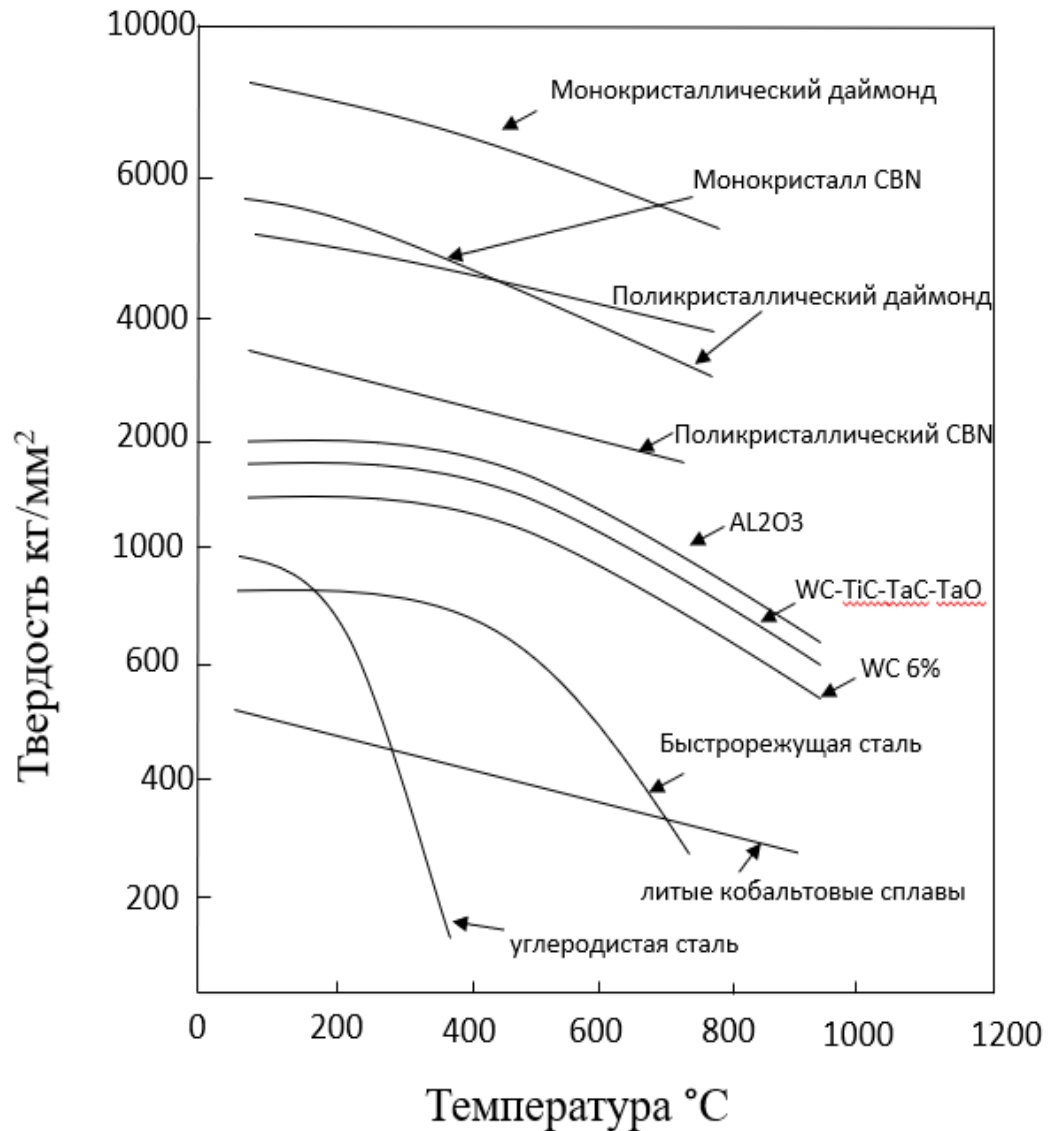


Рисунок 1.5. Материалов для режущего инструмента характеризуется высокая твердость при высоких температурах [54,55].

У инструментов из керамики высокая температура ее плавления препятствует размягчению в сложных условиях резания и предотвращает разупрочнение при

интенсивных режимах обработки. Главным недостатком таких инструментов является их хрупкость и низкая ударная вязкость, из-за чего приходится оберегать их от термических и механических ударов [80,81]. Прочность керамического материала можно существенно поднять добавками в их состав оксидов редкоземельных металлов, таких как иттрий и иттербий, однако это весьма существенно увеличивает стоимость и часто делает неконкурентными.

При обработке титана керамические пластины способны работать до больших значений износа по рабочим поверхностям, чем аналогичный инструмент из твердого сплава [82,83], для которого в отличие от керамики более характерно образование насечек и значительных канавок в виде усов [84-86].

Инструменты из быстрорежущей стали (HSS) широко используются для обработки различных материалов. Они имеют более высокую прочность и способны выдерживать циклическую загрузку по сравнению с твердым сплавом и керамикой, что дает им некоторое преимущество при сверлении, развертывании, нарезании резьбы и протягивании. Однако они достаточно быстро теряют свою твердость при температурах от 500 до 600 °С, и обрабатывать титан со скоростью выше 30 м/мин не получится [87-96] из-за пластической деформации режущей кромки и интенсивного лункообразования на передней поверхности. Более высоколегированные марки инструмента HSS, такие как T5, M40 и некоторые инструменты из HSS с современным наноструктурированным покрытием способны дать лучшую производительность.

Твердосплавные инструменты являются наиболее распространенными и широко используемыми инструментами для обработки титана. Коммерчески доступные твердосплавные инструменты подпадают под две категории: однокарбидные и двух-трех карбидные.

Компоненты, такие как мягкое и пластичное связующее, в сочетании с твердыми и износостойкими кубическими карбидами сердцевины, определяют свойства этих материалов. В результате правильного выбора исходных материалов, состава и параметров обработки возможна настройка широкого диапазона механических свойств.

В частности, можно получить уникальное сочетание твердости и ударной вязкости, что делает их привлекательными для обработки титана. В таблице 1.2 приводится краткая информация о влиянии карбидных фаз на твердосплавные инструменты. На износостойкость твердосплавных инструментов влияют размеры их зерен. Более крупнозернистые твердые сплавы обладают более низким сопротивлением изнашиванию, поскольку крупные зерна более склонны к вытягиванию, когда стружка скользит по передней поверхности.

Таблица 1.2.

Влияние присадок на твердосплавный инструмент [94-96].

Присадка	Положительные эффекты	Негативные последствия
Кобальт (Co)	Повышает ударную вязкость и ударопрочность	Снижает твердость и износостойкость
Карбид вольфрама (WC)	Повышает твердость и износостойкость	Снижает ударную вязкость
Карбид титана (TiC)	Повышает износостойкость	Снижает ударную вязкость
Карбид тантала (TaC)	Повышает горячую твердость и предотвращает пластическую деформацию	-

Однако уменьшение размеров зерен для повышения устойчивости к лункообразованию отрицательно сказывается на износе по задней поверхности, поэтому скорость резания более 60 м/мин при обработке титана не рекомендуется [97-99]. Исследователи обнаружили, что инструменты из карбида вольфрама превосходят твердосплавные инструменты с карбидом титана. Они дают лучшую производительность независимо от того, какой износ механизма имеет место.

Диффузионный износ также выше в этих инструментах из-за преимущественного растворения смешанных карбидов [100]. Твердосплавные инструменты с покрытием также используются для обработки титана. Тем не менее, большинство инструментов с покрытием часто работают хуже по сравнению с непокрытыми из-за реакционного взаимодействия титана с материалами покрытия. Поэтому непокрытые однокарбидные твердые сплавы по-прежнему часто являются предпочтительным выбором для обработки титана.

1.4 Износостойкость твердосплавных инструментов при обработке титана.

Твердосплавные инструменты сталкиваются с быстрым износом инструмента во время обработки титана из-за высоких температур, высокого химического сродства к титану, высоких режущих напряжений и короткой длины контакта стружки с инструментом [101]. Под износом инструмента понимают изменение формы инструмента от его первоначальной формы, в процессе резки, в результате постепенной потери инструментального материала или деформации [102-104]. Как правило, наблюдается как износ по передней, так и по задней поверхности, а также существенное образование нароста. Также часто сообщается о повреждении поверхности и разрушении в результате сколов кромки инструмента. Износ инструмента представляет собой изменение первоначальной формы инструмента в процессе резания, вызванное постепенной утратой материала или деформацией. Относительная скорость скольжения, а также напряжения и температуры, возникающие на поверхности контакта, играют ключевую роль в процессе износа. Эти факторы часто характеризуются скоростью износа, которая измеряется в терминах потери объема на единицу площади в единицу времени. Износ инструмента — это неизбежный процесс, который происходит в ходе всех операций обработки. Износ инструмента различными методами обработки отрицательно влияют на производительность, точность размеров и общее качество изделий. Поэтому одной из ключевых задач является снижение износа инструмента во время обработки.

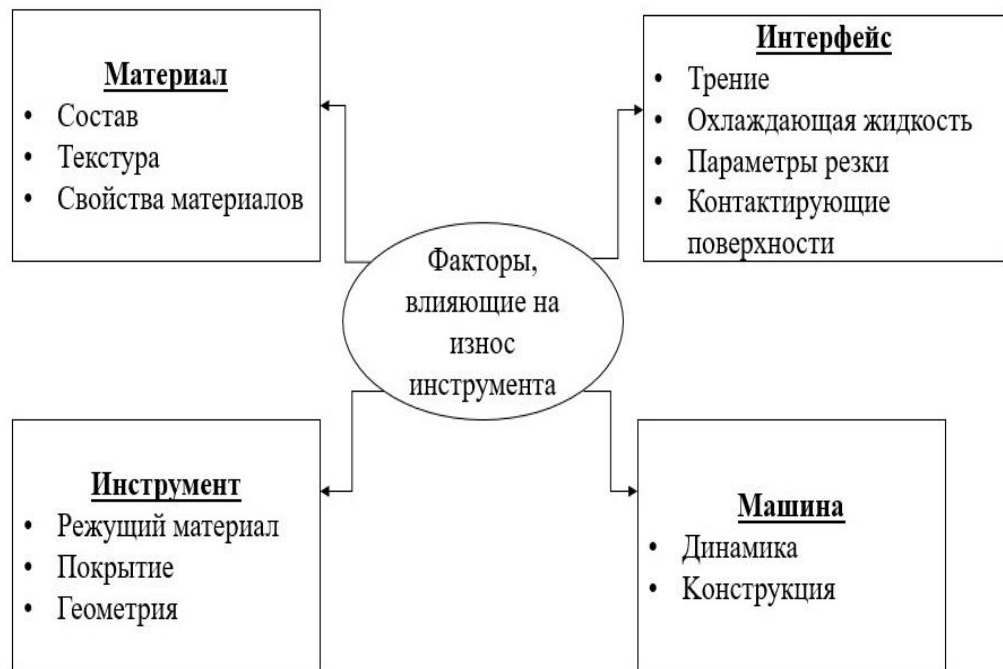


Рисунок 1.6. Четыре фактора, которые оказывают влияние на износ инструмента [101-104].

- Характеристики материала обрабатываемой детали, включая твердость и прочность, способны существенно влиять на rate износа инструмента.

- Параметры резания, такие как скорость, подача и глубина, воздействуют на механическое напряжение и температурные условия в зоне контакта инструмента с деталью.

- Качество и обработка инструмента: свойства самих инструментов, такие как их твердость и степень обработки, также влияют на их износ.

- Смазка и охлаждение: использование смазочных и охлаждающих средств может существенно уменьшить трение и температуру, что в свою очередь снижает износ инструмента.

Лункообразование возникает в результате прилипания и скольжения стружки по поверхности инструмента. Износ приводит к снижению прочности режущей кромки, что увеличивает риск ее поломки. Процессы диффузии, истирания и адгезии часто наблюдаются при износе передней поверхности. Для оценки степени износа чаще всего применяется измерение глубины лунок.

Образование проточкины представляет собой сочетание износа на передней и задней поверхностях, которое возникает в районе точки контакта главной режущей кромки с заготовкой [24,25]. Проточина на внешнем крае поверхности износа может быть вызвана окислением, а также наличием твёрдых или абразивных частиц на поверхности заготовки. Кроме того, это явление может быть следствием деформационного упрочнения уже обработанных участков.

Нарост формируется из материала заготовки, который прилипает к режущей кромке инструмента, изменяя его геометрические характеристики. Такой нарост никогда не достигает полной стабильности. Когда прилипающий материал достигает критического объема, он может обрываться, часто унося с собой часть материала инструмента, что может привести к образованию сколов на его поверхности.

Пластическая деформация режущей кромки возникает под воздействием повышенных температур и напряжений, которые превышают предел текучести материала инструмента. Интенсивное резание, высокая подача и увеличенная скорость обработки способствуют развитию деформационного износа.

Термическая и механическая усталость являются формами износа, возникающими под влиянием циклических нагрузок, которые могут быть как температурными, так и механическими. Резкие изменения температуры, возникающие из-за чередования нагрева и охлаждения поверхности инструмента, особенно проявляются при фрезеровании из-за прерывистой природы процесса резания. Механические колебания нагрузок возникают вследствие слишком высокой скорости подачи. Таким образом, циклические нагрузки способствуют развитию трещин вдоль режущей кромки.

Отделение материала инструмента может происходить из-за прерывистых условий резания и образования наростов. Кроме того, это явление может быть вызвано хрупкостью самого инструмента. В работе с коллегами Yen [105] были выделены три основных фактора, оказывающих влияние на износ инструмента. Один из них связан с физическими характеристиками материала инструмента, включая его твердость, пластичность, теплопроводность, а также с

микроструктурой заготовки. Они будут существенно влиять на составляющие силы резания. Во-вторых, следует признать важным назначение режимов резания и особенности влияния технологической охлаждающей среды на характер контакта в зоне резания, что непосредственно влияет на коэффициент трения [106].

Наконец, очевиден фактор выбора самого материала инструмента и износостойкого покрытия, а также его конструкция, которая должен быть соответствующим образом выбрана в соответствии с конкретной операцией обработки. Существуют различные механизмы, с помощью которых может происходить износ. Типичные механизмы, ответственные за износ режущего инструмента, кратко описаны ниже.

Абразивный износ имеет место в случае воздействия твердых абразивных частиц, присутствующих в заготовке. Он проявляется, как царапание или забитие поверхности инструмента. Преимущественно страдает задняя поверхность. Такой износ не носит равномерного характера и проявляется в различных местах по всей поверхности инструмента. Объем абразивного износа обычно превышает объем адгезионного износа.

Адгезионный износ - В условиях высокой температуры и контактного давления в зоне резания может возникнуть схватывание инструментального и обрабатываемого материалов. Возникает налип на инструменте, который периодически скалывается, унося с собой фрагменты инструмента. Износу подвергаются, как передняя, так и задняя поверхности резца. В случае обработки сталей этот вид износа не является основным, но высокая шероховатость инструментальной поверхности может увеличить его долю. При обработке никелевых и титановых сплавов часто выходит на передний план и может стать основным.

Диффузионный износ вызывается химическим взаимодействием материалов инструмента и заготовки. При высоких температурах компоненты инструмента диффундируют в материал заготовки или наоборот, что приводит к плавному износу. Связан исключительно с высокой температурой в зоне контакта и увеличивается экспоненциально при ее увеличении.

Окислительный износ связан с окислением поверхности инструмента при высокой температуре. Особенно страдает связующая фаза в случае работы твердым сплавом. Проявляется обычно, как образование на режущей кромке проточкины, которая появляется, как правило, в области, где глубина резания максимальна. Износ твердосплавного инструмента при обработке титана происходит в основном двумя механизмами: диффузионным и абразивным. Диффузионный обычно приводит к гладким изношенным поверхностям, тогда как абразивный приводит к неравномерному износу поверхностей. Оба типа износа преобладают на передней и задней поверхностях инструмента. Тем не менее обнаружили [82-83], что адгезионный износ также играет значительную роль в износе по задней поверхности. Благодаря высокой химической реакционной способности и адгезионным характеристикам титана наблюдается значительный перенос материала от заготовки к инструменту как на задней, так и на передней поверхностях. Этот прилипший материал накапливается, образуя слой, называемый наростом или налипом. Износ происходит в результате того, что прилипшие частицы скалываются вместе с кусками режущей кромки. С увеличением скорости резания процесс становится более интенсивным [107-110]. На рисунке 1.7 показана взаимосвязь между площадью сцепления и скоростью резания для обработки титана для инструмента группы резания K10.

Отмечено, что при обработке Ti-6Al-4V на низких скоростях резания образуется стабильный нарост, который способен уменьшить износ инструмента, тогда как он исчезает при увеличении скорости резания, увеличивая износ инструмента. Однако, по мнению Рабиновича и Ковалева, устойчивость нароста в условиях износа для твердосплавного инструмента очень низкая. Из-за циклического напряжения, приложенного в точке адгезии, образуются микротрещины, в результате чего твердосплавные зерна отделяются от поверхности инструмента.

Таким образом, образование слоя с низкой стабильностью еще больше усугубляет износ инструмента и приводит к сколу режущей кромки. Исследование показало, что износ был более заметен на многофазном твердосплавном

инструменте по сравнению с однокарбидным. Диффузионный износ также был выше в двух карбидных сплавах из-за предпочтительного растворения смешанных карбидов [109]. Более низкий износ одно карбидных сплавов может быть связан с большей ударной вязкостью сплавов WC/Co. Сплавы, которые имели размер зерна $\leq 0,8$ мкм, были наиболее устойчивы к износу.

Как уже отмечалось, из-за низкой теплопроводности титана тепло, выделяемое во время обработки, плохо отводится из зоны резания. Кроме того, благодаря высокой устойчивости титана к деформации процесс получения стружки сопровождается интенсивным выделением тепла, а маленькая зона контакта инструмента с материалом лишь усиливает этот эффект, приводя к дополнительному повышению температуры.

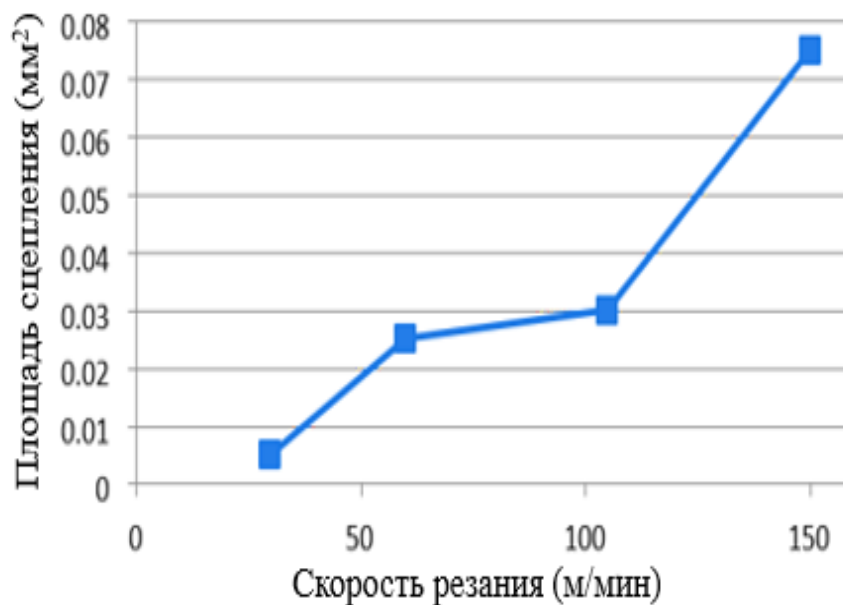


Рисунок 1.7. Соотношение между площадью сцепления и скоростью резания при сухом фрезеровании обработки Ti-6Al-4V при подаче: 0,1 мм/зуб и глубина реза: 0,5 мм с использованием инструмента группы резания K10 [107-110].

Температура в зоне контакта между режущим инструментом и стружкой может достигать примерно 1100°C. При повышенной температуре свыше 500°C титан становится высоко реакционноспособным. Эти условия резки создают оптимальную среду для механизма износа на основе диффузии. Сообщалось, что

этот механизм износа провоцирует износ инструмента по передней поверхности для непокрытого твердого сплава. Другие исследователи [111-113], основываясь на своих наблюдениях, предположили, что износ произошел из-за диффузии инструментального материала в материал заготовки, которая соприкасается по поверхности инструмента, а не в результате механического разрушения фрагментов. Эта диффузия может изменить структуру инструмента, тем самым ослабляя режущую кромку и вызывая возможное механическое удаление фрагментов инструмента движущимися стружками [114-116]. Истирание кобальтового связующего с поверхности инструмента за счет экструзии и диффузионных процессов приводит к выкрашиванию зерен карбидов, ускоряя износ [117-119]. Выявлена миграция атомов титана из заготовки в материал инструмента, приводящая к образованию карбида титана и обезуглероживанию карбидов вольфрама. Этот слой TiC связан как с материалом инструмента, так и с материалом заготовки и является основной причиной схватывания.

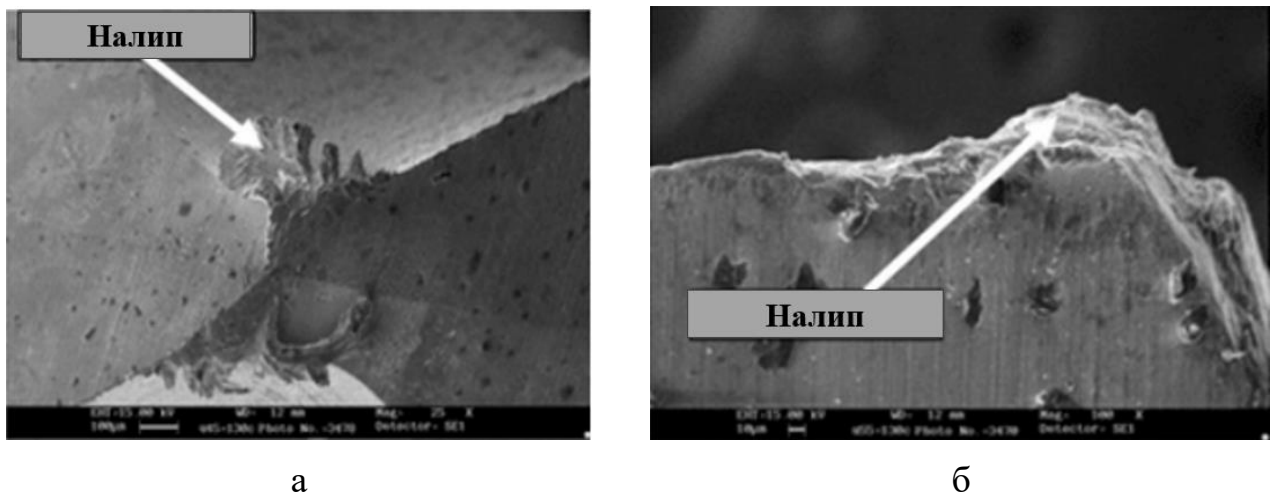


Рисунок 1.8. Сцепление материалов заготовки, наблюдаемое на: (а) кромке долота и (б) режущей кромке после сверления ВТ6 (Ti-6Al-4V) [121].

Сколы кромок инструмента часто наблюдаются во время обработки титана и занимают видное место в процессах фрезерования. Это явление объясняют высокими адгезионными характеристиками титановых сплавов при высоких температурах, а также высокими тепловыми, механическими и циклическими

нагрузками, связанными с обработкой титана [120,121]. При фрезеровании титановых сплавов твердосплавным инструментом скалывание является одним из основных отказов, который связан с прерывистым характером резания и приводит к частым механическим и термическим ударам по режущим кромкам, вследствие чего образуются микротрещины, которые и приводят к микросколам.

Величина амплитуды изменения температуры при тепловых ударах при фрезеровании весьма серьезны из-за ее высокой величины в зоне резания, а также из-за ее высокого градиента вдоль режущей кромки. Более высокие скорости резания и подачи увеличивают нагрузку на зубья и радиальную глубину реза, что приводит к образованию более толстой стружки, генерирующей высокие усилия резания. Эти силы сосредоточены на небольшом участке режущей кромки, оказывая высокие напряжения, вызывающие возможные сколы [122,123]. В [120,121] сообщалось, что пластическая деформация и трещины, образующиеся вследствие теплового удара, определяют механизмы износа твердосплавного инструмента на высоких скоростях. При обработке титана и его сплавов однокарбидным инструментом скорость резания ограничена 60 м/мин из-за пластической деформации. Скорость резания менее 45 м/мин снижает термическое воздействие и вероятность химического взаимодействия инструмента и заготовки.

Сплавы с содержанием кобальта 6 масс. % имеют тенденцию к пластической деформации. Более мелкий размер зерна WC (менее 0,8 мкм) дает большую твердость и тем самым обеспечивает лучшую устойчивость к пластической деформации, но за счет снижения износостойкости к лункообразованию. Сообщалось, что инструменты с отрицательным передним углом обеспечивают лучшую защиту от пластической деформации по сравнению со вставками с положительным передним углом.

Применение износостойких покрытий на твердосплавном инструменте широко распространено, хотя встречается мнение, что лучше всего будет работать полированный инструмент без покрытия. Предполагается, что покрытие должно уменьшить трение между инструментом и заготовкой, снижая температуру резания и силовые характеристики.

Основной проблемой при сверлении титана и его сплавов является быстрый износ режущего инструмента. Допустимые скорости удаления металла невелики, несмотря на низкие силы резания. При сверлении титановых сплавов могут наблюдаться различные виды износа, а именно неравномерный боковой износ, чрезмерные сколы и микротрещины.

Увеличение скорости изнашивания боковых поверхностей может способствовать прилипанию материала заготовки и может привести к износу на истирание и в итоге привести к серьезным сколам. Во время сверления Ti-48Al-2Mn-2Nb обнаружили, что материал заготовки прилипает к режущим кромкам. После анализа SEM изображений пришли к выводу, что прилипший материал был основной причиной отказа инструмента. Вначале налипший материал способен защитить режущие кромки от износа, как показано на рис. 1.8.

На этом рисунке адгезия происходила в основном на режущей кромке, вблизи периферии и на кромке долота. Однако при длительном сверлении прилипший материал становится нестабильным и отрывается от инструмента, унося с собой небольшое количество частиц инструмента. Такая ситуация может привести к серьезным сколам на режущей кромке.

1.5 Покрyтия на твердосплавных инструментах и их применение при обработке титана.

Однако применение покрытий на поверхность твердосплавного инструмента дает возможность существенно модифицировать его физико-химические и механические характеристики в желаемом направлении, также, применяя восстанавливающие покрытия, можно вернуть изделию утраченные в процессе эксплуатации свойства.

При этом, как правило, на поверхность изделия наносится материал, существенно отличающийся по химическому составу от подложки. В большинстве случаев изменяется еще и фазовый состав создаваемой поверхности. Таким образом, становится возможным придать изделиям желаемые эксплуатационные

характеристики, ими могут быть износостойкость, высокое сопротивление различным видам коррозии, жаростойкость и многое другое. Считается, что изменить физико-химические свойства исходной поверхности изделия можно осуществить путем создания внутренних или внешних покрытий, либо возможно использовать их комбинации (рис. 1.9).

При применении внутренних покрытий (модификации исходных поверхностей), в основном сформированных на основе основного материала, размеры изделий остаются неизменными. Некоторые методы обеспечивают сохранение массы изделия на постоянном уровне, в то время как в других случаях прирост массы оказывается настолько незначительным, что его можно не учитывать. Обычно в данном процессе четкая граница между модифицированным поверхностным слоем отсутствует.

Внутренние покрытия рассматриваются как методы, направленные на изменение свойств исходных поверхностей изделий. Для реализации данной задачи используются разнообразные методы энергетического воздействия на обрабатываемые поверхности, включая механический, тепловой, термодиффузионный и проникающий потоки излучения. **Внешние покрытия** представляют собой слои, которые наносятся на изделие с использованием дополнительного (присадочного) материала, в результате чего увеличиваются как размеры, так и масса изделия на величину толщины покрытия. Формирование внешних покрытий может происходить по различным методам, включая твердофазные, жидкофазные, порошковые и атомарные технологии.

При использовании различных технологий нанесения внешних покрытий важнейшим показателем их качества является адгезионная прочность σ_a , которая наиболее точно демонстрирует эксплуатационную надежность покрытий. Таким образом, при создании технологического процесса имеет большое значение учитывать условия, которые способствуют достижению оптимальных значений этой прочности. Несмотря на выбранный способ нанесения, критически важно подбирать материал покрытия с коэффициентом термического расширения КТР, который наилучшим образом соответствует КТР основного материала изделия.

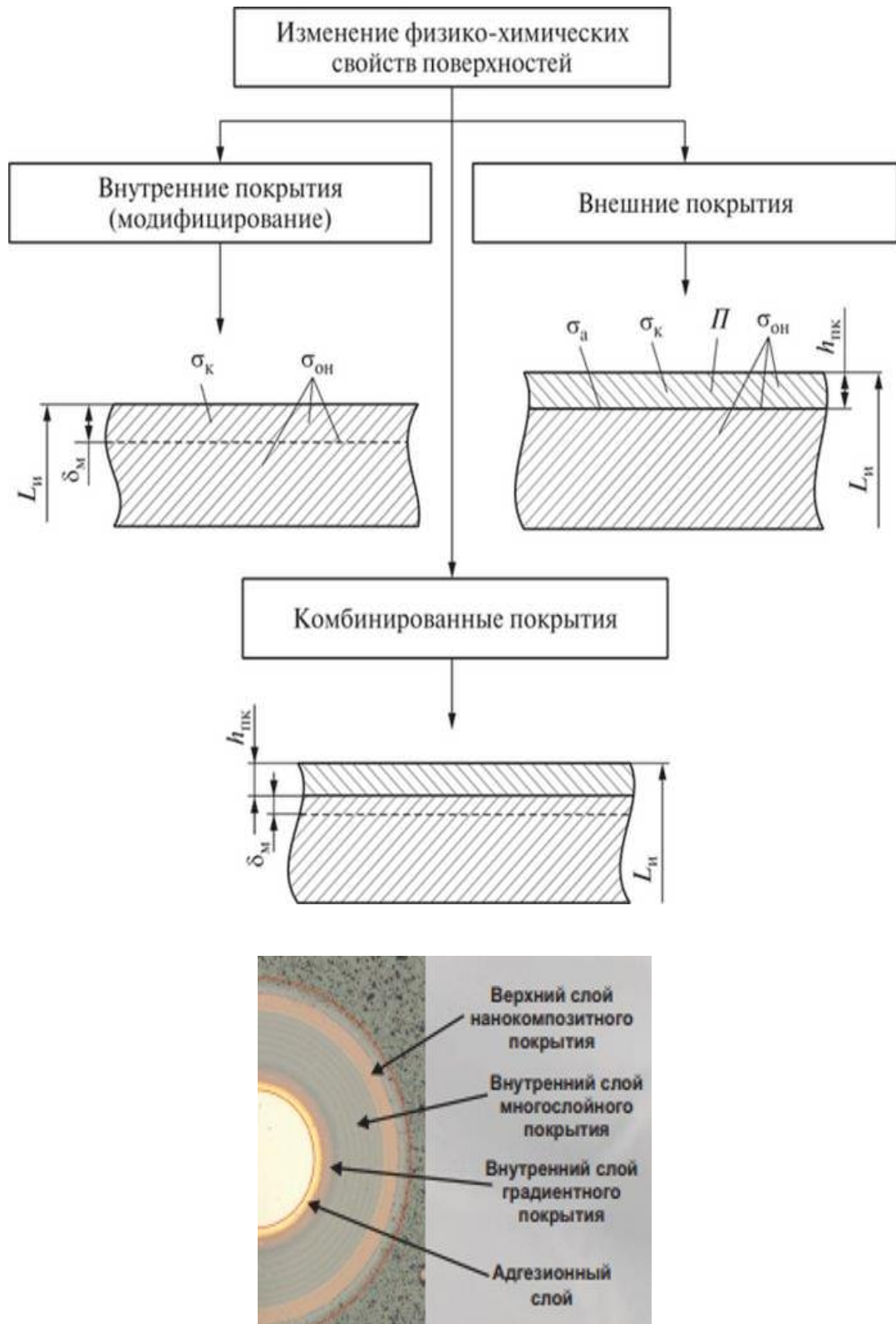


Рисунок 1.9. Формирование покрытий на инструментальном материале.

Это помогает минимизировать вероятность появления хрупких фаз на границе раздела, особенно в форме сплошных пленок, а также способствует

облегчению возникающих напряжений. В процессе создания адгезионного слоя целесообразно применять промежуточные слои из различных материалов, что способствует получению лучших значений адгезионной прочности — силы сцепления.

Твердофазные покрытия образуются благодаря установлению адгезионных взаимодействий между твердым покрывающим материалом и обработанной поверхностью изделий. В качестве твердых материалов обычно используются тонкие заготовки, которые точно соответствуют размерам обрабатываемой поверхности. Требуемый уровень адгезионных связей на интерфейсе создается с помощью различных методов воздействия на покрывающий материал. Когезионная прочность данных покрытий зависит от начальных характеристик самого материала покрытия.

Жидкофазные покрытия создаются с использованием расплавленного материала, который наносят на поверхность. Качество получаемых покрытий во многом зависит от условий, при которых происходит охлаждение этого расплавленного материала. Формирование адгезионных связей на границе соприкосновения осуществляется благодаря способности расплавленного материала смачивать твердую поверхность. Когезионная прочность подобных покрытий определяется процессами кристаллизации расплавленного вещества.

Порошковые покрытия формируются из дисперсного материала через установление межатомных связей, как между самими частицами порошка, так и с поверхностью обрабатываемых объектов. Данные процессы оказывают влияние на степень когезионных и адгезионных связей в образуемом покрытии. Процесс нанесения порошковых покрытий включает первоначальное закрепление порошкового слоя, который впоследствии может быть усилен, либо осуществляется с помощью напыления из потоков разогретых и ускоренных порошковых частиц. Ключевые технологии, применяемые для порошковых покрытий, охватывают газотермические методы напыления, среди которых плазменное напыление, газопламенное напыление, дуговая металлизация и использование газодинамических потоков.

Атомарные покрытия создаются из потоков атомов или молекул в различных условиях, включая растворы, вакуум или газовую фазу.

В реальных условиях также применяются комбинированные покрытия. К примеру, в теплозащитных покрытиях, которые имеют увеличенное количество пор в верхнем слое, жаропрочные свойства достигаются благодаря использованию внутреннего непористого слоя.

Оценка качества нанесенных покрытий в большинстве случаев основывается на нескольких ключевых параметрах, среди которых адгезионная прочность является одним из самых значимых. Также учитываются такие характеристики, как пористость и остаточные напряжения.

В большинстве ситуаций основной целью является достижение максимально возможных показателей адгезионной прочности, однако при создании внутренних покрытий данное понятие теряет свою актуальность. В подобных случаях прочность покрытия рассматривается как когезионная прочность σ_k .

Уровень пористости покрытий определяется числом различных видов несплошностей. Обычно при создании покрытий стремятся добиться минимальной пористости, что способствует повышению адгезионной и когезионной прочности. Наличие дефектов в структуре снижает коррозионную стойкость, жаропрочность и другие эксплуатационные характеристики. В этом плане внутренние покрытия с почти отсутствующей пористостью имеют явные преимущества.

Тем не менее, в некоторых случаях пористость может иметь положительное значение, как это наблюдается в теплозащитных покрытиях. Высокие остаточные напряжения в покрытиях считаются нежелательными, так как они могут существенно снижать адгезионную прочность. Особенно критичны остаточные напряжения, возникающие на границе между слоями. В этом контексте внутренние покрытия представляют собой более предпочтительный вариант, так как у них отсутствует четкая граница раздела.

Особенностью обработки резанием является нагрев вершины инструмента до высокой температуры. Выделяемое при разрушении заготовки тепло распределяется между стружкой, инструментом и собственно заготовкой в

зависимости от их теплопроводности. Основной миссией покрытий на инструменте являлось уменьшение трения в зоне резания, тем самым сводя к минимуму температуру резания. Важно понимать, как покрытия ведут себя с различными комбинациями инструментов и рабочих материалов, а также влияние, которое они оказывают на температуру резания.

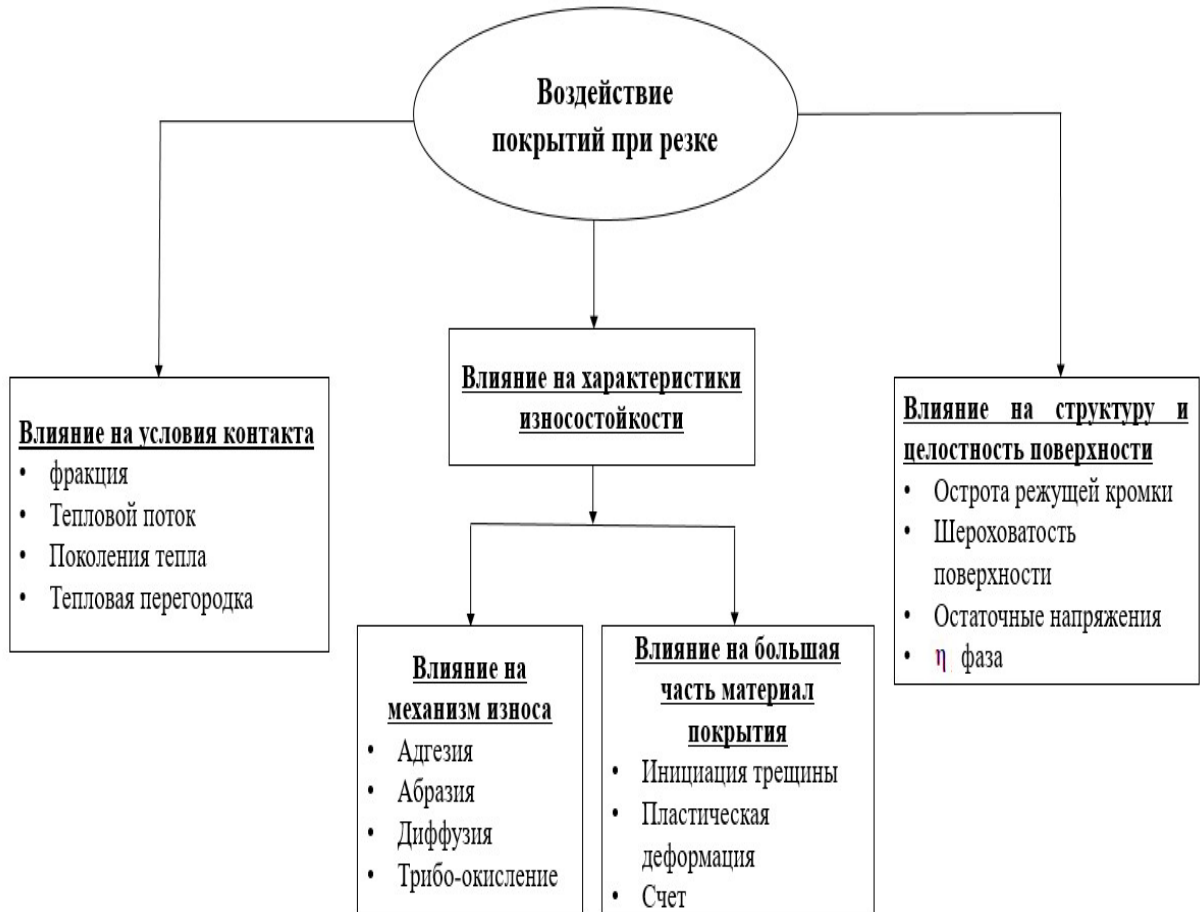


Рисунок 1.10. Воздействие покрытия во время резания [35,36].

Рисунок 1.10 иллюстрирует влияние, которое покрытия могут оказывать при резании. Поэтому покрытия проектируются таким образом, чтобы они могли выдержать экстремальные условия обработки, обеспечить износостойкость, и служить либо тепловым барьером, либо наоборот, отводить лишнее тепло, обладая хорошей теплопроводностью. На границе раздела между покрытием и подложкой расположены три слоя. Первым наносится адгезионный слой, представляющий собой интерфейс между подложкой и покрытием. Здесь важна химическая и

физическая совместимость, например, тепловой коэффициент расширения имеет первостепенное значение в этом слое. Второй слой покрытия определяет его износостойкость в большинстве случаев к абразивному истиранию. В этом случае свойства покрытия будут определяться не только химическим составом покрытия, но и его микроструктурой. Третий верхний будет определять, как покрытие будет взаимодействовать с заготовкой или окружающей средой.

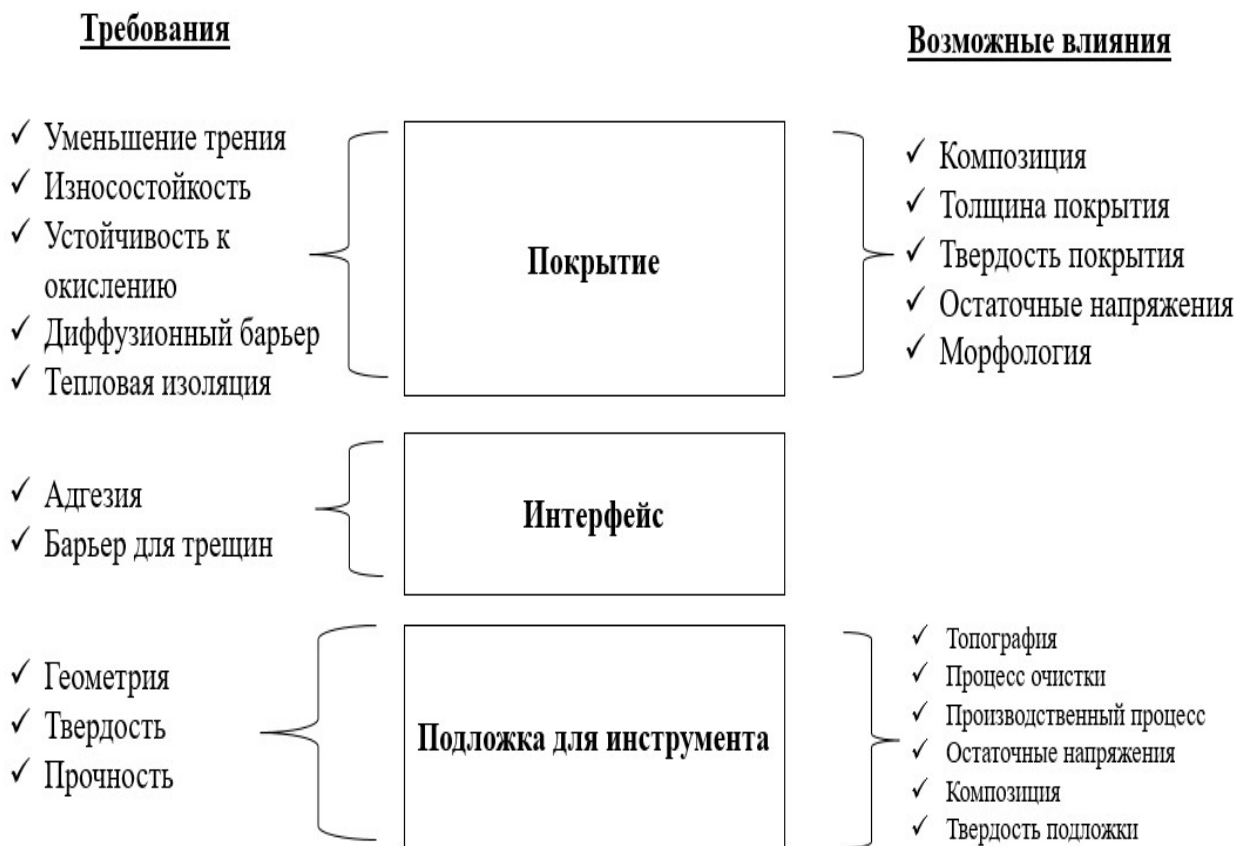


Рисунок 1.11. Влияние и требования к подложке и покрытию [124-127].

На изображении 1.11 продемонстрированы воздействия и необходимые характеристики для покрытия и основы. Методы нанесения покрытий для режущих инструментов можно классифицировать на физическое осаждение из паровой фазы (PVD) и химическое осаждение из паровой фазы (CVD). PVD, или физическое осаждение паров, представляет собой вакуумный процесс, в ходе которого материал, необходимый для покрытия, из "мишени" выделяется путем испарения или распыления и осаждается на обрабатываемой поверхности.

Образование покрытия происходит через конденсацию паров материала мишени на изделиях, размещенных на оснастке с определённым смещением потенциала. Использование рабочих газов, таких как кислород, азот или углеводороды, позволяет обеспечить химические реакции между ними и металлическими парами [4-6]. Для обеспечения равномерного нанесения покрытия инструменты постоянно вращаются в камере покрытия.

В методе CVD готовые газообразные химические соединения вводят в камеру, где они диссоциируют, а затем реагируют с соответствующим образом подготовленными и нагретыми плазмой тлеющего разряда субстратами. Варьирование составом газовой среды и температурой осаждения обеспечивает формирование однородных покрытий с тонкой структурой зерна.

В высокоскоростной токарной обработке предпочтение отдается инструментам с CVD-покрытием, в первую очередь из-за соображений экономической целесообразности. Процесс может протекать при таких высоких температурах, что это может негативно сказаться на структуре твердого сплава, приводя к охрупчиванию основания. Поэтому такая технология менее распространена в фрезерных инструментах. PVD-покрытия предлагают для процессов полустойкой и финишной обработки.

Инструменты с PVD-покрытием обладают высокой внутренней твердостью и благоприятными сжимающими напряжениями, что позволяет им противостоять инициации трещин. PVD-покрытия также могут быть удалены, что значительно упрощает повторную заточку инструментов и тем самым снижает долгосрочные производственные затраты [128-137]. Все инструменты с покрытием, используемые в настоящем исследовании, покрыты PVD. Одна из версий классификации PVD покрытий приведена ниже. **Многокомпонентные покрытия** имеют бинарные, троичные, четвертичные или множественные компоненты в своих структурах покрытия. Наиболее часто встречаются экономически успешные покрытия на основе TiN и TiC. Одновременное нанесение дополнительных компонентов способно улучшить характеристики таких покрытий. Например, достаточно часто добавляют алюминий. Для повышения износостойкости также

добавляют Cr, Nb, Zr, Hf, V, Mo, W, Si и т. д. **Многослойные покрытия** представляют собой комбинацию покрытий с различными функциональными слоями. Внешние слои таких покрытий обычно обеспечивают устойчивость к налипанию обрабатываемого материала, а также обеспечивают износостойкость. Внутренние слои обеспечивают адгезию покрытия к подложке, останавливают растрескивание, выравнивают напряжение, поддерживают нагрузку и останавливают диффузию. Известным многослойным покрытием является TiC/Al₂O₃/TiN. Слой TiC имеет аналогичный тепловой коэффициент расширения с твердым сплавом. Низкая теплопроводность слоя Al₂O₃ играет роль теплового барьера и защищает нижележащие слои от перегрева, а слой TiN обеспечивает хорошую износостойкость.

Минимальная толщина слоя, достижимая с помощью этого метода, составляет пару десятков нм. Необходимо отметить, что в каждом из слоев можно наблюдать свою зеренную структуру. Если же зерно прорастает через слои покрытия, то эффект многослойности пропадает. К преимуществам таких покрытий относятся повышенная стойкость к распространению трещин за счет значительного увеличения пути их развития, а также повышенной твердости и прочности в результате уменьшения размера зерна в каждом из слоев.

Дисперсионные/многофазные покрытия производятся путем осаждения двух разных материалов, которые не образуют однородной структуры. Такие материалы очень различны по химическому составу и имеют разнородные кристаллические решетки. Наличие второй фазы ослабляет образование столбчатых зерен, делая эти покрытия плотными и мелкозернистыми. В зависимости от конкретных случаев дисперсионные покрытия демонстрируют улучшенную ударную вязкость, твердость и трибологические свойства.

Наноструктурированные покрытия имеют, как правило, несколько слоев. Покрытие также включает дисперсионные частицы и структурные модуляции в нанометровой шкале, образовавшиеся в результате спинодального распада в материале покрытия. Наиболее известные покрытия такого рода, такие как AlTiN/Si₃N₄, демонстрируют высокую твердость и износостойкость и

демонстрируют выдающиеся характеристики инструмента в условиях высокоскоростного сухого резания. **Антифрикционные покрытия** содержат смазывающие соединения в своей структуре и способны улучшать трибологические свойства износостойких покрытий. В этом случае Смазочные составы встраиваются непосредственно в покрытие. Примерами могут служить $TiN-MoS_2$ и $TiAlN-MoS_2$, обеспечивающие низкий коэффициент трения. Другой подход заключается в обеспечении самосмазывания путем генерации смазывающих трибопленок в поверхностных слоях поверхности покрытия в ответ на условия резания.

Трибопленки образуются на границе раздела или изношенной поверхности во время трения. Они представляют собой динамические структуры различного химического состава [138-141]. Оказывают достаточно высокое влияние на фрикционные характеристики трущейся пары и износостойкость инструментов. Трибопленки на режущем инструменте образуются из-за химического превращения поверхностного слоя покрытия на инструменте вследствие взаимодействия с окружающей средой или переноса материала с заготовки или стружки, прилипшей к поверхности инструмента с дальнейшим трибоокислением. Трибопленки обеспечивают теплобарьерные (защитные) и смазывающие функции [142-145]. Хотя большинство трибопленок благоприятно уменьшают трение во время резания, некоторые трибопленки, такие как TiO , являются нежелательными. Поэтому следует учитывать трибологическую совместимость инструмента и заготовки в зависимости от условий обработки.

Производительность и эффективность таких покрытий в существенной степени зависит от стадии приработки, поскольку трибологическая совместимость между режущим инструментом и заготовкой достигается не для каждого режима резания. Поэтому важно избегать возникновения критических повреждений поверхности во время начального этапа использования, когда трибосистема находится в процессе самоорганизации.

Это способность образовывать стабильные соединения на поверхности покрытия на этапе естественного износа обеспечивает устойчивость к

интенсивным повреждением поверхности. Также соединения, образующиеся в процессе, должны сокращать склеивание, чтобы обеспечить продолжительную устойчивость к износу.

Почти 80% инструментов, применяемых в промышленности для механической обработки, имеют покрытие. Нанесение покрытий существенно улучшает производительность режущего инструмента. Благодаря своей твердости, такие покрытия гарантируют повышенную устойчивость к износам. Эти материалы обладают выдающимися высокотемпературными характеристиками, включая значительную твердость при нагреве, усиленную защиту от окислительного износа и устойчивость к диффузионным воздействиям. Из-за своих отличных смазывающих свойств они способны снижать трение между поверхностями уплотнения или между инструментом и заготовкой, что ведет к сокращению температуры резания. Кроме того, они уменьшают силы резания в процессе обработки по сравнению с инструментами, не имеющими покрытия. При обработке аэромоторных сплавов возможно добиться значительно более высоких скоростей резания с использованием инструментов с покрытием [146-148]. Для разработки оптимальных покрытий для твердосплавных инструментов при обработке титана было проведено значительное количество исследований. Тем не менее, из-за сложности процесса обработки титана, данная область все еще нуждается в дальнейшем исследовании и внимании.

Несмотря на высокую эффективность твердосплавных инструментов с покрытием при обработке чугуна, стали и многих суперсплавов, для обработки титана им еще предстоит достичь таких же высоких показателей эффективности. Часто бывает, что инструменты с покрытием проявляют более низкую производительность. Исследования, проведенные различными учеными [149,150], показывают, что в некоторых случаях такие покрытия, как TiN, TiC, TiCN, TiN-TiC, TiN-Ti (CN)-TiC, Al₂O₃/TiC, Al₂O₃, HfN и TiB₂, могут привести к увеличению износа инструмента, по сравнению с непокрытыми поверхностями. Согласно их утверждениям, в большинстве случаев механизм износа связан с отслоением фрагментов покрытия. Однако при использовании менее высоких скоростей

подачи, таких как 0,16 мм/об, наблюдался диффузионный износ, характеризующийся постепенным износом, как на передней, так и на задней поверхности инструмента. Все инструменты с покрытием изнашивались быстрее по сравнению с инструментами WC-Co без покрытия. Они также протестировали твердосплавные вставки с покрытием TiB_2 во время обработки чистого коммерческого титана и обнаружили, что он более износостойкий по сравнению с другими покрытиями. В [151-155] сообщалось о улучшенном сроке службы инструментов с покрытием (AlSiTi)N и TiCN по сравнению с непокрытыми инструментами при механической обработке отожженного и рулонного TA48 в диапазоне 50–130 м/мин в условиях применения охлаждающей жидкости MQL. Этот факт объясняется химическими реакциями, происходящими между покрытием инструмента и материалом заготовки. Авторы утверждали, что многослойная архитектура нанокристаллической структуры в дополнение к лучшим адгезионным свойствам и превосходной стойкости к истиранию (AlSiTi)N объясняет его лучшую производительность по сравнению с инструментами с покрытием TiCN.

В работе Jawaid et al. [154] рассматривается анализ износа и эффективность применения твердосплавных инструментов с PVD-покрытием TiN и CVD-покрытием TiCN+Al₂O₃ при торцевом фрезеровании в различных условиях. Ученые выявили, что в большинстве случаев вставки с покрытием CVD демонстрируют лучшие результаты по сравнению с вставками PVD, что связано с большей толщиной покрытия, улучшенной устойчивости к износу и лучшей адгезии покрытия к основе у инструментов с CVD-покрытием. Однако, при увеличении скорости резания, инструмент быстро изнашивается, что приводит к обламыванию режущего края. При увеличении скорости резания оба инструмента также подвержены пластическим деформациям, особенно заметным. Наблюдали [156-159], что инструменты с PVD-покрытием превосходят мелкозернистые твердосплавные вставки без покрытия. Обнаружено, что инструменты с однослойным покрытием PVD TiN обеспечивают более высокий износ по задней поверхности по сравнению с инструментом при использовании многослойного

покрытия PVD TiN / TiCN / TiN наблюдается эффективность при низких скоростях подачи (0,13 мм/об), в то время как при более высоких скоростях подачи (0,25 мм/об) поведение становится диаметрально противоположным в токарных процессах.

В работе [159] была проведена оценка срока эксплуатации твердосплавных инструментов без покрытия и твердосплавных инструментов с покрытием CVD (TiC/TiN/Ti(C/N)) при фрезеровании сплава Ti6242S с использованием радиусных фрез. Утверждалось, что инструменты с покрытиями лучше работают при большей глубине резания при сочетании с высокой скоростью и скоростью подачи. При менее суровых условиях резания инструменты без покрытия демонстрируют лучшие результаты по сравнению с покрытыми инструментами.

Согласно полученным данным, твердосплавные инструменты с покрытием TiB₂ рекомендованы для обработки Ti-6Al-4V при скоростях резки ниже 100 м/мин. Исследования также показали, что вставки из PCD обеспечивают большую эффективность по сравнению с CBN и покрытыми инструментами, а инструменты CBN более пригодны для финишной обработки.

Сравнили [160] производительность непокрытых вставок и с однослойным покрытием TiAlN, однослойным CBN и многослойным CBN + TiAlN. Моделирование методом конечных элементов (МКЭ) было проведено для изучения развития износа инструмента и сил резания. Обнаружено, что покрытие TiAlN немного превосходит непокрытые инструменты WC/Co с точки зрения сил резания и скорости износа инструмента.

Твердость покрытия была в два раза выше, чем у инструментальной подложки. Инструмент с композитным покрытием продемонстрировал уровень износа, сходный с тем, который наблюдается у доступных на рынке покрытых инструментов TiAlN, и при этом показал примерно в два раза большую эффективность по сравнению с инструментами без покрытия. Это связали с образованием прочного, стабильного адгезионного слоя на интерфейсе инструмент-стружка, сводящего к минимуму диффузионный износ. Утверждается, что производительность инструментов с покрытием, содержащим бор, выше по

сравнению с инструментами с покрытиями, такими как TiAlN, TiN, TiC, Al₂O₃ и HfN, и сопоставима с инструментами CBN и PCD.

1.6 Выводы по главе 1

1. Основное влияние на обрабатываемость титановых сплавов оказывают диффузионные процессы износа, которые происходят из-за высокой температуры резания, вызванной низкой теплопроводностью этого металла.
2. Далеко не всегда обрабатываемость титановых сплавов можно улучшить за счет нанесения износостойких покрытий, однако современные разработки в этой области позволяют добиваться обнадеживающих результатов за счет применения многослойных.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Влияние способа получения заготовки на свойства титанового сплава.

Для оценки влияния структуры титанового сплава на его обрабатываемость были изучены заготовки из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученные традиционным способом послековки, а также спечённые из порошка методом селективного электронно-лучевого плавления по аддитивной технологии. В таблицах 2.1 и 2.2 приведены данные о физико-механических свойствах и химическом составе сплавов.

2.2 Свойства сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученного по традиционной технологии.

Титановый сплав ВТ6, разработанный Хансеном в начале промышленного использования титана, оказался настолько успешным благодаря своему сочетанию характеристик, что на него по-прежнему приходится более 50% всего производства полуфабрикатов из титана и его сплавов. Сплавы, подобные ВТ6, применяются как в отожженном, так и в термически упрочненном состоянии. Процесс отжига прутков, поковок и штамповок обычно осуществляется при температуре в диапазоне 750-900°C. Механические характеристики сплава ВТ6 существенно зависят от типа и параметров его структуры. Титановый сплав ВТ6, также известный как Ti-6Al-4V, состоит из 90% титана, 6% алюминия и 4% ванадия. В процессе исследования были проанализированы заготовки с химическим составом, указанным в таблице 2.1.

Сплав ВТ6 демонстрирует исключительную прочность и надежность в условиях коррозии, что делает его идеальным материалом для использования в аэрокосмической и медицинской отраслях. Благодаря своей непревзойденной

прочности и устойчивости к коррозии, сплав ВТ6 широко применяется при изготовлении авиационных и космических компонентов, медицинских имплантатов, а также в оборудовании, предназначенном для морских условий и других промышленных целей, где требуется высокая надежность и устойчивость к коррозии.

Таблица 2.1.

Химический состав заготовки Ti-6Al-4V (ВТ6)

Вес%	Ti	C	Fe	N	Al	O	Другой
Ti-6Al-4V	БАЛ	0,08	0.03	0,05	5.5-6.75	0,20	0,40

Кроме того, этот сплав обладает высокой термостойкостью, что делает его оптимальным выбором для использования в условиях повышенной температуры, например, в авиации и аэрокосмической промышленности.

Физико-механические свойства заготовки Ti-6Al-4V при комнатной температуре представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Физико-механические свойства заготовки Ti-6Al-4V при комнатной температуре

Плотность	4,43 г/см ³
Разрывное усилие	895 МПа
Предел пластичности	828 МПа
Удлинение материала до разрыва, %	10 %
Теплопроводность	7,3 Вт/мК
Удельная теплоемкость	580 Дж/кгК
Модуль упругости, натяжения	110 ГПа
Твердость, по Роквеллу С	37

Увеличение температуры может незначительно повысить предел прочности сплавов, однако при этом их пластичность снижается. Это является общей особенностью многих металлических сплавов, у которых изменения температуры могут влиять на их прочностные характеристики. Титановый сплав Ti-6Al-4V,

который также известен как ВТ6, был использован в качестве заготовки (рис. 2.1).

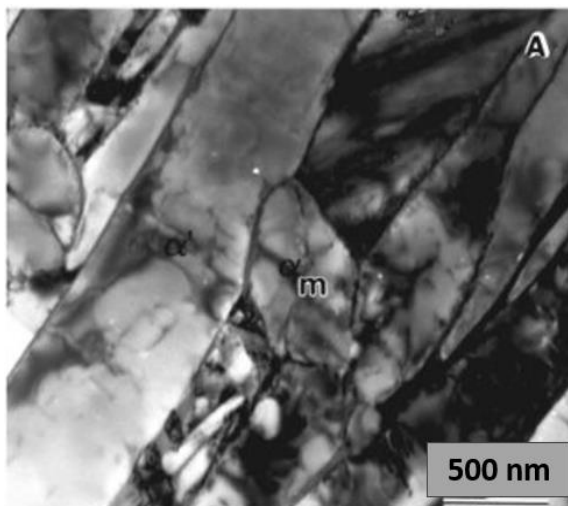


Рисунок 2.1. Микроструктура заготовки Ti-6Al-4V (ВТ6), полученной ковкой.

Полученные результаты исследования титанового сплава ВТ6 при различных температурахковки и последующем точении образцов представляют важные аспекты для процессов металлообработки. Низкая стойкость инструмента при точении образцов послековки при 1010 °С, при высоких значениях температуры и составляющих сил металлообработки в зоне резания, указывает на слабую обрабатываемость поверхности из сплава ВТ6 при данной температуре.

С другой стороны, повышение стойкости при точении образцов, откованных при 950 и 1180°С, при снижении температуры в зоне резания, указывает на лучшую обрабатываемость сплава ВТ6 в этих случаях. Также замечено, что содержание β -фазы в состаренных образцах в пределах от 5 до 17 % имеет тенденцию повышения стойкости, несмотря на отсутствие существенных изменений. Эти результаты представляют важные аспекты для оптимизации процессов металлообработки и выбора оптимальных режимов тепловой обработки для достижения требуемых свойств и стабильных характеристик при обработке данного материала.

2.3 Свойства сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученных по технологии селективного электронно-лучевого плавления.

Изучение фазового состава порошка сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) показало, что он состоит из мартенситной α' -фазы. Получение исходного порошкового материала

происходит в результате высокоскоростного затвердевания капель расплава в потоке инертного газа, что означает, что кристаллизация проходит в условиях, далеких от равновесия (с коэффициентом охлаждения порядка 106 К/с). Это обстоятельство влияет на степень завершенности фазовых превращений.

Порошок, полученный методом плазменной атомизации, содержит больше мелких частиц по сравнению с порошком, полученным через газовую атомизацию.

Проведен анализ влияния аддитивного изготовления металлических деталей из титановых сплавов на их микроструктуру. Обнаружено, что процессы лазерного и электронно-лучевого плавления значительно изменяют микроструктуру сплава Ti-6Al-4V по сравнению с литыми или коваными материалами. Процессы 3D-печати вызывают значительные фазовые превращения, оказывающие существенное влияние на механические свойства конечных деталей, включая их обрабатываемость. С точки зрения макроскопических свойств, детали, полученные аддитивными технологиями, обладают преимуществами высокой прочности и твердости, но также имеют недостатки, такие как низкая пластичность, часто неудовлетворительные усталостные характеристики и анизотропия, связанная с направлением роста детали. Важной для анализа механических свойств является микроструктура деталей. Однако существует разногласие в мнениях относительно влияния ориентации печати на механические характеристики.

Некоторые авторы утверждают, что детали, печатаемые вертикально, обладают более высокой прочностью и лучшей пластичностью, чем горизонтально напечатанные [161], в то время как другие авторы приходят к противоположным выводам [162]. Эта закономерность может быть обусловлена формой и распределением пор, вызывающих появление концентраторов напряжений, и направленностью микроструктуры, зависящей от способа и режимов печати. Как следствие, направление и ориентация печати могут существенно влиять на механические свойства и обрабатываемость деталей из титановых сплавов, произведенных аддитивными технологиями.

Подробное описание процесса получения экспериментальных заготовок из сплава Ti-6Al-4V позволяет лучше понять влияние различных параметров на

микроструктуру и свойства полученных образцов.

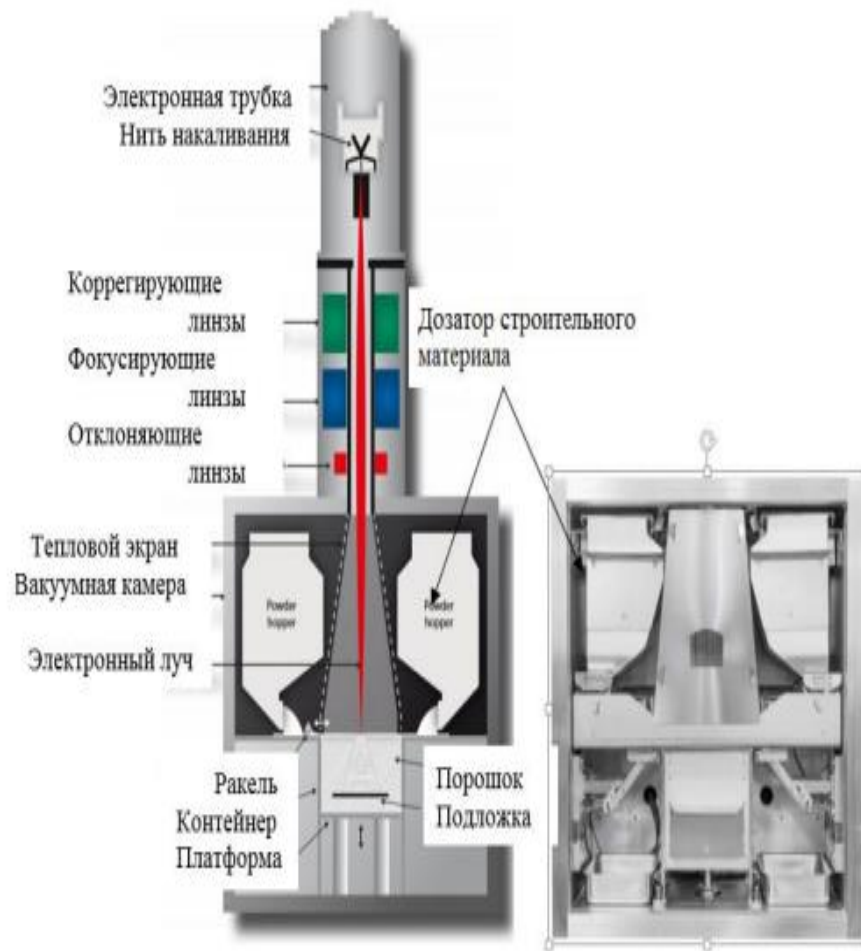


Рисунок 2.2. Процесс работы в устройствах Arcam. (Источник: www.arcam.com)

Компания Arcam является одной из немногих организаций, применяющих EBM-технология в своих системах. Основной принцип метода электронно лучевого сплавления (Electron Beam Melting) состоит в следующем: электроны, испускаемые нитью накала, разогретой до 2500°C , ускоряются до 50% скорости света после прохождения через анод. Поток электронов концентрируется с использованием магнитного поля, в то время как управление отклонением этого потока происходит с помощью другого магнитного поля. При взаимодействии электронов с порошковой смесью их кинетическая энергия превращается в теплоту, что в свою очередь способствует сплавлению металлического порошка. Мощность настраивается путём изменения количества электронов.



Рисунок 2.3. Машина Arcam. (Источник: www.arcam.com)

В результате этого EBM-технология демонстрирует худшие результаты по уровню чистоты поверхности и точности по сравнению с лазерными методами SLM. Однако имеются множество ситуаций, когда, независимо от выбранного способа производства — будь то литье или аддитивные технологии — изделие требует дополнительной финишной обработки на цифровых станках, и в этих случаях уровень чистоты поверхности не является решающим фактором. Качество внутренней структуры металла также имеет большое значение. Высокая производительность оборудования EBM, которая составляет от 55 до 80 см³/ч (в то время как лазерные машины схожих размеров работают с производительностью всего 2–20 см³/ч), обеспечивает Arcam лидерство в области серийного изготовления медицинских изделий, таких как титановые имплантаты и протезы. На текущий момент компания Arcam установила свыше 120 систем в десяти странах по всему миру.

Практически все упомянутые машины могут работать как в своей базовой конфигурации, так и с опциональными дополнениями, используя наиболее

распространенные на промышленном рынке металлопорошковые композиции.

К материалам, применяемым в данном контексте, относятся инструментальные стали (в частности, H13), мартенситно-старяющиеся сплавы (например, 18% Ni Maraging 300), алюминиевые сплавы (например, AlSi10Mg и AlSi12) и чистый титан и его сплавы (например, Ti6Al4V и высокочистый Ti6Al4V ELI), а также кобальтово-хромовые сплавы и жаропрочные стали (такие как Inconel и другие).

Использование установки Arcam A2 с селективным электронно-лучевым плавлением и предварительным нагревом платформы из нержавеющей стали до 750°C представляет собой важный этап в процессе. Применение электронного луча со скоростью движения 1200 мм/с и толщиной наносимого порошка 50 мкм оказывает влияние на полученные характеристики заготовки.

Твердость заготовки, равная 318 НВ, а также микроструктура объекта, включающая преимущественно α -фазу и незначительное включение β -фазы (2–3 %) с измеренной толщиной пластин альфа-фазы, подтверждают важность контроля процесса формирования материала (рис. 2.4).

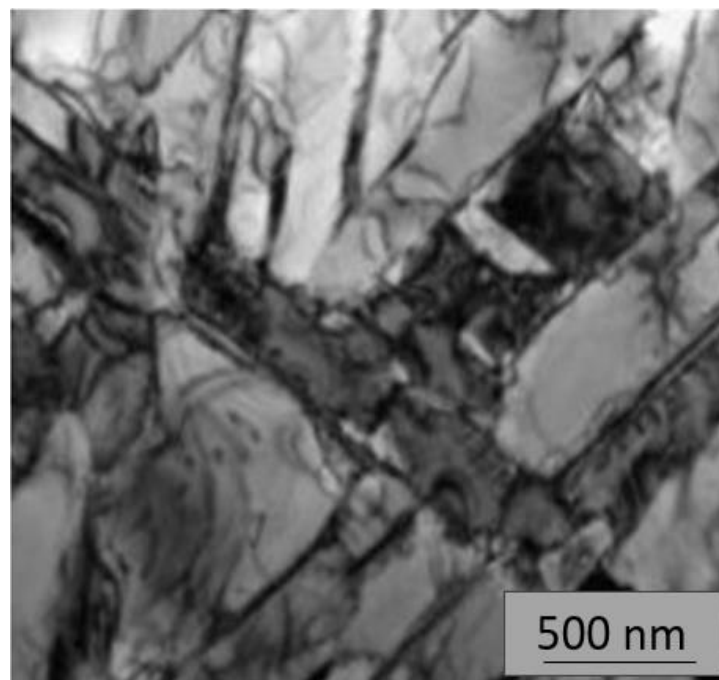


Рисунок 2.4. Заготовка из Ti-6Al-4V (VT6), полученная путем электронно-лучевого плавления, обладает специфической микроструктурой.

Анализ таких параметров, как скорость сканирования и мощность луча, необходим для оптимизации процесса и минимизации дефектов, таких как поры, в структуре получаемых образцов. Такое исследование повышает понимание условий формирования и свойств материала, а также может послужить основой для улучшения процессов промышленного производства и разработки новых материалов.

Исследование образцов на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610L методом дифракции обратно отраженных электронов с последующей реконструкцией зерен первичной β -фазы позволило выявить крупные вытянутые зерна, простирающиеся на несколько сотен микрометров вдоль направления теплоотвода. Текстурные исследования выявили отсутствие заметной текстуры в глубине заготовки, а также выявили аксиальную текстуру в зоне, прилегающей к необработанной ростовой поверхности. Эта текстура проявляется в усилении интенсивностей отражений от базовых плоскостей α -фазы (рис. 2.5).

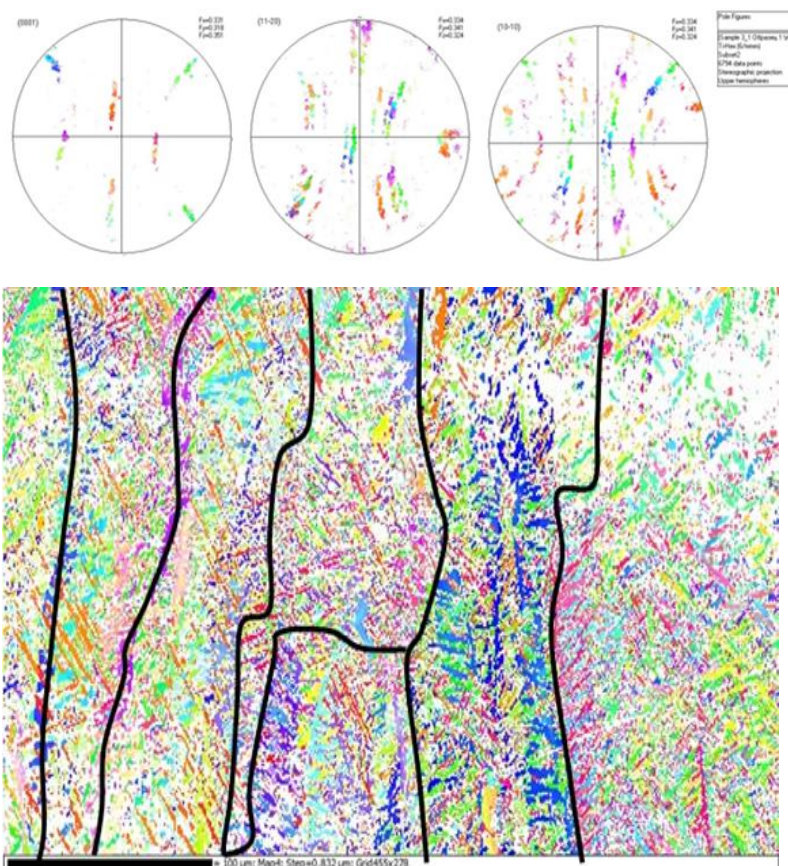


Рисунок 2.5. Прямая полюсная фигура и структура заготовки, полученной электронно-лучевым плавлением.

Интересный результат, полученный путем изучения реконструированных зерен первичной β -фазы и текстурных особенностей в области роста образца, подчеркивает значение контроля процесса формирования структуры и свойств материала. Эти данные могут послужить основой для дальнейшего исследования и проведения оптимизации производственных процессов и создания новых методик и материалов.

Анализ обрабатываемости деталей, изготовленных с помощью аддитивных методов, проводился в сравнении с коваными заготовками, прошедшей неполный отжиг при температуре 680°C в течение часа с воздушным охлаждением. Твердость материала измеряли при 275 НВ. Структура кованой заготовки состояла из вытянутых в направлении деформации частиц α -фазы и смешанной глобулярно-пластинчатой структуры β -преобразованной матрицы. Форма α -частиц была близка к равноосной, а их размер составлял примерно 5 мкм.

Это сравнение дает ценную информацию о производительности и характеристиках материалов, произведенных с помощью аддитивных технологий и традиционных процессовковки. Полученные результаты могут способствовать лучшему пониманию свойств и потенциального применения материалов, производимых различными методами производства.

2.4 Свойства и структура заготовки VT18У.

Сплав VT18У принадлежит к системе Ti-Al-Zr-Mo-Nb-Si и представляет собой высокопрочный псевдо α -сплав, обладающий высокой устойчивостью к ползучести и высокой прочностью при температурах $550 - 600^{\circ}\text{C}$, что делает его одним из самых термостойких титановых сплавов (рисунок 2.6).

Для достижения оптимального сочетания свойств сплава рекомендуется провести отжиг при температурном диапазоне $900 - 950^{\circ}\text{C}$ с выдержкой от 1 до 4 часов, затем следует охлаждение на воздухе.

Дополнительная обработка сплава, получившая название "двойной отжиг", включает нагрев до температур в диапазоне $900 - 980^{\circ}\text{C}$ на протяжении 1–4 часов,

после чего следует выдержка при 550 – 680°C в течение 2–8 часов. Данный процесс способствует достижению прочности сплава на разрыв в 770 МПа при 600°C, вместо стандартных 670 МПа.

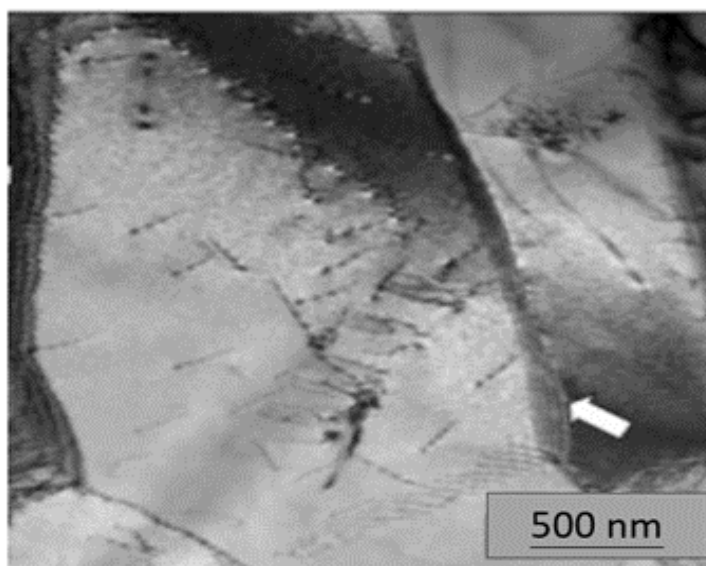


Рисунок 2.6. Микроструктура заготовки BT18У, полученной ковкой.

В результате проведенного исследования было установлено, что в процессе старения сплава происходит образование силицидных частиц типа $(\text{Ti, Zr})_5\text{Si}_3$ (S_1), которые в процессе обработки обогащаются атомами циркония и превращаются в силициды $(\text{Ti, Zr})_6\text{Si}_3$ (S_2) и $(\text{Zr, Ti})_2\text{Si}$ (S_3). Исходя из данных исследований, был определен оптимальный двухэтапный режим термической обработки дисков. Это исследование помогло определить оптимальные условия применения сплава и его термической обработки.

Таблица 2.3.

Состав сплава BT18У.

Кремний	Алюминий	Молибден	Олово	Ниобий	Цирконий	Титан
0.2	7.1	0.7	2.5	1.1	4.0	основание

В качестве заготовок для обработки использовались пластины из высокопрочного титанового сплава BT18У толщиной 15 мм. Химический состав сплава приведен в таблице 2.3.

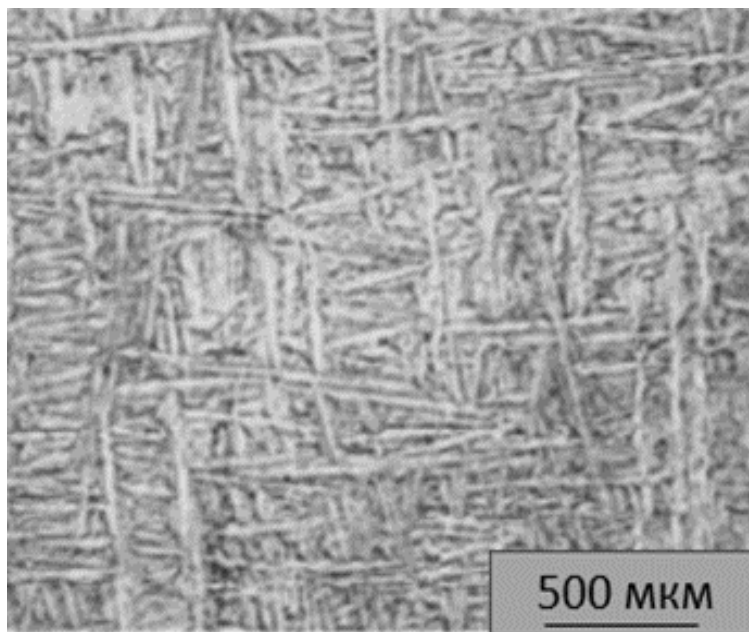


Рисунок 2.7. Микроструктура сплава VT18У.

Отжиг заготовки при температуре 900°C в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе привел к однородному пространственному распределению α -пластин в структуре сплава, которые были разделены тонкими прослойками β -фазы. Полученная структура представлена на рисунке 2.7.

2.5 Используемое металлорежущее оборудование.

На рисунке 2.8 представлен станок Knuth WF 2.1/3.1/4.1 оснащенный цифровым индикатором и предназначенный для инструментального производства. Они обеспечивают широкий диапазон применения и комплектуются серьгой для горизонтального фрезерования в стандартной комплектации.

Станок WF 4.1 оснащен вертикальной фрезерной головкой с диапазоном поворота +/- 90° и калиброванной шкалой для облегчения установки рабочего угла. Он оснащен большой пинолью с рабочим ходом 80 мм и механическим зажимом. Использовать горизонтально-фрезерное устройство можно после быстрого демонтажа вертикально-фрезерной головки через поворотное устройство, перемещения верхней балки и установки кронштейна.



Рисунок 2.8. Фрезерная машина Knuth вертикальная.

Станок может быть переконфигурирован за короткий промежуток времени и оснащен автоматической подачей и ускоренным ходом по всем трем осям. Включение и выключение подач по осям X и Z осуществляется с помощью одного и того же рычага. Поперечная подача по оси Y контролируется отдельным рычагом, расположенным на консоли. Дополнительно перемещение по осям может осуществляться в механическом режиме с помощью маховичков, оснащенных измерительными шкалами.

Станок комплектуется различными аксессуарами, включая систему цифрового считывания, 4 фрезерные оправки диаметром 16, 22, 27 и 32 мм, переходные втулки МК 1, МК 2, МК 3, цанговый патрон с цангами (\varnothing 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 мм), дышло, гасители вибрации, система СОЖ, поддон для стружки, горизонтальная фрезерная опора, освещение рабочего места, руководство по эксплуатации, инструменты для обслуживания.



Рисунок 2.9. Аппаратура динамометра Kistler (Заготовки из сплава, установленные на чувствительную платформу динамометра).

В процессе фрезерования был задействован вертикально-фрезерный станок WF-1, снабженный динамометром от Kistler (Швейцария) и работающий на программном обеспечении DinoWare (рис. 2.9). Моделирование процесса концевго фрезерования осуществлялось при помощи экспериментальной металлообрабатывающей пластины. Для моделирования процесса концевго фрезерования использовалась экспериментальная металлообрабатывающая пластина.

2.6 Метрологическое оборудование для измерения износа и оценки качества обработанной поверхности.

Когда проводились исследования всех используемых инструментальных покрытий для определения эффективных покрытий обработки титана было проведено исследование срока службы инструмента, чтобы определить эталонный

инструмент. Затем срок службы инструмента для всех остальных покрытий исследовались и сравнивались с эталонным инструментом.

Таблица 2.4.

Технические характеристики сканера MicroCad

Рабочая поверхность	1,6 × 1,2 мм
Разрешение по оси X	2,4 мкм
Разрешение по оси Z	0,2 мкм
Разрешающая способность	0,8 мм
Время измерения	4 с

Исследования срока службы инструмента при фрезеровании проводились только с выбранными покрытиями после того, как они продемонстрировали улучшение срока службы инструмента при сверлении.

Во время испытаний радиус округления режущей кромки контролировался с помощью прибора MikroCAD premium+ от GFM (Германия), технические характеристики которой представлены в таблице 2.4. (рис. 2.10 а).



а)



б)

Рисунок 2.10. Микроскопы, используемые для исследования износа инструмента (а) MikroCAD premium+ (б) AxioCam MRc5.

Во время испытаний данные собирались после каждого прохода для всех инструментов. Затем были созданы изображения граней задней и передней поверхностей режущей вставки с помощью многоцелевой системы микроскопа (AxioCam MRc5) (рис. 2.10 б), чтобы визуально отслеживать прогрессирующий износ инструмента. Микроскоп MRc5 объединяет особенности стереомикроскопа и составного микроскопа с высоким увеличением. Программное обеспечение NIS-Elements Microscope Imaging Software использовалось для записи изображений. 3D-изображения инструментов получались с помощью цифрового микроскопа.

Координатно-измерительная машина GLOBAL (Италия) с разрешением 1.7 мкм и прибор для измерения параметров шероховатости и профиля HommelTester T8000 (США) использовались для измерения характеристик полученных отверстий, таких как диаметр, нецилиндричность и шероховатость. Таким образом, применяемое метрологическое оборудование способно обеспечить точность измерений до 1 мкм, что позволяет сделать выводы о влиянии типа покрытия на параметры качества металлообработки.

2.7 Выводы по главе 2

1. Использование технологии селективного лазерного плавления электронным лучом вызывает улучшение свойств титановых сплавов, например, широко используемого ВТ6.
2. Для обеспечения достоверности научных положений и выводов использованы современные аттестованные приборы с точностью до 0.001 мм, позволяющие отследить изменения в качестве обработки для оценки факторов инструмента.

ГЛАВА 3. СРАВНЕНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННЫХ КОВКОЙ И МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВЛЕНИЯ, ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ БЫСТРОРЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Внедрение современных аддитивных технологий, таких как селективное лазерное или электронно-лучевое плавление, для производства изделий из титановых сплавов, таких как Ti-6Al-4V (ВТ6), вызвало значительный интерес в промышленных кругах. Тем не менее, этот подход также выявил значительные недостатки в производстве. Даже при использовании передовых систем таких технологий изготовленные детали имеют проблемы с качеством поверхности, волнистой текстурой материала из-за перемычек, а также ступенчатость, связанную с процессом плавления порошка. Фактически, продукты аддитивного процесса изначально имеют шероховатую поверхность с параметром $R_z = 10\text{--}30$ мкм, что часто требует последующей обработки, такой как чистовая обработка резанием или альтернативные методы, включая ультразвуковую обработку.

Также наблюдается значительное влияние процесса изготовления заготовок из титанового сплава на их обрабатываемость. Исследования свидетельствуют о том, что обработка материала, произведенного с применением аддитивных технологий, имеет отличия от традиционных методов изготовления металлических деталей как по механическим характеристикам, так и по степени шероховатости поверхности. Присутствие пористости в материале, полученном из порошка, неизбежно оказывает влияние на эти процессы.

Благодаря этим результатам, дальнейшие исследования и разработки технологий могут привести к улучшению процесса изготовления и обработки изделий из титановых сплавов с использованием аддитивных методов.

Приложение комбинированной ионно-плазменной обработки, особенно с использованием различных методов ионного азотирования, вносит значительный вклад в улучшение стойкости быстрорежущих инструментов. Однако,

существующие проблемы, связанные с термостабильностью нитридов железа, которые могут образовываться во время процесса ионного азотирования, действительно требуют ограничения температуры при нанесении износостойкого покрытия для предотвращения термохимической диссоциации.

Исследования и разработки в этой области могут привести к оптимизации процессов комбинированной ионно-плазменной обработки, обеспечивая более стабильное формирование покрытий и повышение эффективности инструментов. Учитывая высокое значение этого процесса для промышленности, дальнейшие разработки в области улучшения термической стабильности, а также других свойств покрытий, будут иметь значительное влияние на качество инструментов и их долговечность.

Для повышения термостабильности поверхностного слоя инструмента, примыкающего к покрытию, можно использовать дополнительное насыщение поверхности быстрорежущей стали.

Процесс заключается в надежном интегрировании синтезированных нитридных соединений между металлами IV–V групп и азотом в поверхностный слой инструмента из быстрорежущей стали во время предварительной химико-термической обработки. Металл может быть нанесен в виде покрытия с использованием метода магнетронного распыления, после чего поверхность изделия подвергается импульсному нагреву для инициации экзотермической химической реакции. В этом процессе могут быть использованы химически активные вещества при высокой температуре в качестве реагентов [163-167].

Коэффициент трения Амонтона (μ) играет важную роль в оценке физических воздействий на контактной поверхности передней части режущего инструмента, оказывая влияние на процесс обработки материалов. Значение этого коэффициента зависит как от материала, который находится в контакте, так и от режима взаимодействия, определяющего температурное поле, возникающее в тонком приповерхностном слое. Полученные результаты эксперимента, в котором было сравнено значение коэффициента трения (μ) между коваными заготовками из сплава Ti-6Al-4V (BT6) и материалом, созданным методом электронно-лучевого

плавления, представляют собой показатели этого коэффициента. Они рассчитывались на основе анализа мгновенных силовых показателей, зарегистрированных в процессе резания с использованием экспериментальных фрезерных пластин из среднелегированной быстрорежущей стали Р6М5 в стандартном состоянии и с защитным износостойким покрытием и измененной легировкой поверхности.

3.1 Свойства и покрытия режущего инструмента.

Действительно, формирование новых структур в титановых сплавах с использованием аддитивных технологий может значительно изменить их физико-механические свойства, влияя на их обрабатываемость резанием.



а)



б)

Рисунок 3.1. а) Заготовки из сплава Ti-6Al-4V, установленные на чувствительную платформу динамометра, б) режущая пластина Р6М5 и специальная державка.

Моделирование процесса концевое фрезерования осуществлялось при помощи экспериментальной металлообрабатывающей пластины. Для моделирования процесса концевое фрезерования использовалась экспериментальная металлообрабатывающая пластина (Рис. 3.1 а и б).

Сравнение обрабатываемости при концевом фрезеровании инструментов с комбинированной поверхностной обработкой, титанового сплава, полученного традиционным методом деформирования и методов аддитивных технологий, является важной задачей для определения эффективности новых методов производства и их влияния на обработку материалов.

Таблица 3.1.

Для данного эксперимента были установлены следующие параметры резания:

скорость резания (n)	подача (S_o)	ширина фрезерования (B)	глубина фрезерования (t)
100 об/мин ($v = 16$ м/мин)	10 об/мин	5 мм	0.5 мм

Эти параметры были выбраны с целью достижения определенных характеристик обработки и имитации процесса чистовой обработки изделия.

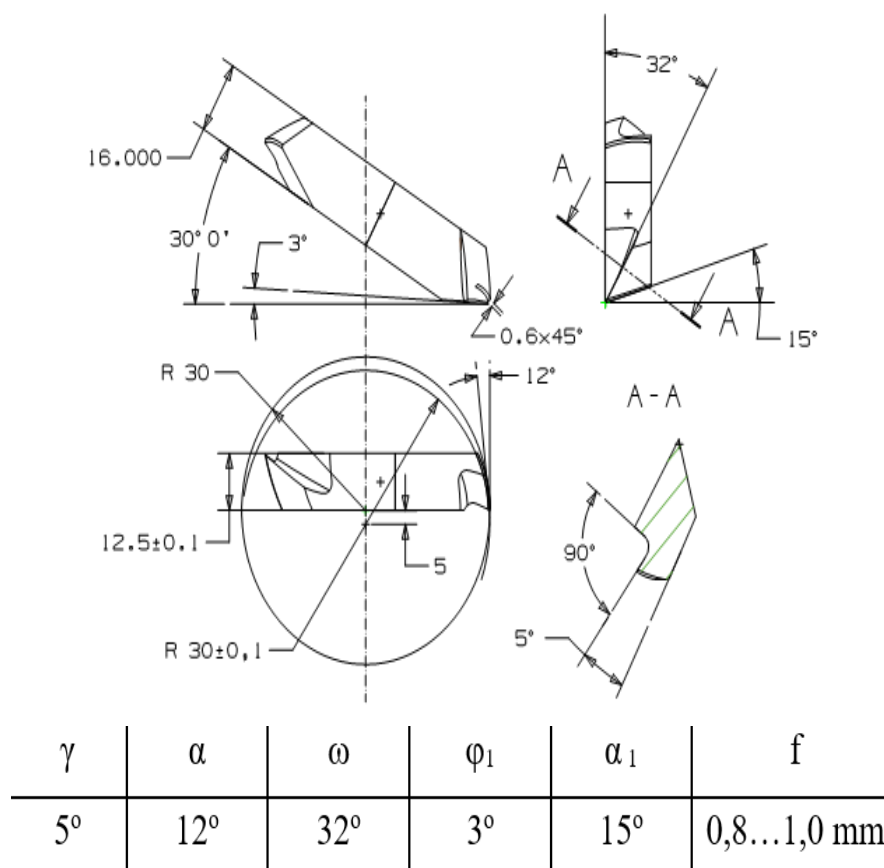


Рисунок 3.2. Лабораторные фрезы из быстрорежущей стали.

Схема встречного фрезерования (на рисунке 3.2) является техникой обработки материалов, которая включает использование нескольких фрез и движение их в противоположных направлениях, что обеспечивает более стабильное удаление материала и улучшает общее качество обработки. Был установлен режим резания с использованием экспериментальных пластин Р6М5 для имитации чистовой обработки изделия, полученного методом электронно-лучевого плавления.

3.1.1 Добавление малых количеств азота к предварительно обработанной быстрорежущей стали.

На рисунке 3.3 показана, установка используется для нанесения нанопленок различных материалов на поверхность изделия и последующего жидкофазного перемешивания пленки с подложкой с помощью интенсивного импульсного электронного пучка.



Рисунок. 3.3. Компоненты и работа системы управления РИТМ-СП (импульсно-электронного пучка).

Этот процесс приводит к образованию поверхностных сплавов толщиной от долей до десятков микрон. Этот процесс имеет широкий спектр применений в области напыления и создания поверхностных покрытий на различных материалах. Для анализа процесса азотирования инструмента перед нанесением износостойкого покрытия применялась методика двухступенчатого вакуумно-дугового разряда. В результате обработки при температуре 480°C в течение 30 минут был в результате химико-термической обработки образован азотированный слой толщиной до 30 мкм, имеющий высокую микротвердость до $\text{HV}_{50} = 115 \text{ МПа}$.

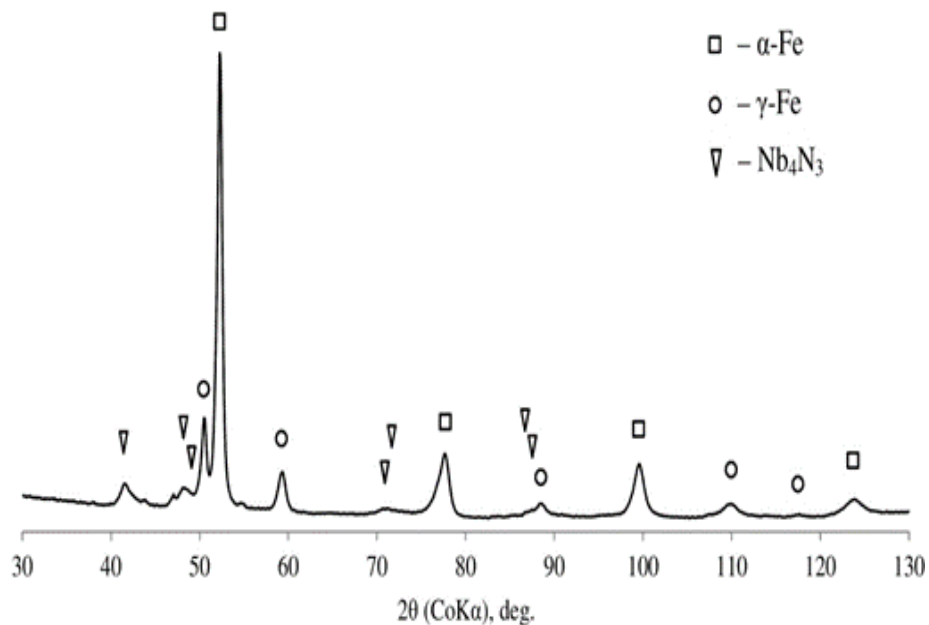
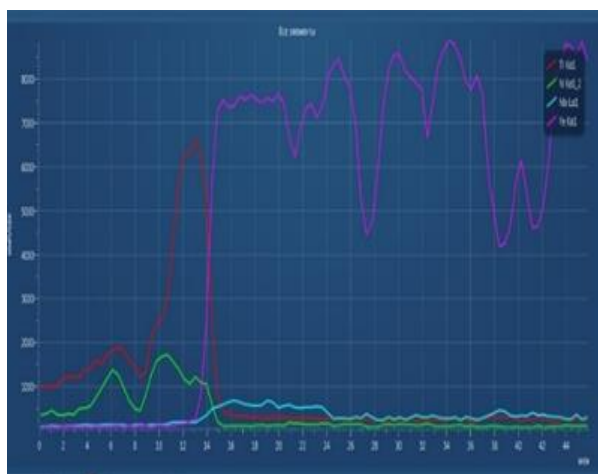


Рисунок. 3.4. Дифракционное изображение (CoK α) от предварительно облученной поверхности образца с покрытием из сплава NbHfTi на поверхности азотированной стали Р6М5 [168].

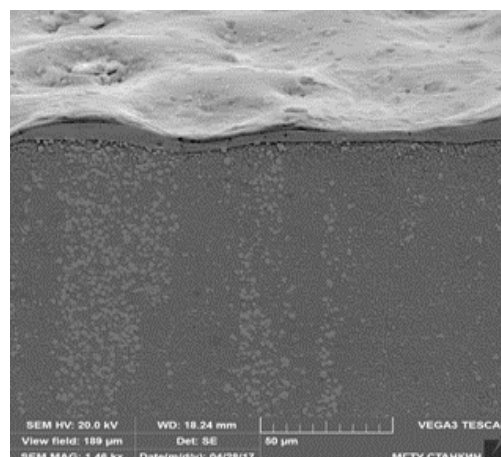
На инструменте сформировался тонкий слой сплава $\text{Nb}_{70}\text{Hf}_{22}\text{Ti}_8$, после чего был проведен его облучение электронным пучком запускает процесс легирования путем реакции пленки с азотом. В результате использования азотированных нитридов железа возникает экзотермическая реакция, способствующая образованию многофазной структуры в материале, что является важным этапом процесса обработки.

В результате быстрой охлаждающей обработки поверхностный слой содержит нанесенные нитридные фазы (рис. 3.4) с высокими температурами

плавления, которые равномерно распределены и остаются мелкими благодаря экстремально быстрой скорости охлаждения.



а)



б)

Рисунок. 3.5. Образец из стали Р6М5 после комбинированной поверхностной обработки показывает: а) распределение химических элементов в приповерхностном слое и б) SEM изображение структуры материала. [169].

Анализ показал, что глубина модифицированного приповерхностного слоя стали может составлять до 10 мкм, что зависит от состава легирующих элементов. Структура инструмента, прошедшего комбинированную обработку поверхности, показана на рисунке (3.5).

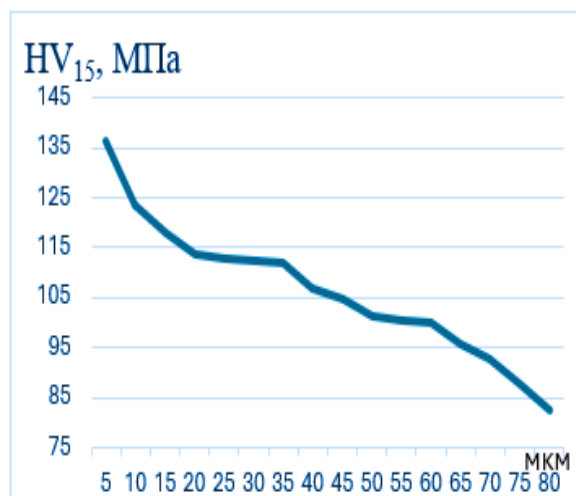


Рисунок. 3.6. Изменение микротвердости по глубине упрочненной зоны на поперечном шлифе с образца после комбинированной обработки.

Измерение микротвердости показывает наличие упрочненной зоны глубиной до 80 мкм (рис. 3.6). На глубине до 50 мкм микротвердость HV_{15} превышает микротвердость основы и составляет около 100 МПа. Повышение микротвердости обусловлено наличием остаточных растягивающих напряжений, формирующихся в результате импульсного нагрева.

3.2 Влияние структуры заготовки на силы резания.

Показаны на рис (3.7) компоненты силы резания, прикладываемой к режущему слою зуба концевой фрезы при встречном фрезеровании. Реакция сил резания разлагается на составляющие P_z , P_y и P_x в направлении по касательной к окружности фрезы, в направлении по нормали к оси фрезы и вдоль оси фрезы соответственно.

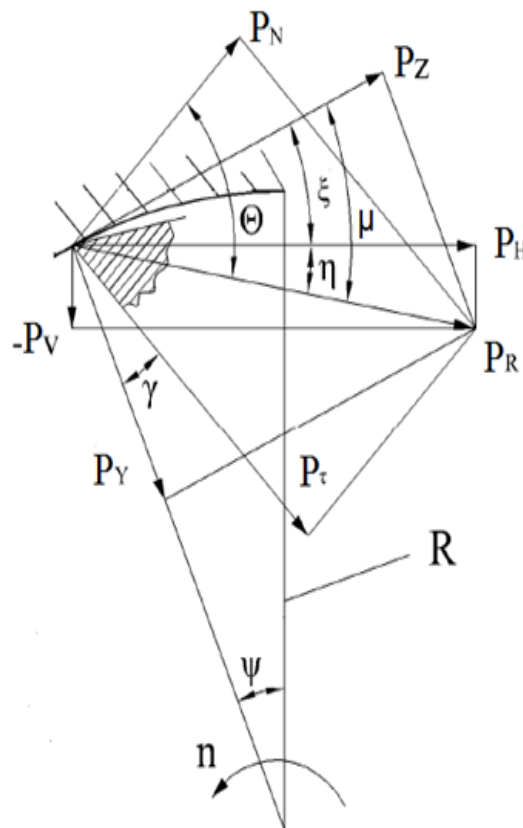


Рисунок 3.7. Силы, действующие на зуб концевой фрезы в модели встречного фрезерования.

Основная составляющая, P_z , создает крутящий момент, преодолевающий сопротивление. Радиальная сила P_y и компонента P_z вызывают изгиб и скручивание режущего инструмента, тогда как осевая сила P_x перемещает деталь вдоль оси фрезы. Также, равнодействующую силу (P_{yz}) можно разложить на силу отжима (P_v), направленную перпендикулярно скорости подачи V_s , и силу P_h , действующую в направлении V_s . (1)

Значения составляющих сил резания при фрезеровании могут быть измерены различными способами. Тензометрические динамометры с тремя компонентами могут применяться для измерения P_v , P_h и P_x ; остальные компоненты, например, P_y и P_z , могут быть вычислены на основе этих параметров с помощью следующих уравнений [170]:

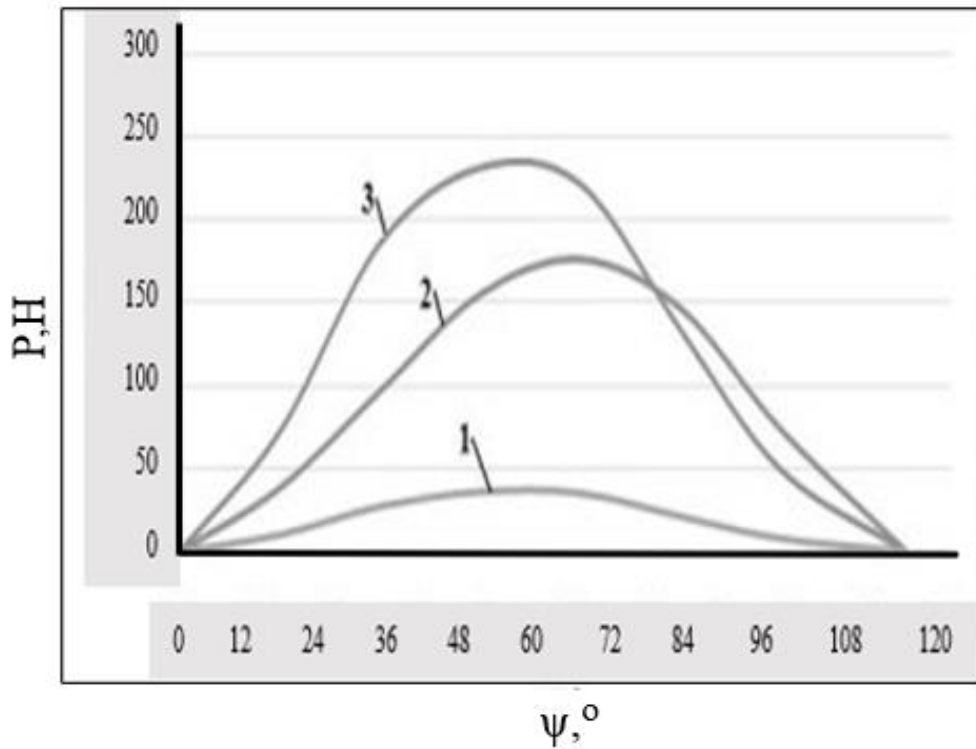
$$\left. \begin{aligned} P_z &= \sqrt{P_v^2 + P_h^2} \cdot \cos\left(\xi \pm \arctg \frac{P_v}{P_h}\right); \\ P_y &= \sqrt{P_v^2 + P_h^2} \cdot \sin\left(\xi \pm \arctg \frac{P_v}{P_h}\right); \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Угол ξ - определяет угол вращения точки прикрепления результирующего вектора R_{vh} . Он непосредственно связан с углом поворота зуба фрезы ψ в данный момент.

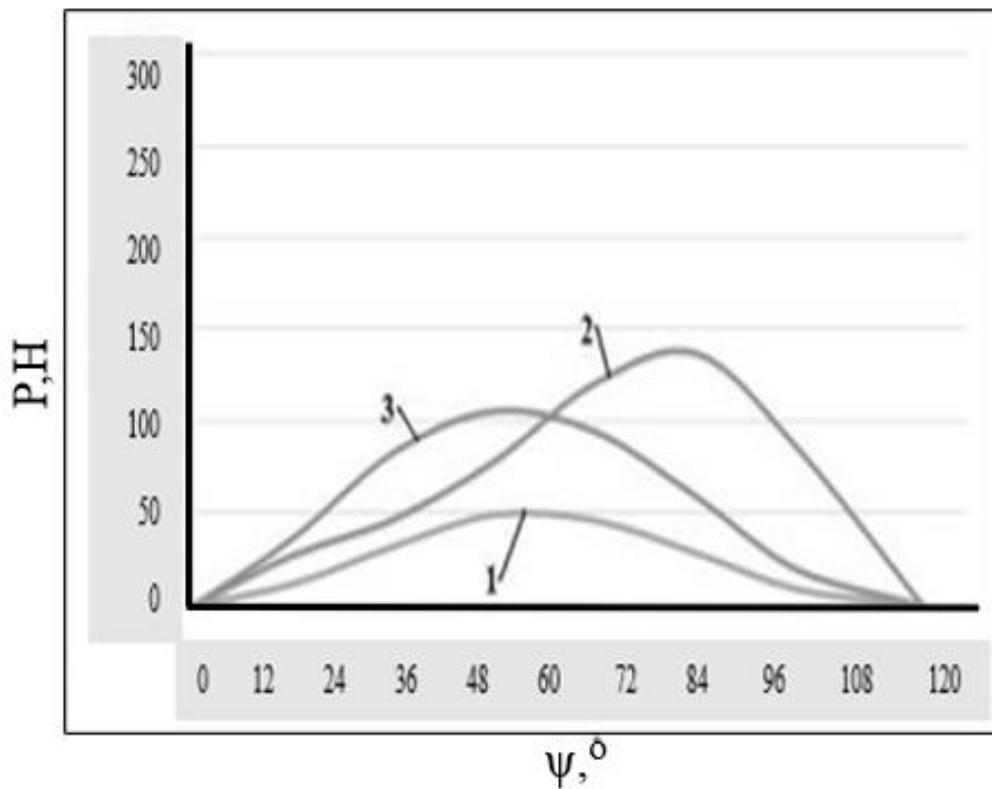
Сила P_y значительно увеличивается из-за износа и нарастания инструмента, поэтому ее максимальные значения и средние показатели служат для оценки состояния фрезы. Хотя измеренные сигналы силы могут варьироваться по амплитуде, они часто демонстрируют высокую степень схожести в своей форме. Наиболее точным способом для сопоставления сигналов является среднее арифметическое, рассчитанное по данным, полученным за несколько оборотов фрезы.

На рисунке 3.8 представлены расчетные мгновенные усилия сдвига P_z и P_y во время торцевого фрезерования, выполненного с использованием экспериментальной вставки из быстрорежущей стали. Графики 3.8а и 3.8в иллюстрируют расчетные значения мгновенных сил P_z и P_y в процессе концевое фрезерования пластины, изготовленной из быстрорежущей стали. Сравнение этих значений позволит выяснить, каким образом структура титанового сплава

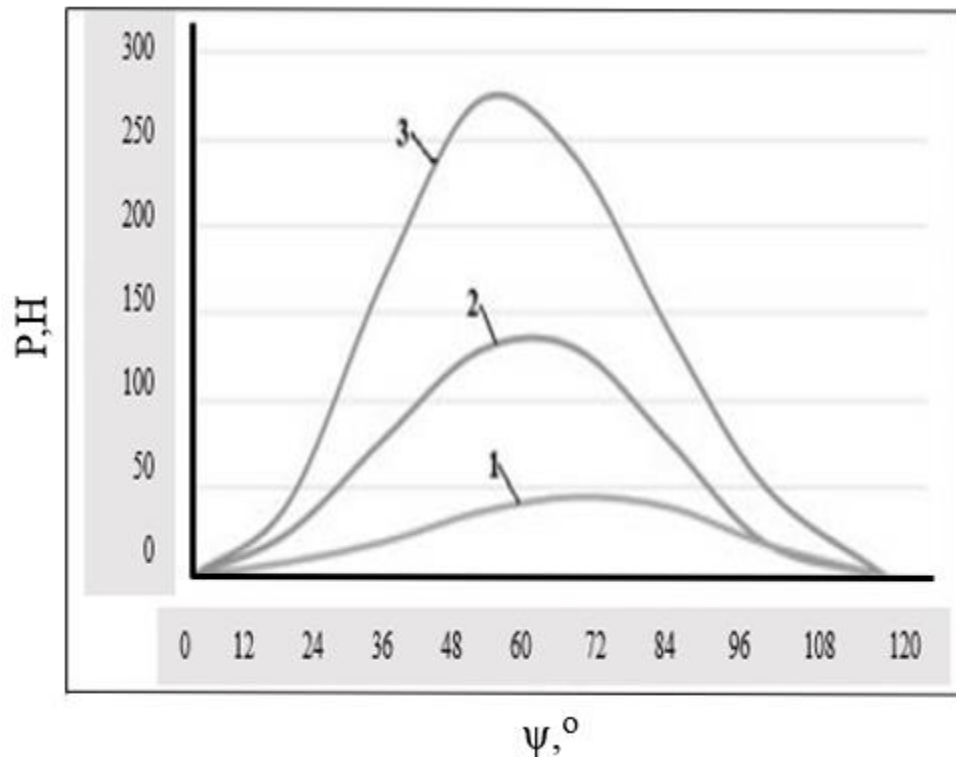
воздействует на компоненты сил резания. Обработывая заготовку, созданную методом электронно-лучевого плавления, можно отметить, что сила резания P_z увеличивается ориентировочно на 15%, в то время как сила P_y сокращается на 20%.



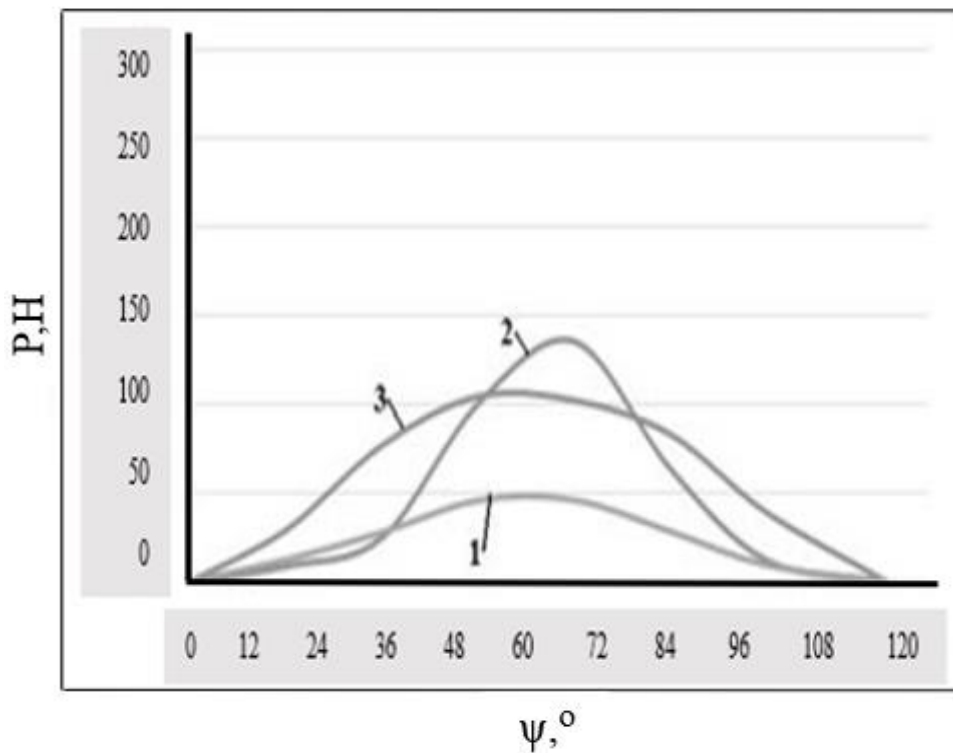
(a)



(б)



(B)



(Г)

Рисунок 3.8. Данные о мгновенных силах резания (1- P_x , 2- P_y , 3- P_z) при концевом фрезеровании сплава Ti-6Al-4V представлены в зависимости от угла поворота зуба фрезы:

а) обработка кованой заготовки инструментом без покрытия, б) обработка электронно-лучевое плавление заготовки инструментом без покрытия, в) обработка кованой заготовки инструментом с комбинированной поверхностной обработкой, г) обработка электронно-лучевое плавление заготовки инструментом с комбинированной поверхностной обработкой.

Анализируя эффективность упрочненного слоя на силу резания при обработке различных типов материалов, можно заметить, что использование инструмента с упрочненным слоем дает возможность снизить силу резания P_z в два раза при обработке кованных заготовок (рис. 3.8а, 3.8б). В случае фрезерования сплава, полученного методом электронно-лучевого плавления, наблюдается еще более значительное снижение, достигающее 2,5 раза (рис. 3.8в, 3.8г).

Стоит отметить, что, согласно исследованиям (рис. 3.8б и 3.8г), применение инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали с упрочненным слоем, значительно выравнивает силовые составляющие резания для обеих заготовок. Факторы взаимодействия сил и трения между стружкой и передней поверхностью инструмента критически важны для оценки силовых характеристик остро заточенного инструмента в процессе обработки заготовок из титанового сплава Ti-6Al-4V.

При обработке материалов изучаются условия трения с использованием среднего коэффициента трения μ , который определяется как соотношение касательной силы P_t к нормальной силе P_n , действующей на переднюю поверхность инструмента, согласно закону Амонтона. Значение коэффициента μ было получено на основании экспериментальных данных, касающихся силовых параметров фрезерования титанового сплава.

Тангенциальная сила P_t устанавливается в соответствии с данной формулой

$$P_t = P_y \cos \gamma \quad (3.2)$$

Визуализация на рисунке 3.9 (а) иллюстрирует, что касательная сила P_t направлена вдоль радиуса фрезы и колеблется в зависимости от угла γ . Параметр силы P_n вычисляется на базе информации, представленной на диаграммах 3.9 (а) и

3.9 (б).

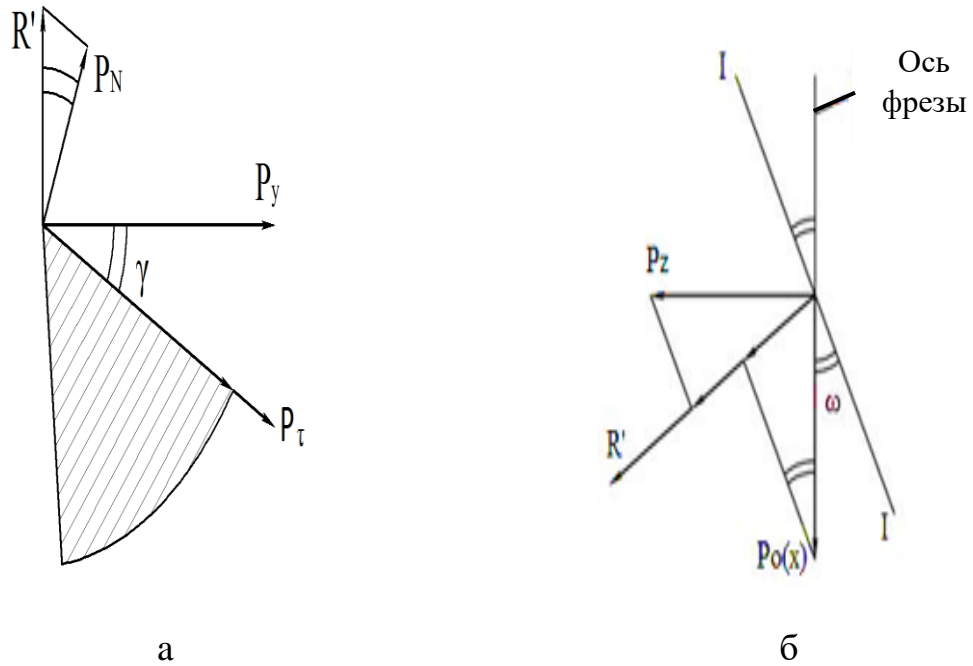


Рисунок 3.9. Механизм действия силовых параметров.

$$P_n = R' \cos \gamma = (P_x \sin \omega + P_z \sin (90 - \omega)) \cos \gamma \quad (3.3)$$

R' - является результирующей силой, действующей под прямым углом к основной режущей кромке.

Таблица 3.2.

Анализ включает средние значения компонентов резания и рассчитанные коэффициенты трения Амонтона μ .

заготовка/инструмент	P_x N	P_y N	P_z N	μ
кованая/без покрытия	71	360	470	0.83
кованая/ комбинированная поверхностная обработка	98	270	440	0.66
СЭЛП/без покрытия	90	270	540	0.61
СЭЛП/ комбинированная поверхностная обработка	73	270	420	0.69

В процессе резки без фаски считается, что силовые факторы, которые воздействуют на кромку резцов, не имеют критического значения и не влияют на точность расчета коэффициента трения μ (на таблица 3.2).

$$\mu = P_y / (P_x \sin\omega + P_z \cos\omega) \quad (3.4)$$

3.3 Определение среднего коэффициента трения по Амонту.

В контексте механической обработки титановым сплавом Ti-6Al-4V взаимодействие стружки и передней поверхности инструмента можно охарактеризовать средним коэффициентом трения μ , который определяется как соотношение касательных сил P_t к нормальным силам P_n , возникающим на передней поверхности инструмента во время резания.

Процессы упруго-пластической деформации слоя металла, подминаемого под резец, могут значительно увеличить касательную составляющую и повысить значение коэффициента значительно более 1. Тем не менее, удельная сила трения инвариантна к условиям резания, определяется в основном свойствами заготовки и в какой-то части способна определять обрабатываемость материала.

Можно также отметить, что воздействия сил на торцевую часть зубьев фрезы обычно оцениваются как незначительные, что приводит к пренебрежению их влиянием на расчет коэффициента трения μ в процессе механической обработки инструмента без фаски и износа на рабочих кромках в большинстве случаев оказывается несущественным. Значения угла поворота фрезы ψ , при которых будет осуществляться резание на полную ширину B , составят приблизительно от 7 до 11°. Изменение среднего коэффициента трения Амонтона в этом интервале приведены на рис. 3.10.

Анализ коэффициента трения Амонтона μ при фрезеровании инструментом из исходного инструментального материала кованой заготовки позволяет утверждать, что этот коэффициент изменяется 0.65–0.9. А при применении инструмента с комбинированной поверхностной обработкой на начальном этапе

происходит снижение адгезионного взаимодействия у инструмента с покрытием.

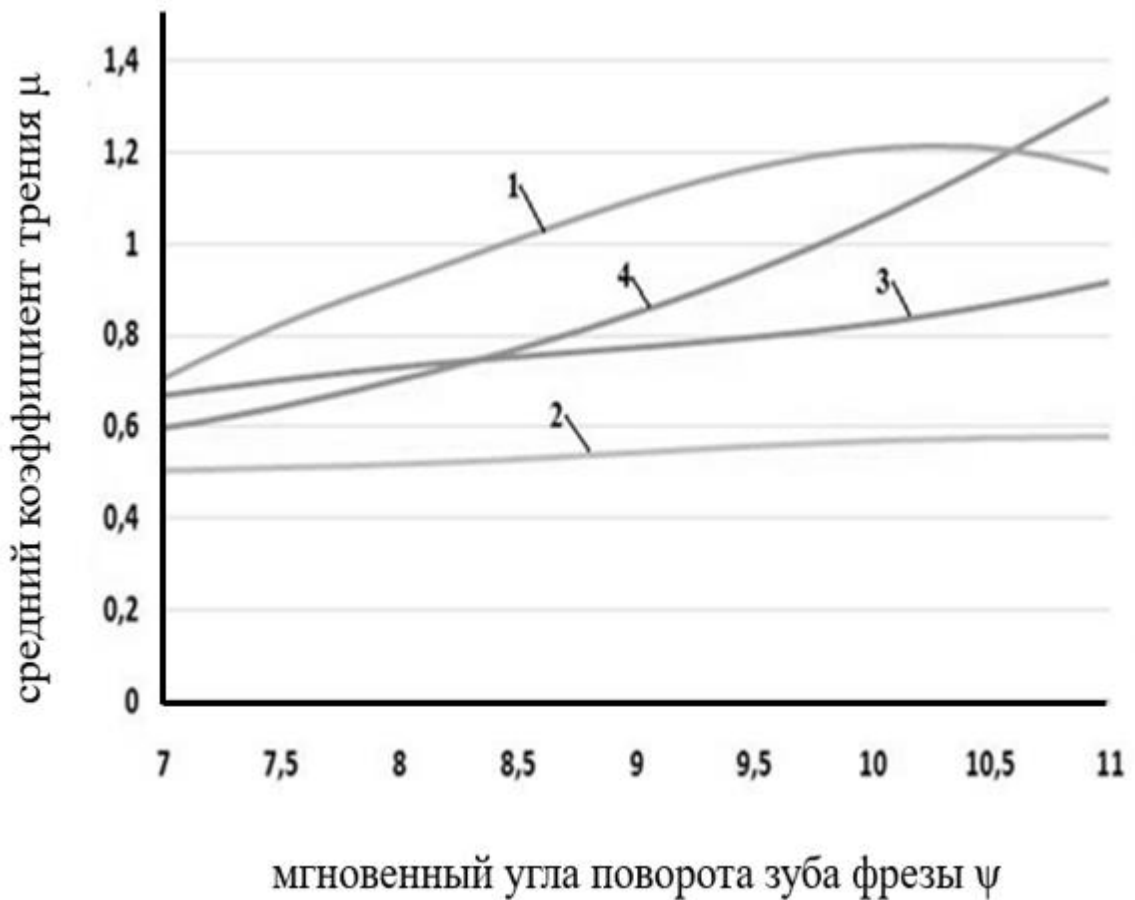


Рисунок 3.10. Средний коэффициент трения Амонтона для фрезерования сплава Ti-6Al-4V 1- обработка заготовки, полученной электронно-лучевым плавлением, резцом из стали P6M5 с комбинированной поверхностной обработкой, 2- обработка заготовки, полученной электронно-лучевым плавлением, резцом из стали P6M5, 3- обработка ковальной заготовки резцом из стали P6M5, 4- обработка ковальной заготовки резцом из стали P6M5 с комбинированной поверхностной обработкой.

Однако при увеличении номинальной толщины скользящего слоя образуются сколы из-за значительно большего радиуса округления режущей кромки r (8 мкм для исходного инструмента и 22 мкм для инструмента с комбинированной поверхностной обработкой), вместе с усиленным образованием нароста, особенно на вершине фрезы, наблюдают увеличение коэффициента μ до 1,3, несмотря на заметное падение силы резания. При встречном фрезеровании,

увеличивающем толщину резания, не достигший устойчивой стадии нарост удаляется вместе со стружкой в конце рабочего цикла (рис. 3.11), что приводит к рассеиванию мелких частиц инструментальной стали.

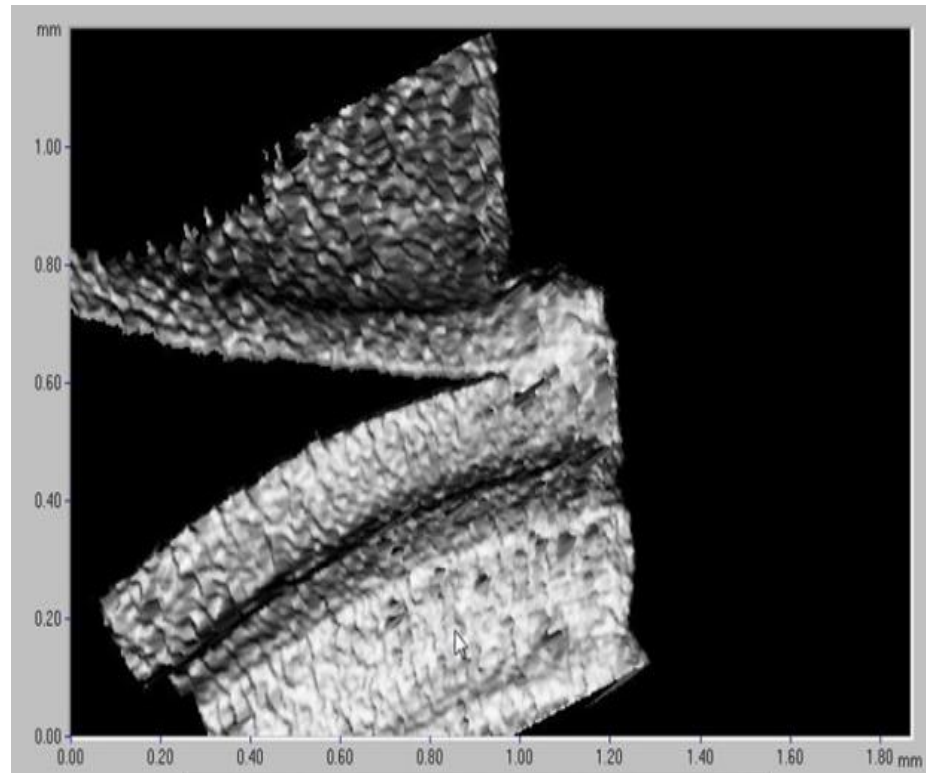


Рисунок 3.11. Нарост, прикрепившийся к стружке (GFM MicroCad lite).

На инструменте образуются микроскопические сколы и негативные канавки, которые способствуют интенсивному износу.

Чтобы избежать этого неблагоприятного явления, фаска или R кромки инструмента должна быть сформирована путем повторного шлифования или лазерной абляции, что уменьшает радиус ρ и увеличивает адгезионную составляющую трения на передней поверхности. Материал, созданный с использованием метода электронно-лучевого плавления, характеризуется высокой твердостью и низкой пластичностью.

При резании данного материала остро заточенным инструментом практически не происходит образования нароста, и коэффициент трения μ остается в пределах 0,5–0,6. Однако при использовании фрезы с комбинированной обработкой поверхности значение μ возрастает до 1,2, после чего стабилизируется.

3.4 Выводы по главе 3

1. Использование инструментов с комбинированной обработкой поверхности позволяет значительно уменьшить размеры составляющих силы резания, что благотворно сказывается на долговечности инструмента.
2. Несмотря на снижение сопротивления резанию, средний коэффициент трения по Амонтону значительно увеличился для инструмента с композитными поверхностями.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT18У НА СТОЙКОСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

4.1 Исследование процесса схватывания титана и материала износостойкого покрытия при сверлении твердосплавными сверлами.

Покрyтия, исследованные в нижеописанных экспериментах, были нанесены с использованием процессов PVD за исключением алмазоподобного покрытия, нанесенного методом CVD. Основное внимание в настоящем исследовании уделялось не тому, как наносятся покрытия или каким образом изменяются параметры осаждения. Цель состояла в том, чтобы изучить взаимодействие материала покрытия с титановым сплавом в процессе резания таким инструментом, а также адаптируемость, проявляющуюся как изменение силового параметра и параметров качества обработки. Тем не менее, об эффективности покрытий можно судить только по реальным экспериментам с определением срока службы инструмента.

4.1.1 Покрyтия для испытания режущего инструмента при сверлении заготовки из титана.

Установка Platit $\pi 311$ +DLC (рис. 4.1) была использована для нанесения покрытий TiN, (CrAlSi)N, (CrAlSi)N+(TiCr) N, (TiAlSi)N, (TiCr)N с толщиной 4 мкм. А также на часть сверл было нанесено покрытие DLC методом химического осаждения паров (CVD) в атмосфере ацетилена с добавлением тетраметилсилана толщиной 2 мкм. Кроме этого, часть сверл была подвергнута процедуре эпиламинирования в композиции 6SFC-180–05 при 55 °C в течение 40 минут.

Покрyтие DLC, имеющее антрацитовый цвет, является прочным и трениеснижающим компонентом, которое в основном состоит из графитизированных алмазоподобных кластеров величиной всего в несколько

нанометров. Благодаря слоистой структуре, напоминающей алмаз, покрытие DLC отличается высокой прочностью, выдающейся устойчивостью к коррозии и увеличенной стойкостью к износу.



Рисунок 4.1. Установка п311 компании Plaitit.

Алмазоподобные углеродные покрытия (DLC) предлагают ряд преимуществ по сравнению с покрытиями на основе нитрида и оксида, включая уменьшение коэффициента трения на рабочих частях инструмента. Однако стоит учитывать, что применение DLC покрытий для режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых сплавов ограничено их относительно низкой термостойкостью. Тем не менее, современные DLC-покрытия, несмотря на свои ограничения, представляют интерес из-за своих потенциальных перспектив в повышении режущей способности инструмента при обработке титановых сплавов. Еще одним интересным методом снижения трения является технология эпиламирования. Она основана на использовании поверхностно-активных веществ во фторуглеродных легко испаряющихся растворителях. Это является

перспективным подходом для уменьшения трения на рабочих поверхностях инструмента.

Эпилам (6SFC) – это смазочная полимерная смесь, образующая на поверхности защитную нанопленку до 100 нм, обладающую многофункциональными свойствами. Этот защитный слой обеспечивает разностороннюю защиту поверхностей.

Согласно утверждениям производителя, эпиламирование способствует устойчивости к механическим повреждениям (износу), обладая высокой термостойкостью и длительным сроком службы. Новые экспериментальные результаты по оценке влияния антифрикционных покрытий на точность отверстий и шероховатость поверхности обрабатываемой детали могут быть решающим шагом в расширении областей их технологического применения и внедрения на основе новых технических решений.

4.1.2 Станок и инструменты.

В процессе сверления, из-за плохой теплопроводности титана, диаметр обрабатываемого отверстия несколько уменьшается за счет теплового расширения вследствие нагрева заготовки, что приводит к заклиниванию инструмента.



Рисунок 4.2. Используемые сверла.

В результате сначала повреждается лента и на ней образуется большое количество отложений, что позволяет воспроизвести в контролируемых условиях

трибологические процессы взаимодействия материала покрытия и титанового сплава при резании.

То есть сверлильный станок в данном случае использовался, как машина трения. При этом налипание обрабатываемого материала на инструмент неизбежно будет сказываться на силовых параметрах и параметрах качества отверстия, таких как точность, нецилиндричность, шероховатость внутренней поверхности, по которым предполагалось косвенно оценить работу износостойкого покрытия и сделать сравнительный выбор его состава и конструкции.

Была испытана группа коротких серийных сверл из цементированного карбида KFM39 с содержанием 9% Co (Konrad micro drill, Германия) с длиной резания 25 мм и диаметром 8,7 мм ($2\varphi=118^\circ$, $\omega=30^\circ$). На рисунке 4.2 и в таблице 4.1 свойства инструментов, использованных в данном исследовании.

Таблица 4.1.

Характеристики инструмента.

Сверло спиральное короткой серии, сплав KFM39 (9% Co)	
Диаметр режущей части, D	8.665 мм
Задний угол у уголка, α	17.42°
Передний угол у уголка, γ	23.92°
Угол при вершине, 2φ	125.80°
Угол спирали, ω	32.28°

Операция сверления проводилась на фрезерном станке KNUTH WF-1 с параметрами резания: 2000 об/мин и подача 53 мм/мин. Для контроля сверлильного процесса применялся динамометр Kistler (Швейцария) (на рисунке 4.3) в сочетании с использованием смазочно-охлаждающей жидкости для предотвращения возгорания стружки.

Затем для измерения характеристик полученных отверстий, таких как диаметр, нецилиндричность, шероховатость, была использована координатно-

измерительная машина GLOBAL (Италия) с разрешением 1.7 мкм, а также прибор для измерения параметров шероховатости и профиля HommelTester T8000 (США).

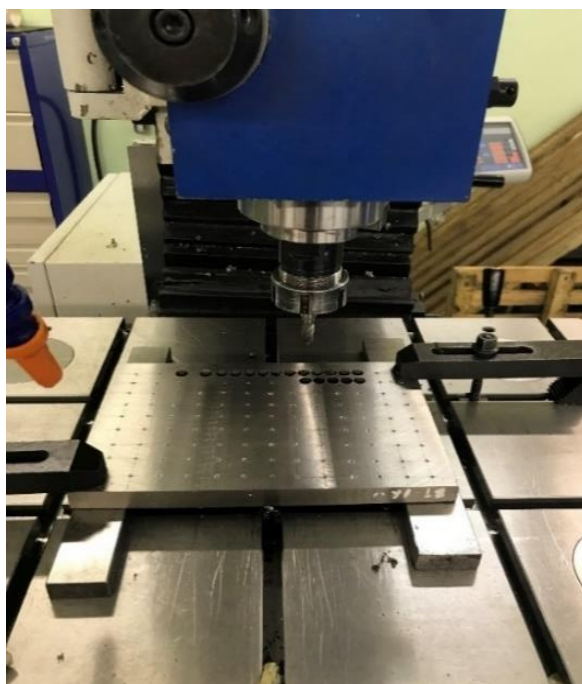


Рисунок 4.3. Заготовка из сплава BT18У, установленная на чувствительную платформу динамометра.

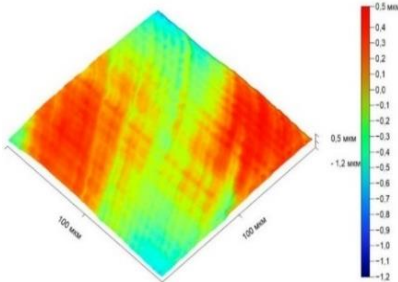
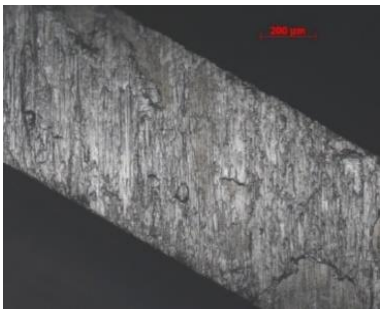
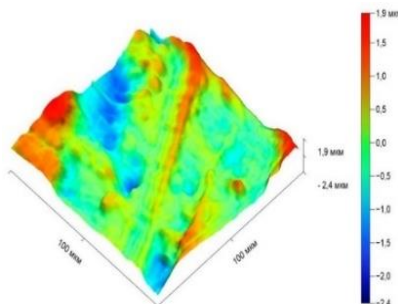

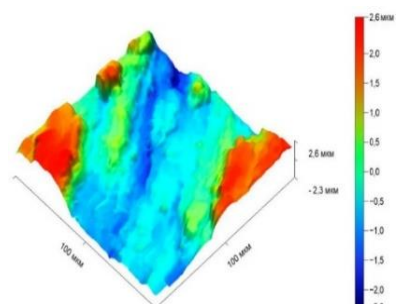
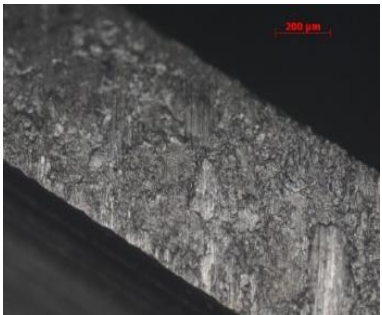
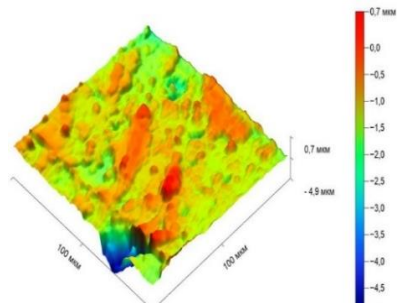
Радиус округления режущей кромки контролировался с помощью прибора MicroCad lite (GFM, Германия). Налипы на ленточке сверла исследовались при помощи стилусного профидометра Dektak XT (Bruker, США).


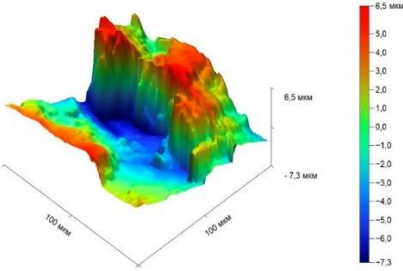

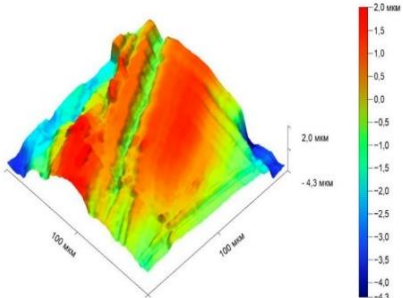

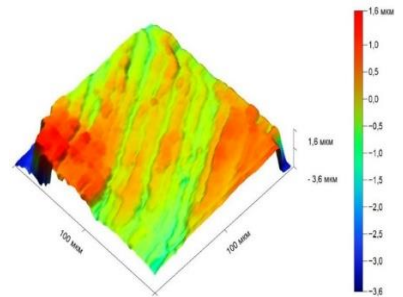
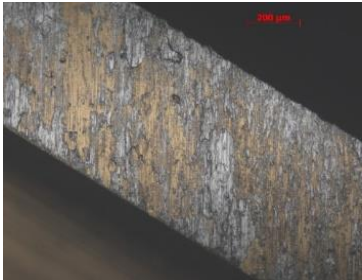
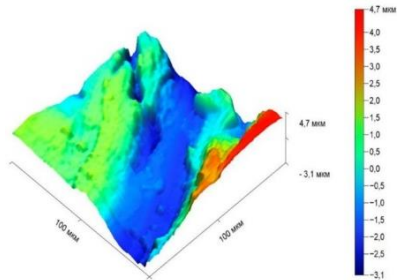

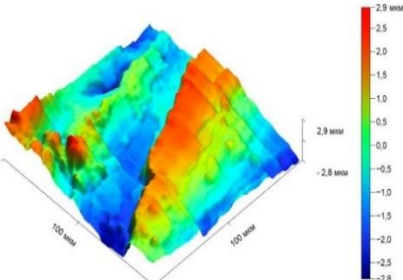
Этот комплексный набор оборудования и инструментов обеспечил возможность полного контроля и измерения сверлильного процесса и качества полученных отверстий.

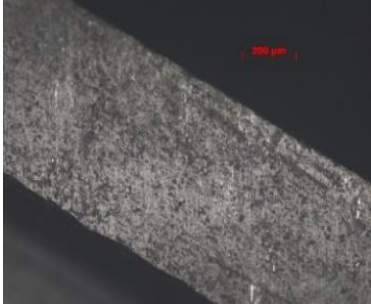
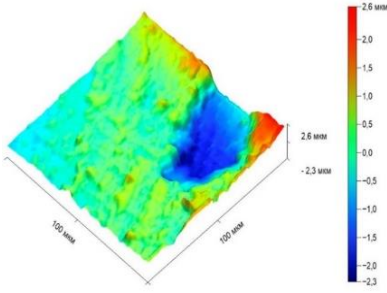

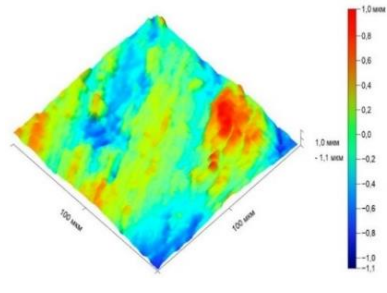

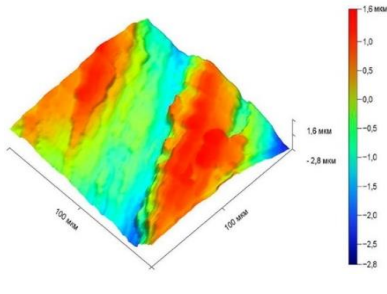

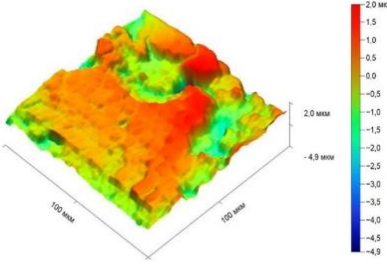

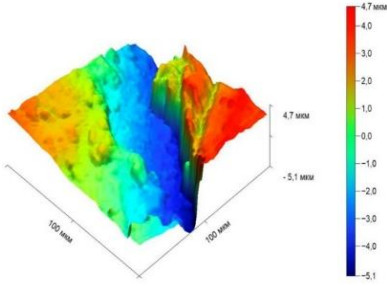
4.1.3 Влияние титанового покрытия на осевую составляющую сдвигающих усилий.

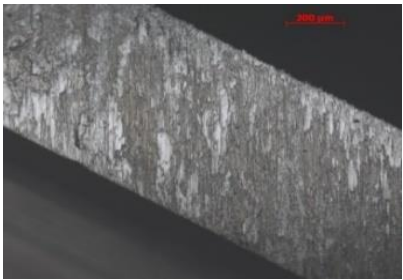
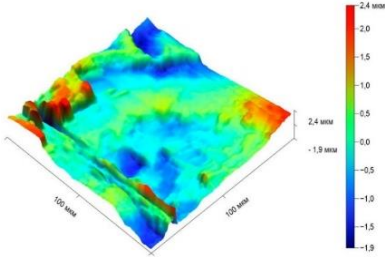

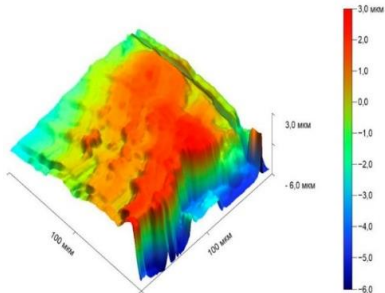

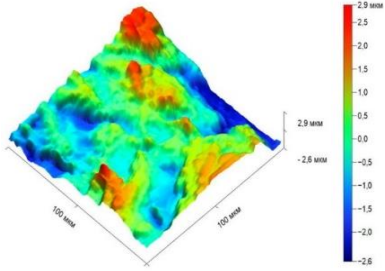
Прочность сцепления с буровой лентой варьировалась в зависимости от состава покрытия и скользящего слоя. В таблице 4.2 можно увидеть характерные фотографии и топографическое изображение поверхности, сделанное стилусным профилометром. По параметру R_z можно оценить высоту нароста.

Налипы титана и топография поверхности ленточки сверла с покрытиями на стилусном профилометре.

Название покрытия	Налипы на ленточке	3D профилограмма поверхности	Параметры шероховатости	
			R _a (мкм)	R _z (мкм)
Исходное состояние			0.202	1.684
1. Без покрытия			0.453	4.193
2. (CrAlSi)N			0.809	4.792
3. (CrAlSi)N+DLC			0.332	5.449

4. (CrAlSi)N+6SFC			2.604	12,776
5. TiN			0.887	6.215
6. TiN+DLC			0.406	5.053
7. TiN+6SFC			1.292	7.597
8. (TiAlSi)N			1.01	5.703

9. (TiAlSi)N+DLC			0.503	4.723
10. (TiAlSi)N+6SFC			0.251	2.005
11. (CrAlSi)N+(TiCr)N			0.662	4.362
12. (CrAlSi)N+(TiCr)N+DLC			0.544	6.28
13. (CrAlSi)N+(TiCr)N+6SFC			2.066	9.718

14. (TiCr)N			0.503	4.175
15. (TiCr)N+DLC			1.288	8.841
16. (TiCr)N+6SFC			0.77	5.348

В зависимости от состава покрытия и состава антифрикционного слоя интенсивность налипания меняется, по-разному отражаясь на параметрах качества отверстия. В таблице 4.3 данные по измерению параметра шероховатости R_z , косвенно связанного с толщиной титанового налива. Измерение силы резания показывает тенденцию к ее некоторому увеличению, на сверлах с покрытиями во всех случаях.

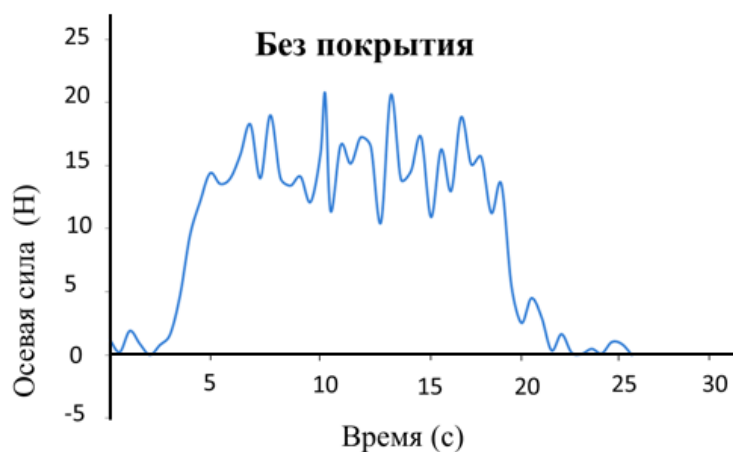
Измерение силы резания показывает тенденцию к ее некоторому увеличению, на сверлах с покрытиями. Особенно эффект заметен для покрытий TiN и (TiAlSi)N. Результаты измерения осевой силы представлены на рис 4.4. При этом следует заметить, что радиус округления режущей кромки после нанесения покрытия практически не изменился и его значения колебались в пределах 8–11 мкм.

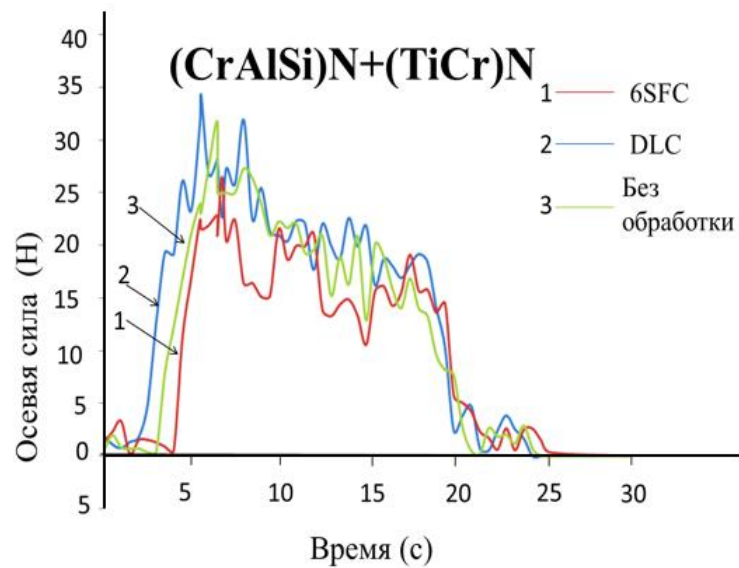
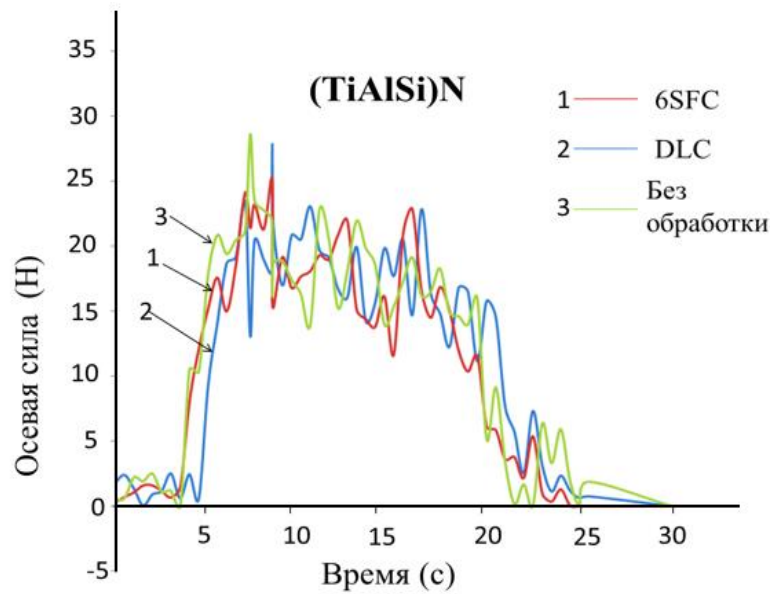
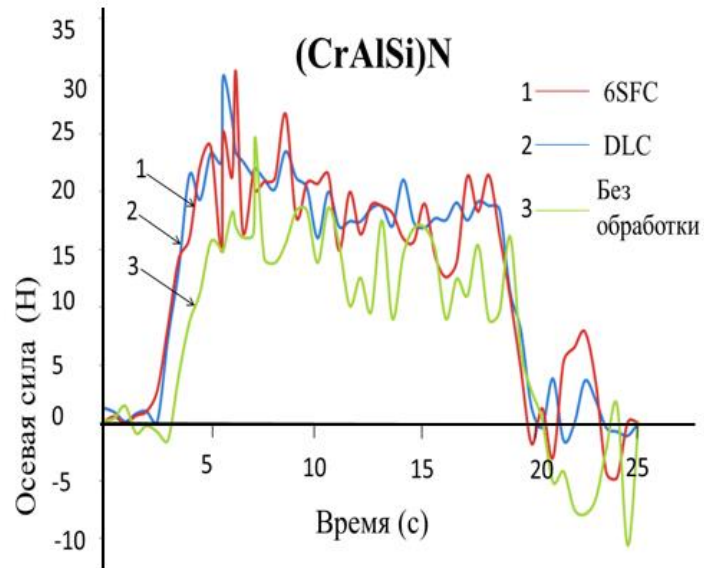
Видно, что нанесение антифрикционной составляющей покрытия также влияет на осевую силу. Причем для различных покрытий это влияние отличается. Например, в случае покрытия (TiCr)N сила существенно возрастает, а в случае (CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC имеет наименьшее значение, сравнимое со значением силы на исходном образце.

Таблица 4.3.

Параметры шероховатости.

	Покрытие	Параметр шероховатости R_z мкм
	Исходное состояние	1.684
1.	Без покрытия	4.193
2.	(CrAlSi)N	4.792
3.	(CrAlSi)N+DLC	5.449
4.	(CrAlSi)N+6SFC	12.776
5.	TiN	6.215
6.	TiN+DLC	5.053
7.	TiN+6SFC	7.597
8.	(TiAlSi)N	5.703
9.	(TiAlSi)N+DLC	4.723
10.	(TiAlSi)N+6SFC	2.005
11.	(CrAlSi)N+ (TiCr)N	4.362
12.	(CrAlSi)N+ (TiCr)N+DLC	6.280
13.	(CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC	9.718
14.	(TiCr)N	4.175
15.	(TiCr)N+DLC	8.841
16.	(TiCr)N+6SFC	5.348





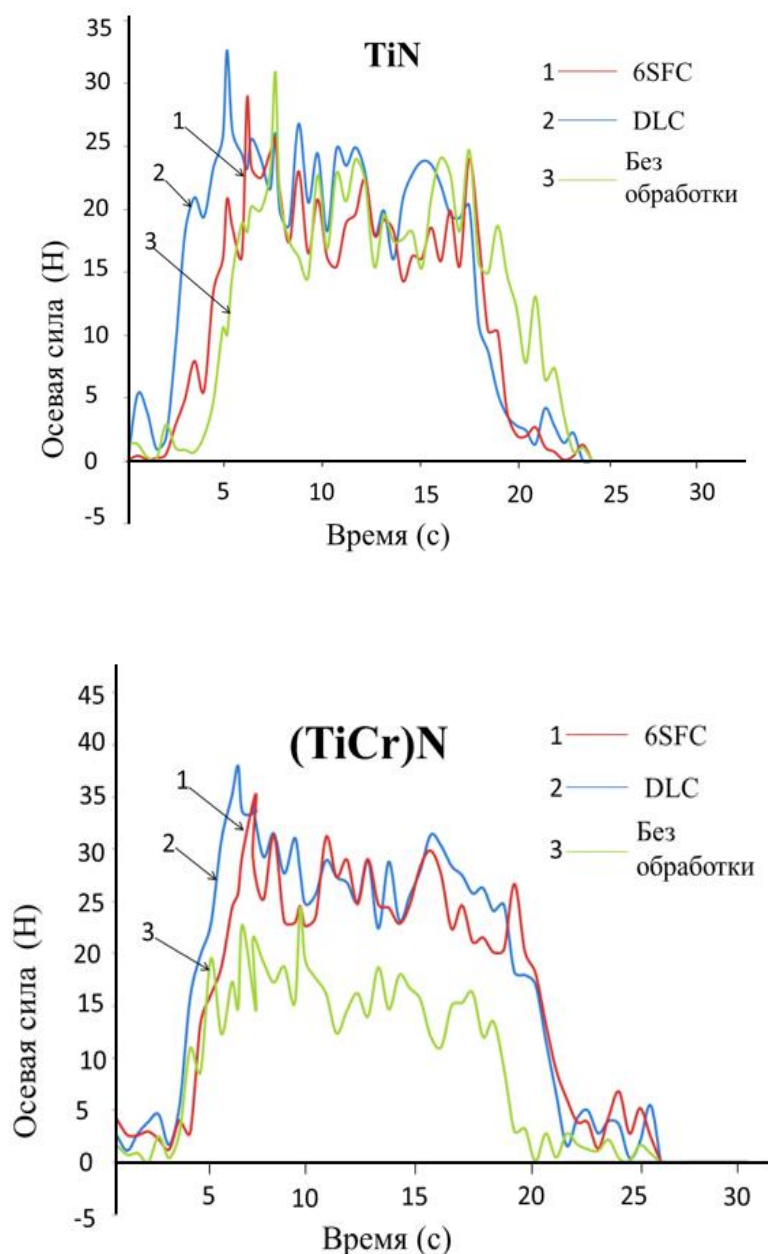


Рисунок 4.4. Значения осевой составляющей силы резания при сверлении сплава ВТ-18У.

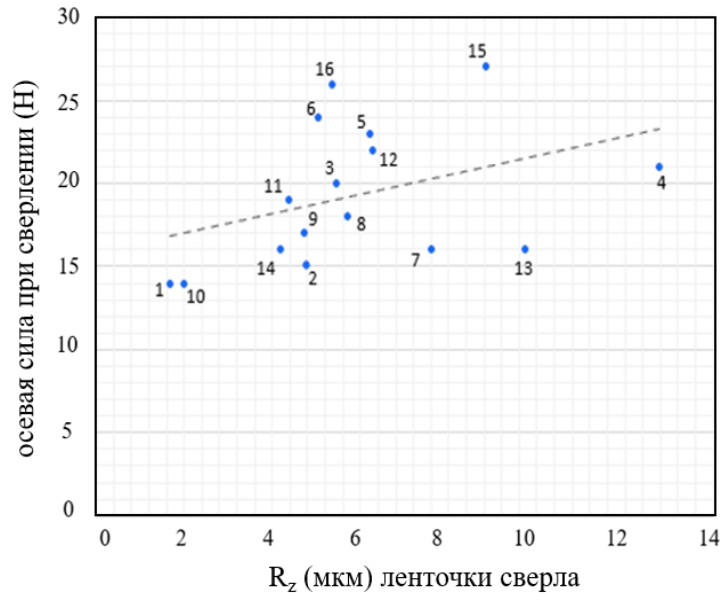
Следует заметить, что несмотря на снижение коэффициента трения на поверхности сверла с 0.4–0.7 для исходного состояния и после нанесения нитридных покрытий до 0.15–0.3 после нанесения антифрикционной составляющей покрытия, количество налипшего титана принципиально не изменилось. Образование наливов приводит к образованию на ленточке сверла отрицательного заднего угла и инструмент, по крайней мере по своей цилиндрической части начинает работать, как дорн.

Параметры отверстий.

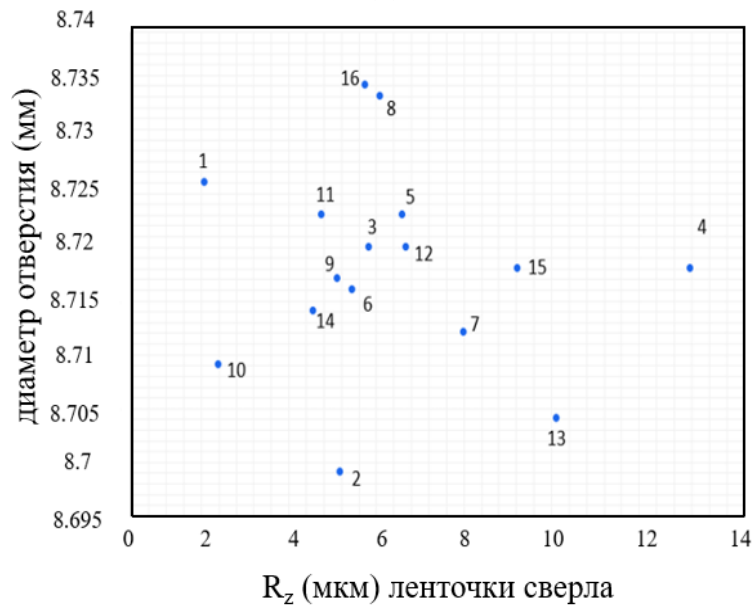
	Состав покрытия	R _a	Ø	<i>h</i>
1	Без покрытия	2.62	8.699	0.052
2	(CrAlSi)N	1.59	8.720	0.049
3	(CrAlSi)N+DLC	1.86	8.718	0.072
4	(CrAlSi)N+6SFC	1.90	8.723	0.065
5	TiN	1.94	8.720	0.037
6	TiN+DLC	1.66	8.704	0.050
7	TiN+6SFC	1.87	8.734	0.058
8	(TiAlSi)N	1.86	8.717	0.036
9	(TiAlSi)N+DLC	1.86	8.709	0.053
10	(TiAlSi)N+6SFC	1.54	8.714	0.052
11	(CrAlSi)N+ (TiCr)N	1.81	8.718	0.060
12	(CrAlSi)N+ (TiCr)N+DLC	1.92	8.735	0.047
13	(CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC	1.93	8.723	0.061
14	(TiCr)N	1.80	8.716	0.052
15	(TiCr)N+DLC	2.60	8.712	0.067
16	(TiCr)N+6SFC	2.33	8.726	0.070

Это приводит к существенному падению шероховатости поверхности в обработанном отверстии и увеличению его диаметра (табл. 4.4), что в свою очередь является причиной увеличения осевой силы. Увеличение величины отклонения от цилиндричности отверстия, связанное с появлением вибраций, указывает на снижение устойчивости сверла.

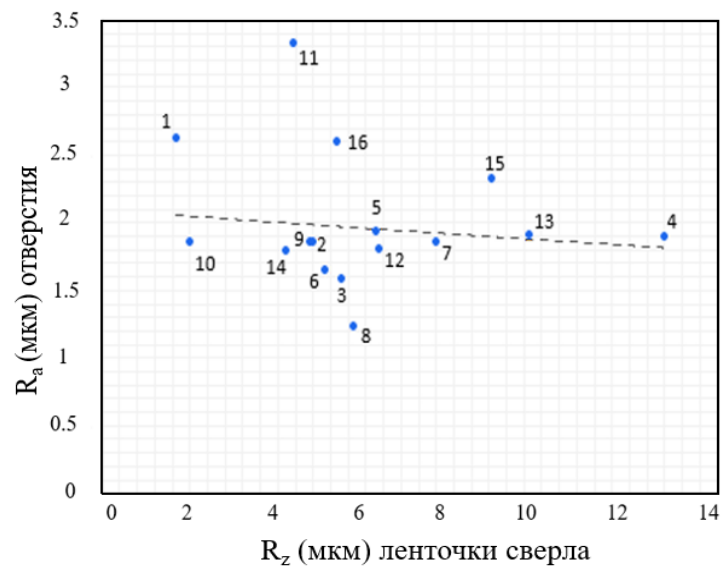
Однако это отклонение скорее носит случайный характер, и здесь сложно выделить какую-либо зависимость. Тем не менее, лучшие характеристики показал инструмент с покрытиями, в которых отсутствовал хром, например, (TiAlSi)N с обоими антифрикционными слоями.



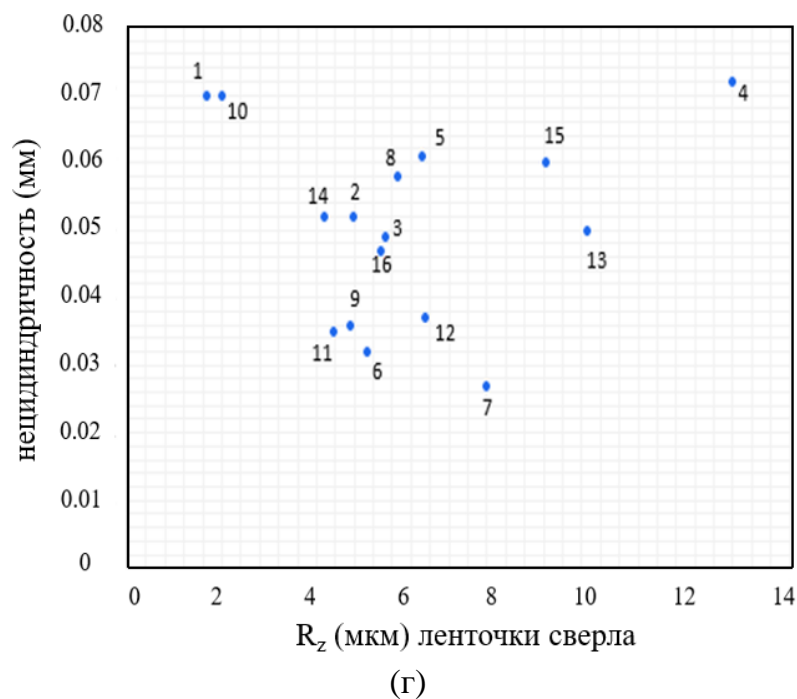
(a)



(б)



(B)



- | | | | |
|-------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| 1. Без покрытия | 5. TiN | 9. (TiAlSi)N+DLC | 13.(CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC |
| 2. (CrAlSi)N | 6. TiN+DLC | 10. (TiAlSi)N+6SFC | 14. (TiCr)N |
| 3. (CrAlSi)N+DLC | 7. TiN+6SFC | 11. (CrAlSi)N+ (TiCr)N | 15. (TiCr)N+DLC |
| 4. (CrAlSi)N+6SFC | 8. (TiAlSi)N | 12. (CrAlSi)N+ (TiCr)N+DLC | 16. (TiCr)N+6SFC |

Рисунок 4.5. Влияние параметра шероховатости ленточки сверла R_z , вызванной образованием налива материала заготовки, (а) на осевую силу при сверлении, (б) диаметр отверстия, (в) шероховатость внутренней поверхности в отверстии и (г) на его нецилиндричность.

Чтобы было удобно оценить влияние величины образовавшегося при взаимодействии материалов покрытия и заготовки под действием трения при температуре, характерной для процесса резания (в данном случае сверления) на осевую силу и параметры качества полученного отверстия, представим данные из таблиц в графической форме (рис. 4.5).

Можно отметить, что нанесение покрытий, несмотря на увеличение осевой силы до двух раз, проявляющееся практически во всех случаях, в своем большинстве улучшает параметры качества обработанного отверстия, снижая отклонения, вызванные биением сверла, сказывающиеся на увеличении диаметра и нецилиндричности отверстия и шероховатости на его внутренней поверхности.

Причем сверло с покрытием (TiAlSi)N+6SFC (номер 10 на графиках), обеспечившим минимальный налип титана на инструмент, показало минимальное увеличение осевой силы резания.

4.2 Стойкостные испытания концевых твердосплавных фрез с износостойкими покрытиями.

Исследовать, используя аналогичные твердосплавные фрезы с одинаковым покрытием, существует ли корреляция между изменениями осевого усилия и параметров качества отверстий, полученных при сверлении, и стойкостью инструмента при фрезеровании, а также между установкой титановой заготовки и покрытием, как было оценено в вышеуказанных экспериментах.

Состоялась серия экспериментов, в которой обрабатывался идентичный сплав. Для выполнения фрезерных операций были использованы концевые фрезы. Подробности о инструменте, применяемом в данном исследовании, представлены на рисунке 4.6 и в таблице 4.5.

Таблица 4.5.

Технические характеристики концевой фрезы.

Фреза чистовая спиральная, сплав KFM39 (9% Co)	
Диаметр режущей части, D	11.988 мм
Кол-во зубьев, z	4
Передний угол, γ	1.45°
Главный задний угол, α	12.96°
Угол спирали, ω	39.96°
Ширина главной задней поверхности	1.30 мм
Длина режущей части	12 мм

Установленные параметры для резания: $n = 2000$ об/мин (частота вращения шпинделя), $S_{\text{мин}} = 200$ мм/мин (скорость подачи), $v = 75$ м/мин (скорость резания),

$a_e = 5$ мм (ширина фрезерования) и $a_p = 1,5$ мм (глубина резания). Критерием износа была выбрана величина фаски износа 0.4 мм по задней поверхности.

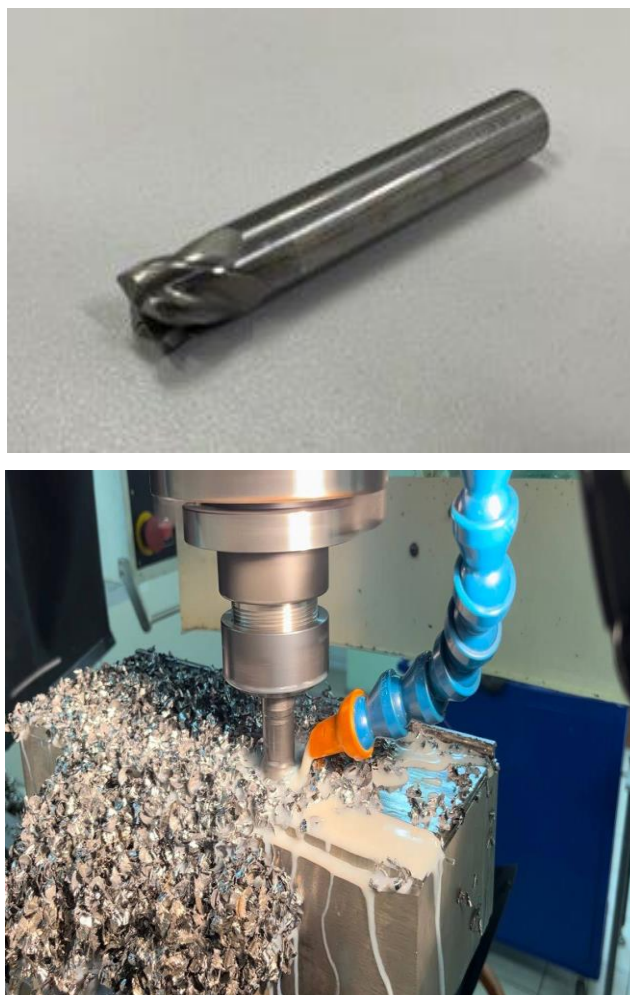
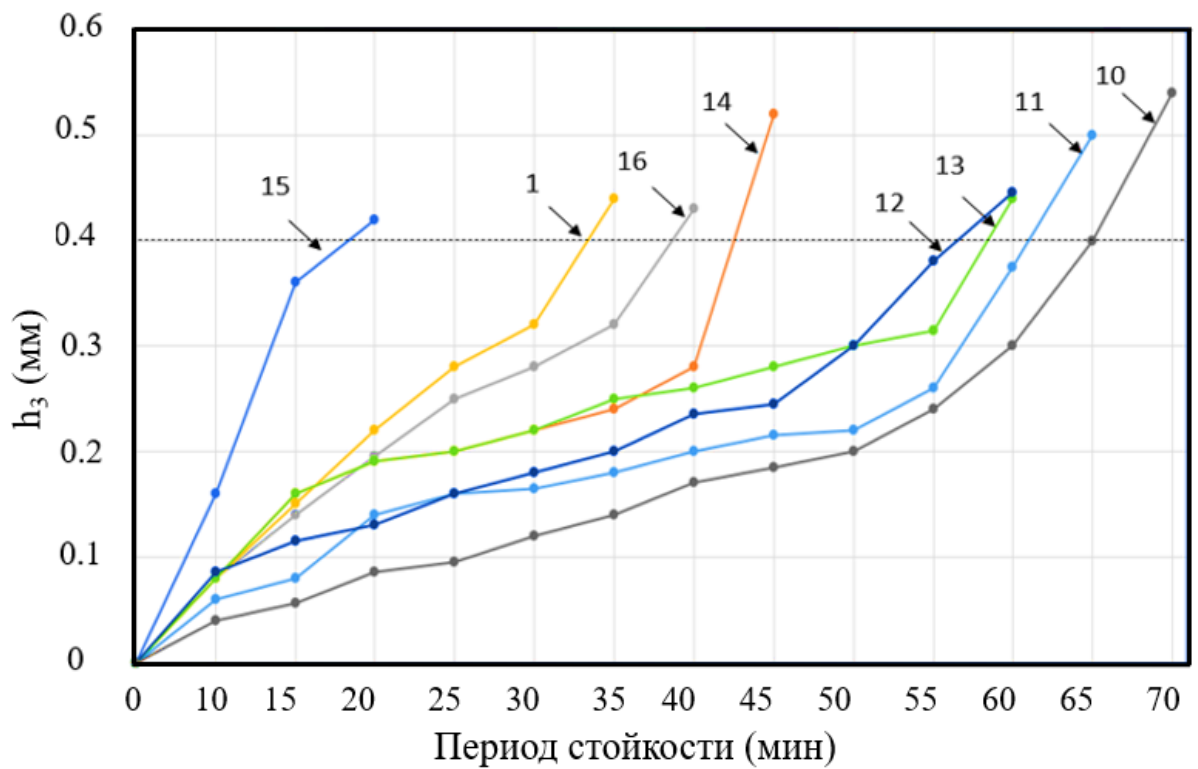
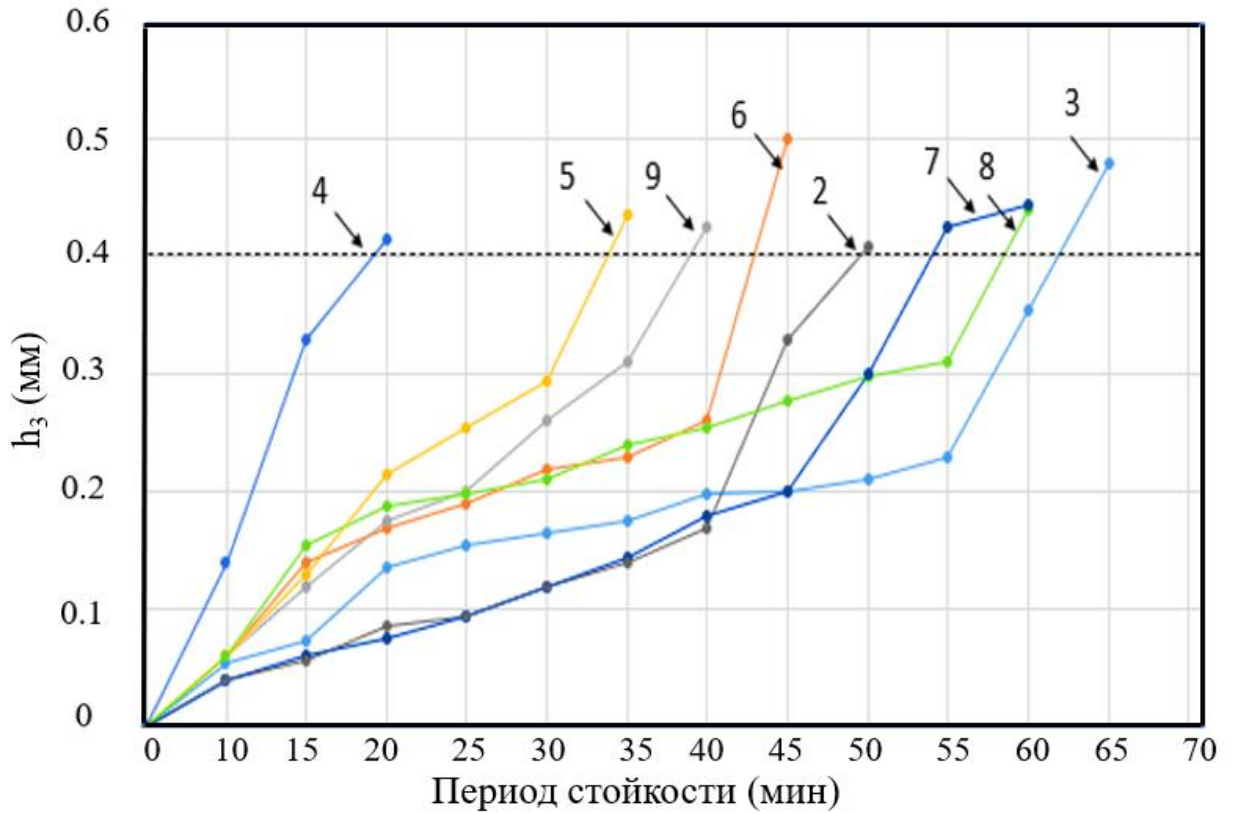


Рисунок 4.6. Применение конечной фрезы для обработки титановых заготовок с использованием СОЖ.

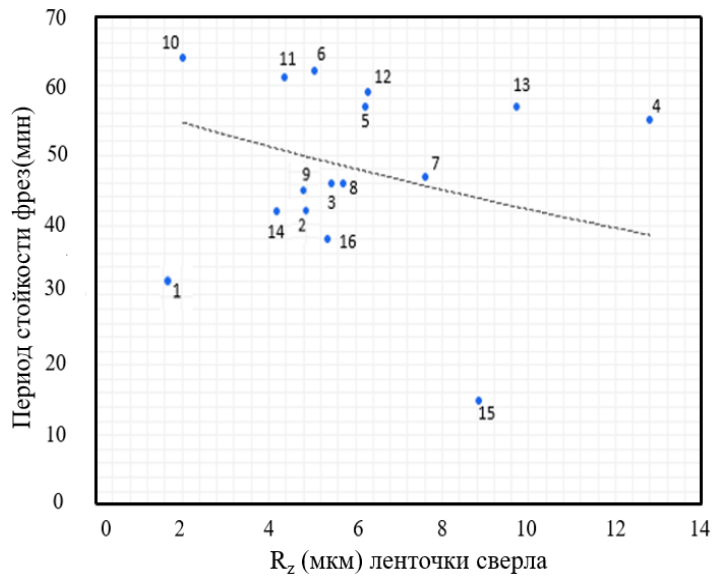
На рисунке 4.7 представлены результаты стойкостных испытаний фрез с тем же рядом износостойких покрытий. Влияние скорости износа по задней поверхности при фрезеровании титанового сплава ВТ18У твердосплавными фрезами различными покрытиями проводилось при фрезеровании уступа.

Большинство покрытий способствовало повышению стойкости фрез до двух раз за исключением некоторых случаев, когда основной причиной неудовлетворительной работы инструмента были сколы твердого сплава на режущей кромке. Лучший результат был получен на фрезе с покрытием $(TiAlSi)N+6SFC$.

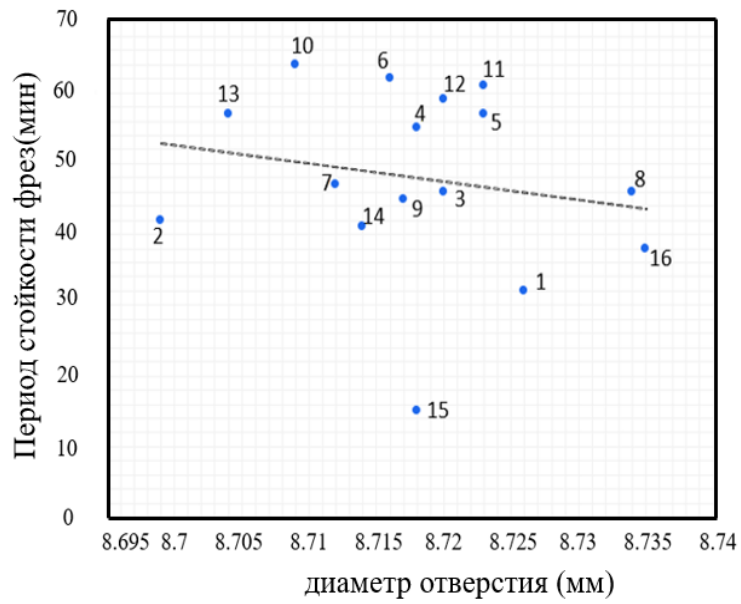


- | | | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|
| 1. Без покрытия | 5. TiN | 9. (TiAlSi)N+DLC | 13.(CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC |
| 2. (CrAlSi)N | 6. TiN+DLC | 10. (TiAlSi)N+6SFC | 14. (TiCr)N |
| 3. (CrAlSi)N+DLC | 7. TiN+6SFC | 11. (CrAlSi)N+ (TiCr)N | 15. (TiCr)N+DLC |
| 4. (CrAlSi)N+6SFC | 8. (TiAlSi)N | 12.(CrAlSi)N+ (TiCr)N+DLC | 16. (TiCr)N+6SFC |

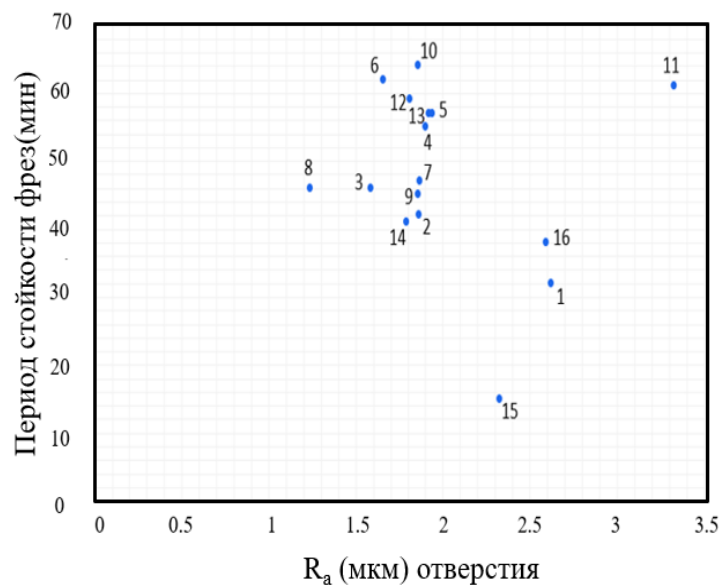
Рисунок 4.7. Стойкость с твердосплавных фрез с различными покрытиями.



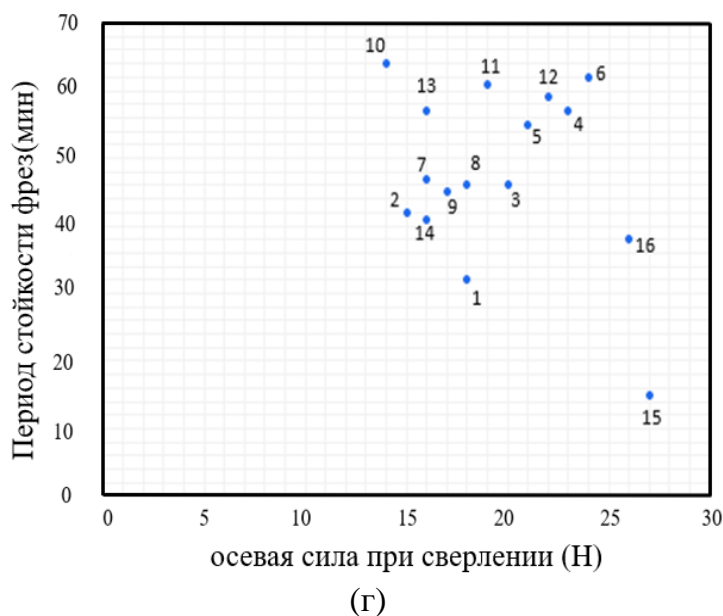
(a)



(б)



(в)



- | | | | |
|-------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| 1. Без покрытия | 5. TiN | 9. (TiAlSi)N+DLC | 13.(CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC |
| 2. (CrAlSi)N | 6. TiN+DLC | 10. (TiAlSi)N+6SFC | 14. (TiCr)N |
| 3. (CrAlSi)N+DLC | 7. TiN+6SFC | 11. (CrAlSi)N+ (TiCr)N | 15. (TiCr)N+DLC |
| 4. (CrAlSi)N+6SFC | 8. (TiAlSi)N | 12. (CrAlSi)N+ (TiCr)N+DLC | 16. (TiCr)N+6SFC |

Рисунок 4.8. Связь между параметрами шероховатости ленточки сверла R_z : (а) шероховатостью на ленточке сверла, (б) диаметром отверстия, (в) шероховатостью внутренней поверхности в отверстии и (г) осевой силы при сверлении с периодом стойкости фрез из того же материала с теми же покрытиями.

С целью выяснения, существует ли влияние на интенсивность налипания титана, исследование которого было описано в разделе 4.1, на срок службы фрез, несмотря на другой способ обработки заготовки резанием, перенесем данные из таблиц на координатную сетку (рис. 4.8).

Визуально на некоторых графиках прослеживается линейная зависимость, а именно, через некоторые группы точек можно приблизительно провести линию.

Для проверки наличия предполагаемых зависимостей было принято решение для каждой пары параметров поделить точки на графике на группы, в которых прослеживаются сходства характеристик измеряемых величин. Так как данные стохастические, визуально определить подобия результатов достаточно сложно.

Для разделения на группы к данным был применен метод кластеризации K-средних, применяемый для анализа данных при обучении моделей искусственного интеллекта. Этот метод применим, так как в этом случае отсутствует обучающая выборка и уже обученная модель. При помощи такого метода кластеризации модель обучается заново, делая «открытия» при разбиении точек на группы. Применение метода кластеризации к имеющимся данным осуществлялось при помощи метода из библиотеки Python sklearn – Kmeans.

Метод K-средних состоит из трех этапов: инициализация - метод случайным образом выбирает центры для требуемого числа кластеров; выбор кластера - каждый элемент набора данных присваивается к ближайшему центру кластера по метрике Евклидова расстояния; пересчет центров - вычисляются новые центры для кластеров, как центр масс всех точек, принадлежащих кластеру.

Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока кластеры не перестанут меняться или не будет достигнуто максимальное количество итераций. Таким образом, получаем кластеризацию данных, при которой элементы внутри одного кластера похожи друг на друга, а разные кластеры отличны друг от друга. Применение метода K-средних позволило объединить точки на графике в группы по сходному признаку.

Далее, к каждой из групп был применен метод корреляционного анализа. Вычисление коэффициента корреляции Пирсона (ККП), который является мерой линейной связи между двумя переменными, позволило оценить наличие зависимости между параметрами. Для вычисления ККП был применен метод `corrcoef` из библиотеки Python NumPy. Величина ККП всегда располагается между -1 и 1. -1 указывает на отрицательную линейную зависимость. 0 указывает на отсутствие зависимости. 1 указывает на наличие зависимости. Таким образом, чем сильнее отличие коэффициента корреляции от нуля, тем сильнее связь между двумя переменными. В нашем случае предполагалось наличие линейной связи при $ККП > |0,5|$. Применение метода K-средних позволило объединить точки на графике в группы по сходному признаку. К каждой из групп был применен метод корреляционного анализа, позволяющий проследить наличие зависимости в

каждой паре измеряемых величин. Этим способом была выявлена стойкая зависимость между R_z ленточки сверла, полученной в экспериментах по сверлению, и периодом стойкости фрез (ККП = 0.9), а также, возможная между периодом стойкости фрез и шероховатостью R_a внутренней поверхности в отверстии (ККП = 0.6).

Так как на рисунке 4.8 визуально заметны зависимости, было принято решение при помощи метода дисперсионного анализа показать их наличие. Для каждой из трех зависимостей, отмеченных на рисунке 4.8, был проведен расчет. 16 предоставленных экспериментов были поделены на группы по признаку одной из величин и произведен расчет. Например, для поиска зависимостей между периодом и $R_{(мкм)}$ ленточки, значения шероховатости были поделены на 4 группы случайным образом (Таблица 4.6) и по признаку величины периода (Таблица 4.7). Расчеты представлены ниже.

Таблица 4.6.

Деление экспериментов на группы по случайному признаку.

Группа	1 группа	2 группа	3 группа
1	1,6	4,7	6,3
2	2	5,6	6,2
3	4,6	4,4	5
4	7,6	5,4	5,3
5	9,6	12,8	8,8

Согласно методу дисперсионного анализа предположим 2 гипотезы. **Нулевая гипотеза (H_0):** Средние значения групп не различаются, т. е. значение шероховатости не зависит от периода. **Альтернативная гипотеза (H_1):** Средние значения хотя бы одной группы отличаются, т. е. изменение периода влияет на изменение шероховатости. Основная идея заключается в сравнении двух видов дисперсий: межгрупповой и внутри групповой. Произведем расчет и вычислим F-критерий.

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = 652,11$$

$$S_0^2 = \frac{Q_1 - Q_2}{N - k} = 53,442$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^k \frac{X_i^2}{n_i} = 545,226$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{k - 1} = 3,213$$

$$Q_3 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^k X_i \right)^2 = 538,8$$

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} = 0,06$$

$$F_\alpha(k - 1; N - k) = (2; 12) = 3,89$$

Таблица 4.7.

Деление экспериментов на группы по признаку величины периода.

Группа	Короткий период	Средний период	Длинный период
1	1,6	4,7	6,3
2	4,8	5,6	6,2
3	4,2	5,4	5,3
4	7,6	5,233333	8,8

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = 394,66$$

$$S_0^2 = \frac{Q_1 - Q_2}{N - k} = 25,4$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^k \frac{X_i^2}{n_i} = 369,25$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{k - 1} = 4,589$$

$$Q_3 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^k X_i \right)^2 = 360,07$$

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} = 0,18$$

$$F_\alpha(k - 1; N - k) = (2; 9) = 3,89$$

Если F-критерий достаточно велик, это означает, что межгрупповая дисперсия (обусловленная факторами) значительно превышает внутригрупповую (случайные ошибки), что указывает на наличие статистически значимых различий между группами.

Расчет показал, что неочевидных зависимостей между величинами не найдено, так как полученное значение F-критерия не приближено к критическому значению из таблицы распределения Фишера. Таким образом, можно сделать вывод, что неочевидные зависимости отсутствуют. Остальные зависимости были просчитаны аналогичным образом, положительного результата не выявлено.

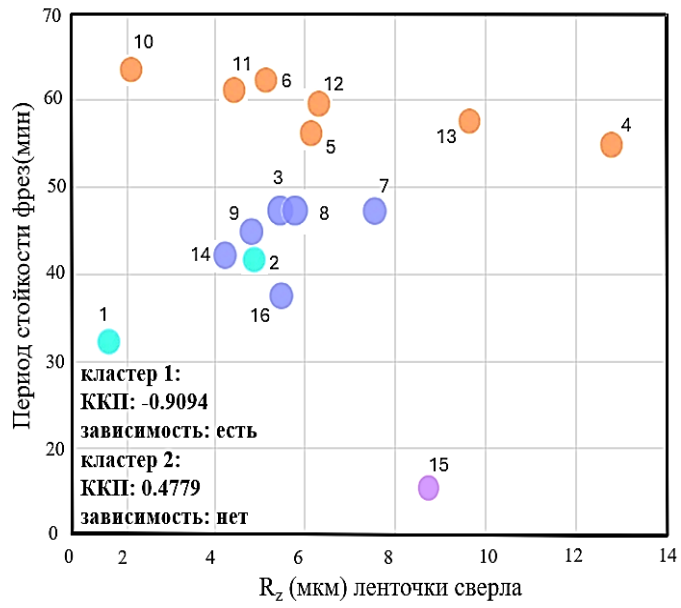
Также, не стоит исключать недостатков самого метода дисперсионного анализа. Один из ключевых недостатков метода — это его зависимость от предположения о нормальном распределении данных в каждой группе. Если данные существенно отклоняются от нормальности, результаты могут быть неверными или неточными.

Также, дисперсионный анализ предполагает, что дисперсии во всех сравниваемых группах должны быть одинаковыми. Если дисперсии сильно различаются (нарушение гомоскедастичности), это может привести к некорректным выводам.

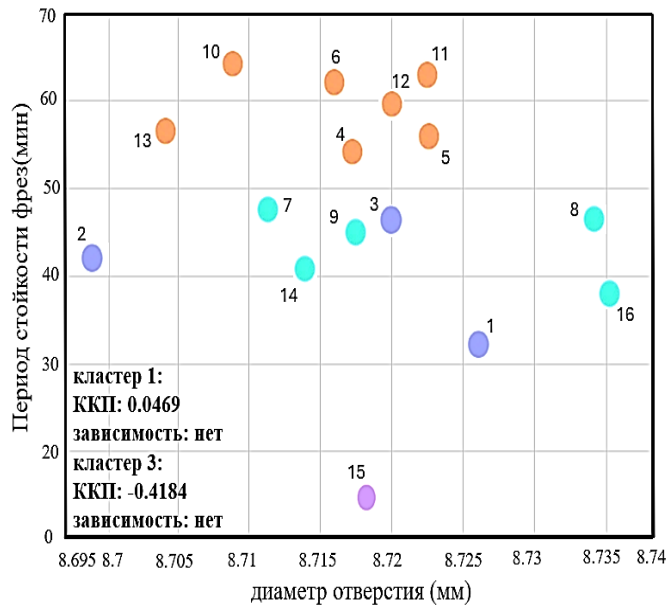
И вышеописанный метод требует, чтобы наблюдения были независимы друг от друга. В случае зависимых данных (например, повторных измерений) этот метод не подходит без дополнительных модификаций (например, использования анализа с повторными измерениями).

Полученные данные (Рис. 4.9.) позволяют говорить о том, что существует корреляция между параметрами, на которые оказывает влияние склонность к наростообразованию, хотя многие результаты все же приходится признать неоднозначными из-за недостаточной точности проведенных измерений или из-за недостаточного количества опытов.

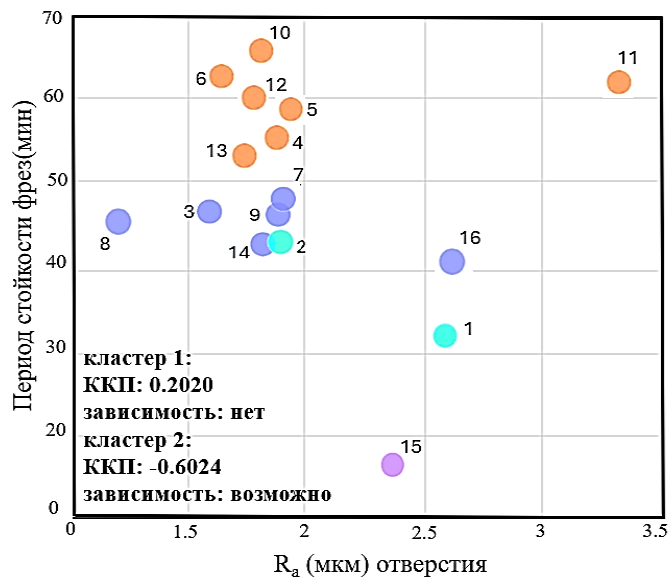
Тем не менее, согласно данным измерения параметра шероховатости ленточки сверла R_z , согласующимся с высотой налива, и, в какой-то мере, по минимальной величине отклонения диаметра отверстия от номинального, по величине шероховатости внутренней поверхности отверстия представляется возможным осуществить выбор состава износостойкого покрытия прогнозировать поведение инструмента с таким покрытием. В то же время по силовым характеристикам процесса резания сделать такое предсказание не получается.



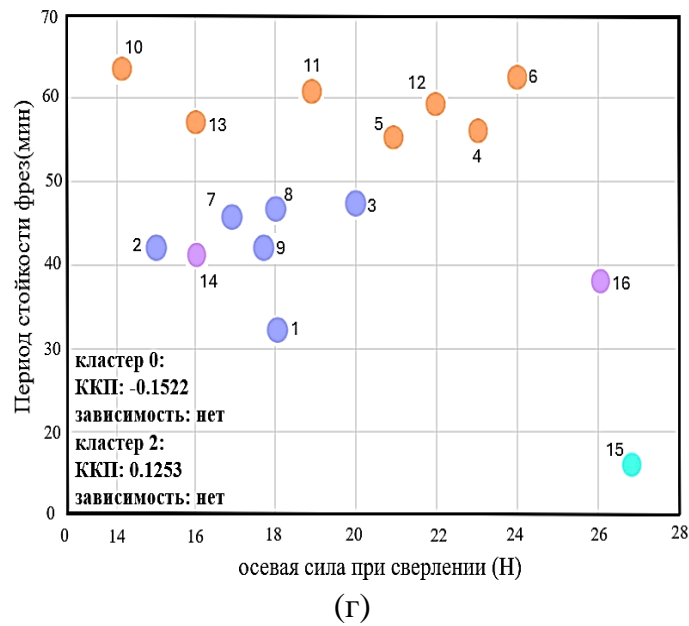
(а)



(б)



(в)



- | | | | |
|-------------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1. Без покрытия | 5. TiN | 9. (TiAlSi)N+DLC | 13. (CrAlSi)N+ (TiCr)N+6SFC |
| 2. (CrAlSi)N | 6. TiN+DLC | 10. (TiAlSi)N+6SFC | 14. (TiCr)N |
| 3. (CrAlSi)N+DLC | 7. TiN+6SFC | 11. (CrAlSi)N+ (TiCr)N | 15. (TiCr)N+DLC |
| 4. (CrAlSi)N+6SFC | 8. (TiAlSi)N | 12. (CrAlSi)N+ (TiCr)N+DLC | 16. (TiCr)N+6SFC |

Рисунок 4.9. Кластеризация данных для выявления возможной зависимости между параметрами: (а) шероховатостью на ленточке сверла, (б) диаметром отверстия, (в) шероховатостью внутренней поверхности в отверстии и (г) осевой силы при сверлении с периодом стойкости фрез из того же материала с теми же покрытиями.

Отмечена тенденция к повышению осевой силы при использовании сверл с пятью износостойкими покрытиями в сочетании с двумя антифрикционными покрытиями. Это может быть связано с интенсивным налипанием титана на ленточку сверла, что приводит к деформации поверхности обрабатываемого отверстия, увеличению его диаметра до 0.03 мм и уменьшению шероховатости. Замечена корреляция между данными, полученными в экспериментах по сверлению и фрезерованию. Например, покрытие на основе (TiAlSi)N в сочетании с эпиламированием, которое обеспечило лучшее сочетание параметра R_z на ленточке сверла и минимальное отклонение диаметра отверстия от номинального при сверлении, также привело к увеличению стойкости до 2 раз при фрезеровании

сплава BT18У концевыми фрезами.

Поведение антифрикционных покрытий в случае обработки титанового сплава признано неоднозначным, однако стоит отметить, что применение покрытий на основе (TiAlSi)N с антифрикционными составляющими привело к наилучшему результату.

4.3 Выводы по главе 4

1. Отмечена тенденция к повышению осевой силы при использовании сверл с пятью износостойкими покрытиями в сочетании с двумя антифрикционными покрытиями. Это может быть связано с интенсивным налипанием титана на ленточку сверла, что приводит к деформации поверхности обрабатываемого отверстия, увеличению его диаметра до 0.03 мм и уменьшению шероховатости.
2. Замечена корреляция между данными, полученными в экспериментах по сверлению и фрезерованию. Например, покрытие на основе (TiAlSi)N в сочетании с эпиламинированием, которое обеспечило лучшее сочетание параметра R_z на ленточке сверла и минимальное отклонение диаметра отверстия от номинального при сверлении, также привело к увеличению стойкости до 2 раз при фрезеровании сплава BT18У концевыми фрезами.
3. Поведение антифрикционных покрытий в случае обработки титанового сплава признано неоднозначным, однако стоит отметить, что применение покрытий на основе (TiAlSi)N с антифрикционными составляющими привело к наилучшему результату.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Исследование особенностей взаимодействия между быстрорежущим и твердосплавным инструментом с комбинированными износостойкими покрытиями титановыми заготовками удалось определить критерии, позволяющие оценить качество их обрабатываемости, что выражается в изменении среднего коэффициента трения по Амонтону и параметров качества обработки, на которые оказывают влияние процессы упруго-пластической деформации, вызванные увеличением радиуса округления режущей кромки и налипанием обрабатываемого материала на инструмент.
2. В результате проведенных исследований выявлены особенности взаимодействия быстрорежущего и твердосплавного инструмента, оснащенного комбинированными износостойкими покрытиями с титаном, продемонстрировано уменьшение величины составляющей силы резания P_z и изменение среднего коэффициента трения согласно модели Амонтона и параметров качества обработки и стойкости инструмента, позволяющие провести качественную оценку обрабатываемости титанового сплава фрезерованием.
3. Использование комбинированной обработки поверхности инструментов, в том числе легирования и покрытия, позволяет существенно уменьшить размеры составляющих сил резания, что положительно сказывается на сроке службы инструмента. Тем не менее, несмотря на снижение силы резания, устойчивость фрез не улучшается, что может быть связано с увеличением радиуса закругления режущей кромки в результате технологических особенностей комбинированной обработки, приводящих к значительному росту среднего коэффициента трения согласно закону Амонтона.
4. Отмечена тенденция к повышению осевой силы при работе со сверлами с пятью износостойкими покрытиями в комбинации с двумя антифрикционными слоями, что может быть связано с интенсивным налипанием титана на ленточку сверла, которое приводит к деформации поверхности обрабатываемого отверстия, а также

уменьшению ее шероховатости, и увеличению диаметра до 0.03 мм.

5. Поведение антифрикционных покрытий в случае обработки титанового сплава признано неоднозначным, но тем не менее следует отметить, что применение покрытия на основе (TiAlSi)N с эпиламинированием обеспечившее лучшее сочетание параметра R_z на ленточке сверла и малое отклонение диаметра отверстия от номинального при сверлении дало лучший результат и при фрезеровании.

6. В работе решена задача повышения стойкости концевых твердосплавных фрез при обработке титановых сплавов путем комбинирования износостойких и антифрикционных слоев покрытия. Покрытие на основе (TiAlSi)N в комбинации с эпиламинированием дало повышение стойкости до 2 раз при фрезеровании сплава BT18У концевыми фрезами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller. Titanium Alloys in Aerospace Applications: An Overview / Miller, J. Andrew // The University of Akron. - 2017.
2. Ravi Kumar. Titanium Alloys for Aerospace Applications: A Review / Ravi Kumar, Vikas Chawla // Journal of Materials Engineering and Performance. - 2016.
3. Belayneh, L. M. Mechanical properties of titanium alloys for biomedical applications / L. M. Belayneh. - Journal of Materials Science: Materials in Medicine. - 2019.
4. Chen, Z. Coated Tool Performance in Machining Hard Materials—A Review / Z. Chen, X. Wang, H. Li // Coatings. - 2018. - № 6(8), 200.
5. Reis. Performance Optimization of Coated Cutting Tools: A Review / Reis, Alexander // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2019. - № 2(141). - P. 1-24.
6. Reis. Coating Technologies and Their Impact on Cutting Performance: A Review / Reis, Alexander // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2017. - № 6(139). - P. 1-16.
7. Григорьев, С. Н. Модификация структуры и свойств быстрорежущей стали путём комбинированной вакуумно-плазменной обработки / С. Н. Григорьев, А. С. Метель, С. В. Фёдоров. // Металловедение и термообработка металлов. - 2012. 1(). С. 8-12.
8. Liu, Y. Machinability of aeroengine alloys: A review / Y. Liu, X. Liu, X. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Apr. 2016. - № 9-12(85). - P. 2627-2648.
9. Rahman, M. Machinability of aerospace alloys: A review / M. Rahman, A. Khondoker, M. A. Islam, N. I. Khan // Journal of Manufacturing Processes. - Jan. 2016. - 20(). - P. 262-277.
10. Shen, H. Machining of titanium alloys and composites: A brief review / H. Shen, H. Qian, L. Xu, W. Liu, X. Chen // Journal of Materials Science & Technology. - Dec. 2021. - 58(). - P. 81-96.

11. Novovic, M. Machinability of titanium alloys / M. Novovic, J. L. Outeiro, S. Kapoor // *Procedia CIRP*. - Jan. 2017. - 62(). - P. 731-736.
12. Levi, A. V. Corrosion behavior of titanium and its alloys in various environments: A review / A. V. Levi, S. M. Bagheri // *Journal of Alloys and Compounds*. - Oct. 2018. - 777(). - P. 512-532.
13. Liu, Y. Corrosion behavior of titanium and its alloys in acid and alkaline environments: A review / Y. Liu, W. Zhou, Y. Gao, L. Zhang, X. Chen, Z. Xie // *Journal of Materials Science & Technology*. - Oct. 2021. - 62(). - P. 26-37.
14. Abdel-Aal, H. A. Corrosion behavior of titanium alloys used in aerospace and biomedical applications: A review / H. A. Abdel-Aal, A. El-Sayed Seleman // *Journal of Alloys and Compounds*. - Mar. 2017. - 720(). - P. 247-263.
15. Dwivedi, D. K. Cutting tool wear: A comprehensive review / D. K. Dwivedi, D. K. Singh // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. - Mar. 2019. - № 3(233). - P. 589-607.
16. Outeiro, J. C. Wear mechanisms of cutting tools: A comprehensive review / J. C. M. B. Outeiro, Silva, A. Almeida // *Procedia CIRP*. - Jan. 2016. - 46(). - P. 560-565.
17. Tunc, G. Cutting tool wear and life expectancy: A critical review / G. Tunc, Y. Korkut // *Journal of Materials Science & Technology*. - Sep. 2021. - 61(). - P. 110-125.
18. Ma, K. Issues and challenges in manufacturing aerospace titanium components / K. Ma, M. Preuss // *International Journal of Aerospace Engineering*. - Oct. 2019. - 2019(). - P. 1-12.
19. Vairis, A. Recent advancements in aerospace materials and manufacturing / A. Vairis. - *Journal of Materials Science & Technology*. - Feb. 2021. - 65(). - P. 218-223.
20. Wang, H. M. Machinability of titanium alloys: A review / H. M. Wang, X. P. Xu, H. C. Zhang, H. D. Li // *Advances in Manufacturing*. - Oct. 2021. - № 4(9). - P. 426-438.
21. Venkata Ramana, S. Machinability of titanium alloys - A review / S. Venkata Ramana, S. Sundar Singh Sivam // *Materials Today: Proceedings*. - Jan. 2018. - № 11(5). - P. 23033-23042.

22. Chen, J. Machinability and surface integrity in high-speed machining of titanium alloys: A review / J. Chen, X. J. Liu, X. Zhang, H. X. Yu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. - Jan. 2018. - 232(), no. 1. - P. 3-20.
23. Smith, W. F. Foundations of Materials Science and Engineering / W. F. Smith, J. Hashemi // 5th ed. - New York: McGraw-Hill Education. - 2019.
24. Ellefsen, K. O. Encyclopedia of Materials: Science and Technology / K. O. Ellefsen, Ed // Oxford. - UK: Elsevier Ltd. - 2018.
25. Li, L. The effect of hydrogen on the microstructure and mechanical properties of cast Ti-6Al-4V alloy / L. Li, X. Li, X. Li // Materials Science and Engineering: A. - 2019. - 761().
26. Zheng, J. Effect of hydrogen on the microstructure and mechanical properties of cast Ti-6Al-4V alloy / J. Zheng, X. Zhang, D. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. - 2020. - 824().
27. Venkata Ramanaih, N. Machining of titanium alloys: a review / N. Venkata Ramanaih. - International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2019. - 102().
28. Sahoo, S. K. The machinability of titanium alloy Ti-6Al-4V using coated carbide tool under dry and cryogenic cooling conditions / S. K. Sahoo, S. Patnaik, S. S. Mahapatra // Journal of Materials Engineering and Performance. - 2019. - 28().
29. Sharma, A. K. Cutting mechanics and optimization of machining parameters for different materials: A review / A. K. Sharma, R. K. Pandey, V. K. Jain // Journal of Manufacturing Processes. - 2018. - 35().
30. Chaitanya, K. C. Analytical modeling and optimization of cutting parameters for sustainable machining of Inconel 718 superalloy using PVD-coated carbide tool / K. C. Chaitanya, K. Ramesh, G. Padmanabhan // Journal of Cleaner Production. - 2019. - 223().
31. Kumar, P. Machining mechanism and surface generation in high-speed machining of titanium alloys: A review / P. Kumar, K. Raghukandan // Materials Today: Proceedings. - 2018. - 5().

32. Fu, Y. New observations on chip formation and deformation zone in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy / Y. Fu, L. Chen, Y. Xu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2019. - 101().
33. Chowdhury. Titanium in Aerospace Applications: A Review / Chowdhury, Mohammad Asaduzzaman // *Journal of Aerospace Technology and Management*. - 2015. - № 3(7). - P. 267-279.
34. Gente, A. Chip formation in machining Ti6Al4V at extremely high cutting speeds / A. Gente, H. W. Hoffmeister, C. Evans // *CIRP Ann Manuf Technol*. – 2001. 50(0). P. 49-52. doi:10.1016/S0007-8506(07)62068-X.
35. Attanasio. An Overview of Recent Developments in Milling Technologies for Aerospace Components / Attanasio, Aldo // *CIRP Annals*. - 2019. - № 1(68). - P. 507-530.
36. Klocke. Cutting Fluids / Klocke, Fritz, Markus Weber // *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer. - 2019. - P. 1-8.
37. Venkata Ramanaih, N. Machinability of titanium alloys – a critical review / N. Venkata Ramanaih, V. K. Jain // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. -2017. - 19().
38. Islam, S. S. Machinability improvement of titanium alloys by cryogenic cooling / S. S. Islam, S. B. Azmi, M. M. Rahman // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2017..
39. Jamil, M. Influence of machining parameters on surface integrity and performance of Ti-6Al-4V alloy in turning / M. Jamil, S. A. Khan, M. A. Siddiqui // *Journal of Manufacturing Processes*. -2019. - 38().
40. Singh, A. K. Machinability study of titanium alloys: A review / A. K. Singh, A. K. Dubey, V. K. Jain // *Materials Today: Proceedings*. - 2018. - 5().
41. Mahapatra, S. S. Machinability of titanium alloys - A critical review / S. S. Mahapatra, S. K. Sahoo, S. Patnaik // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. - 2018. - 5().
42. Li, X. Machining mechanisms and tool wear of titanium alloy Ti-6Al-4V using polycrystalline diamond (PCD) tools / X. Li, L. Chen, J. Cheng // *Materials Science and Engineering: A*. - 2018. - 726().

43. Nguyen, H. M. T. Machining mechanisms and tool wear in drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V / H. M. T. Nguyen, H. Li, X. Li // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. - 2018. - 123().
44. Pramanik, A. Machining and Tool Wear Mechanisms during Machining Titanium Alloys / A. Pramanik, M. N. Islam, A. Basak, G. Littlefair // *Adv. Mater. Res.* - 2013. - 651(). - P. 338–343.
45. Kumar, A. Effect of cutting parameters on surface integrity in machining of titanium alloy / A. Kumar, R. Singh. // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2020. - № 5(9). - P. 9895-9908.
46. Alagumurthi, R. Influence of machining parameters on surface integrity in turning of nickel-based alloy (Inconel 718) / R. Alagumurthi, R. Thirumalaisamy, V. Selladurai // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2021. - № 1(10). - P. 36-49.
47. Amini, R. The effect of machining parameters on surface integrity of Ti-6Al-4V ELI alloy: A comparative study / R. Amini, A. V. Mitrofanov, D. D. Gu // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2019. - № 4(8). - P. 4572-4585.
48. Cui, L. Machinability of titanium alloys: A review / L. Cui, X. Wang, Z. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. - 2020. - 770(). - P. 138501.
49. Rahman, M. A review on machinability study of titanium alloys / M. Rahman, R. Y. Zubiri, M. Rahman // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2021. - 10(). - P. 1238-1247.
50. Fang, F. Recent advances in machinability of titanium and its alloys: A review / F. Fang, W. Xia // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2020. - № 5-8(107). - P. 1855-1878.
51. Fang, J. Machinability of titanium and its alloys: A comprehensive review / J. Fang, H. Chen, X. Wang // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2021. - 56(). - P. 52-81.
52. Kumar, A. Review on tool materials for high-speed machining of Inconel 718 / A. Kumar. - *Journal of Manufacturing Processes*. - 2019. - 44(). - P. 210-223.
53. Özel, T. Recent advances in high-speed machining of hardened steels using coated carbide tools / T. Özel, E. D. İşleyen // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. - 2017. - 121(). - P. 1-14.

54. Kapoor, S. G. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes / S. G. Kapoor. - CRC Press. - 2015.
55. Gao, H. L. Fundamentals of machining and machine tools / H. L. Gao, L. Xi // CRC Press. - 2016.
56. Jahan, K. Effect of machining parameters on cutting force, surface roughness and tool wear in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V / K. Jahan, Z. M. Ripin, S. M. Sapuan // Procedia Manufacturing. - 2019. - 35(). - P. 413-418.
57. Kelkar, T. S. Experimental study of machining parameters in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V with PCD inserts / T. S. Kelkar, S. A. Patil, S. A. Suryawanshi // International Journal of Applied Engineering Research. - 2016. - № 20(11). - P. 10130-10134.
58. Azmi, R. Investigation on tool wear and cutting temperature in milling Ti-6Al-4V with PVD TiN and AlCrN coated carbide inserts / R. Azmi, M. Konneh, A. E. K. Hill, S. Ou // Procedia CIRP. - 2015. - 31(). - P. 178-183.
59. Zhang, N. B. Investigation on tool wear and surface integrity in high-speed milling of Ti-6Al-4V with a coated carbide tool / N. B. Zhang, Z. L. Han, Y. H. Zhang, Z. Y. Wang // Journal of Materials Processing Technology. - 2016. - 238(). - P. 42-53.
60. Rahman, M. Tool wear and surface integrity in high-speed milling of Ti-6Al-4V with coated carbide inserts / M. Rahman, M. Rahman, J. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2018. - № 9-12(96). - P. 4147-4159.
61. Guo, F. Investigation on cutting performance and wear mechanisms of coated carbide tools in high-speed milling of Ti-6Al-4V / F. Guo, D. Wu, Y. Zhang, X. He, Y. Ding // Journal of Materials Processing Technology. - 2017. - 246(). - P. 251-262.
62. Gill, S. S. Investigation of wear mechanisms of uncoated and coated carbide tools in high-speed milling of Ti-6Al-4V / S. S. Gill, M. Ismail, V. B. C. Tan // Journal of Materials Engineering and Performance. - 2017. - № 1(26). - P. 282-290.
63. Klocke, F. Machining of hard materials / F. Klocke, G. Eisenblaetter // CIRP Annals-Manufacturing Technology. - 2017. - № 2(66). - P. 779-802.
64. Arsecularatne, J. A. Tool wear in machining / J. A. Arsecularatne, L. C. Zhang // Springer. - 2017.

- 65.Özel, T. Tool wear and tool life in milling of hardened steels / T. Özel, E. Zeren // *Procedia Manufacturing*. - 2017. – 10(). - P. 1015-1023.
- 66.Nageswaran, S. Tool wear in machining—comprehensive study of wear measurement techniques / S. Nageswaran, D. K. Aspinwall // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2018. – 32(). - P. 282-305.
- 67.Grzesik, W. Wear of cutting tools and its prediction / W. Grzesik. - *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. - 2016. – 15(). - P. 1-14.
- 68.Arunachalam, R. M. Cutting tool wear in machining: a state-of-the-art review and future perspectives / R. M. Arunachalam, M. A. Mannan, N. Parida // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. - 2019.
- 69.Bhushan, S. Tool wear monitoring in machining: A review / S. Bhushan, S. Singh, A. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. - 2018. - № 11(5). - P. 22469-22478.
- 70.Ulutan, D. Review of micro-scale manufacturing technologies / D. Ulutan, O. B. Ozdoganlar // *Precision Engineering*. - 2018. – 61(). - P. 631-652.
- 71.Gindy, N. N. Tool wear mechanisms and wear reduction strategies in high-speed machining of Inconel 718: a review / N. N. Gindy, M. A. Elbestawi // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2017. – 249(). - P. 112-124.
- 72.Lee, W. B. Machining of titanium alloys: a review / W. B. Lee, S. Y. Liang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. - 2018. – 130(). - P. 23-41.
- 73.Lucca, D. A. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges / D. A. Lucca, G. Moroni, W. P. Syam // *Journal of Cleaner Production*. - 2018. – 172(). - P. 2391-2402.
- 74.Niu, Z. Advanced manufacturing processes for micro/nano-structured surfaces: A review / Z. Niu, Y. Huang, L. C. Zhang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. - 2019. – 139(). - P. 41-60.
- 75.Ozturk, E. The effects of cutting parameters on tool wear and surface roughness in machining of Inconel 718 with CBN tool / E. Ozturk, E. Aslan // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2019. - № 4(8). - P. 3868-3878.
- 76.Saha, S. K. Studies on tool wear and surface roughness during high-speed turning of Inconel 718 with CBN tool / S. K. Saha, S. Saha // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2020. - № 4(9). - P. 8337-8349.

77. Singh, G. Investigations on cutting force, tool wear, and surface roughness during turning of Inconel 718 with CBN tool / G. Singh, S. Singh, J. S. Khamba // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2019. - № 5(8). - P. 5839-5850.
78. Mativenga, P. T. Tool wear and chip formation in machining titanium alloy Ti-6Al-4V using CBN and PCD cutting tools / P. T. Mativenga, H. Chaka // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2017. – 28(). - P. 436-445.
79. Ginta, T. L. Performance of CBN and WC-Co tools when machining Ti-6Al-4V alloy / T. L. Ginta, M. A. Hassan, M. Z. Shari // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2018. - № 1-4 (97). - P. 1003-1013.
80. Sun, Y. Comparative study of ceramic and carbide tools in milling of hardened steel / Y. Sun, X. Yan, Z. Chen, X. Yang // *Materials Science Forum*. - 2018. – 929(). - P. 18-23.
81. Li, X. Comparative study of ceramic and carbide tools on cutting force and wear characteristics in turning hardened AISI 4340 steel / X. Li, G. Li, H. Li, J. Li // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2020. - № 11-12(108). - P. 4087-4096.
82. Ginting, Y. R. The study of tool wear on cutting process of IMI 318 using cemented carbide insert / Y. R. Ginting, D. Dharmawan, E. Saputra // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2020. - № 5(1565). - 052020.
83. Jia, D. Study on tool wear and surface integrity of IMI 318 titanium alloy machined by PCBN cutting tools / D. Jia, J. Chen // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2019. - № 9-12(100). - P. 3011-3022.
84. Fang, F. Z. The study of machinability of titanium alloys: a review / F. Z. Fang, Y. F. Sun, H. Wang // *Journal of Materials Engineering and Performance*. - 2018. - № 6(27). - P. 2686-2698.
85. Garg, A. An experimental investigation of machinability characteristics of titanium alloy using PVD coated carbide insert / A. Garg, P. Kumar, R. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. - 2017. - № 2(4). - P. 2173-2179.
86. Correa, E. O. Machining of titanium alloys: A critical review / E. O. Correa, P. Krajnik // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2019. – 43(). - P. 1-36.

87. Dharmawan, D. The analysis of cutting force on machining process of IMI 318 titanium alloy / D. Dharmawan, Y. R. Ginting, E. Saputra // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2020. - № 5(1565). - 052019.
88. Zhang, B. Study on surface quality and tool wear in high-speed milling of Ti-6Al-4V with coated carbide end mills / B. Zhang, J. Wang, Z. Zhu, L. Gao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2018. - № 1-4 (97). - P. 1141-1150.
89. Bagci, E. Evaluation of cutting parameters on tool life and surface roughness in milling of Ti-6Al-4V / E. Bagci, M. Ay // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2018. - № 1-4 (98). - P. 561-571.
90. Datta, S. Experimental analysis of cutting forces, temperature and surface roughness in milling of Ti-6Al-4V using cryogenic cooling / S. Datta, S. Das // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2016. - 22(). - P. 47-56.
91. Kong, C. J. Critical parameters in high-speed machining of titanium alloys: A review / C. J. Kong, M. Rahman, Y. S. Wong // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2017. - № 9-12(91). - P. 3477-3494.
92. Li, X. Experimental research on cryogenic cooling milling of Ti-6Al-4V / X. Li, Y. Liang, X. Cui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2017. - № 5-8(92). - P. 2273-2284.
93. Zhang, J. Effects of machining parameters on tool wear and surface roughness in high-speed milling of Ti6Al4V / J. Zhang, N. Fang, H. Wang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2018. - № 9-12(95)..
94. Fang, N. Tool wear and surface integrity in high-speed milling of titanium alloys: a review / N. Fang, J. Zhang, H. Wang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2019. - № 1-4(101). - P. 1-24.
95. Imran, M. Machinability of titanium alloys: A review / M. Imran, S. S. Park // *Journal of Materials Engineering and Performance*. - 2017. - № 8(26). - P. 3561-3572.
96. Shen, J. A review on the machining of titanium alloys using advanced ceramic cutting tools / J. Shen, F. Kong, Z. Jia // *Ceramics International*. - 2017. - № 17(43). - P. 15095-15106.

97. Uddin, M. S. Cutting tool materials and tool wear: A review / M. S. Uddin, M. N. Islam // *International Journal of Materials Science and Engineering*. - 2017. - № 4(5). - P. 122-131.
98. Wang, X. Recent advances in cutting tool technology / X. Wang, J. Deng // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. - 2019. – 139(). - P. 1-19.
99. Raza, S. M. A review on machining with nanofluids and cutting tools / S. M. Raza, M. Asif // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. - 2019. - № 7(20). - P. 1049-1066.
100. Kumar, P. A review on advanced cutting tools for machining operations / P. Kumar, A. K. Shukla // *Materials Today: Proceedings*. - 2019. – 16(). - P. 2385-2393.
101. Gill, S. S. Metal cutting: Mechanics, modeling and optimization / S. S. Gill, S. Singh // *CRC Press. Boca Raton*. - 2014.
102. Aslantas. Tool Wear in Machining: Mechanisms, Analysis and Control / Aslantas, Kazim // *Journal of Mechanical Science and Technology*. - 2018. - № 30(32). - P. 1037-1046.
103. Roy. Tool Wear Monitoring Techniques for CNC Machine Operations: A Review / Roy, Anish // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. - 2017. - № 5(139). - P. 1-14.
104. Hosseini. A Review on Tool Wear Monitoring System in Machining Processes / Hosseini, Mohammad // *Journal of Manufacturing Processes*. - 2019. - 45(). - P. 267-292.
105. Yen, Y. C. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis / Y. C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, T. Altan // *J. Mater. Process. Technol.* - 2004. - № 1(146). - P. 82–91.
106. Duarte, A. R. Finite element simulation of tool wear in orthogonal cutting of Ti-6Al-4V alloy / A. R. Duarte, P. V. Bayraktaroglu, R. J. B. Oliveira // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2012. - № 6(212). - P. 1399-1410.
107. Ikuta, A. Consideration of the adhesion mechanism of Ti alloys using a cemented carbide tool during the cutting process / A. Ikuta, K. Shinozaki, H. Masuda, Y. Yamane. - 2002. - 127(). - P. 251–255.

108. Wu, J. Investigation on adhesion behavior of Ti-6Al-4V alloy during high-speed milling process / J. Wu, Y. Li, Z. Li, J. Li, W. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2019. - № 1-4(102). - P. 727-735.
109. Wu, X. Investigation on adhesion and chip formation mechanism of Ti6Al4V alloy in orthogonal cutting / X. Wu, W. Lu, Y. Zhang, Z. Liu, Z. Yin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2017. - № 5-8 (93).
110. Huang, H. A study on the mechanism of Ti-6Al-4V alloy adhesion and its relationship with cutting temperature / H. Huang, Y. He, X. Zhang, X. Wang // Journal of Materials Processing Technology. - 2017. - № 246(). - P. 41-52.
111. Chandrasekar, M. Diffusion wear behavior of TiN and TiAlN coated carbide tools during high-speed turning of AISI 4140 steel / M. Chandrasekar, V. Sivaramakrishnan // Materials Today: Proceedings. - 2018. - № 7(5). - P. 15107-15115.
112. Xie, X. Wear mechanisms of AlTiN-coated carbide tools in high-speed milling of Ti-6Al-4V / X. Xie, L. Yang, X. Zhao, X. Huang // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2017. - № 1-4(88). - P. 761-770.
113. Kim, H. Y. Effects of minimum quantity lubrication and air cooling on tool wear and chip formation in high-speed end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V / H. Y. Kim, K. S. Lee, Y. S. Pyoun // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. - 2014. - № 11(15). - P. 2351-2358.
114. Yang, M. Investigation of tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V under various cooling/lubrication conditions / M. Yang, Y. Li, Y. Wang // Journal of Materials Processing Technology. - 2015. - № 215(). - P. 47-56.
115. Ma, H. T. Effect of cooling/lubrication on cutting forces and tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V / H. T. Ma, Y. Q. Chen, J. Wang // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2016. - № 5-8(85). - P. 1355-1365.
116. Park, S. W. Diffusion wear of PVD-coated tools in high-speed milling of titanium alloy / S. W. Park, S. H. Lee, Y. S. Pyoun // Wear. - 2011. - № 5-6(271). - P. 826-833.
117. Alam, M. T. Diffusion wear in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V with coated carbide tools / M. T. Alam, M. Rahman // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2014. - № 1-4(71). - P. 49-60.

118. Fauzi, A. R. A. Diffusion wear of uncoated and coated carbide tools in milling titanium alloy / A. R. Fauzi, T. K. A. Rahman, M. J. M. Ridzuan // *Advanced Materials Research*. - 2014. - 845(). - P. 536-540.
119. Alam, M. T. Investigation of tool failure modes and surface integrity in high-speed milling of Ti-6Al-4V with coated carbide tools / M. T. Alam, M. Rahman, N. N. Ngo // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2015. - № 5-8(77). - P. 1217-1229.
120. Alam, M. T. Failure mechanisms of coated carbide tools in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V at high speed / M. T. Alam, M. Rahman // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2014. - № 9-12(75). - P. 1681-1692.
121. Sayed, S. J. Cutting forces and wear behavior of TiAlN and TiAlN/AlTiN coated carbide inserts when milling Ti-6Al-4V titanium alloy / S. J. Sayed, A. Attia, M. S. ElBanna // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. - 2016. - № 6(38). - P. 1793-1802.
122. Lin, J. Cutting performance and wear mechanisms of coated carbide inserts in high-speed milling of titanium alloy Ti-6Al-4V / J. Lin, K. Li, Z. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2013. - № 1-4(68). - P. 743-752.
123. Wang, L. A review on PVD and CVD coatings for rotating cutting tools / L. Wang, X. Xu, Y. Zhang, J. Wu // *Surface and Coatings Technology*. - 2019. - 357().
124. Roca, A. I. *Grinding of Hard and Brittle Materials* / A. I. Roca, R. B. Podgornik // Springer International Publishing. - 2016.
125. Zhou, T. Effects of Grinding Processes on the Microstructure and Adhesion of DLC Coating on WC-Co Substrates / T. Zhou, Y. Hu, Z. Li // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2017. - 247(). - P. 115-120.
126. Liu, K. Influence of Different Grinding Processes on the Adhesion of DLC Coating on Cemented Carbide Cutting Tools / K. Liu, F. Wang, X. Li // *Journal of Materials Engineering and Performance*. - 2016. - № 11(25). - P. 4824-4834.
127. Tang, Y. Influence of Grinding Processes on the Microstructure and Adhesion of TiAlN Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools / Y. Tang, X. Zhou, J. Cheng // *Surface and Coatings Technology*. - 2018. - 349(). - P. 214-221.

128. Zhang, S. Nano-multilayered self-adaptive hard PVD coatings for dry high-performance machining / S. Zhang, J. Xu, C. Wang, Y. Fu, P. Jiang // *Surface and Coatings Technology*. - 2017. – 315(). - P. 9-17.
129. Deng, X. Development of a novel TiAlN/CrN nano-multilayered coating for dry machining of Ti-6Al-4V / X. Deng, L. Wang, Y. Jiang, Z. Ma // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2019. – 787(). - P. 295-304.
130. Bhushan, B. Development of nano multilayer PVD coatings for dry machining applications / B. Bhushan, A. Dhir // *Surface Engineering*. - 2019. - № 10(35). - P. 807-821.
131. Rana, M. Fabrication of nano-multilayered TiN/TiAlN coating on cemented carbide cutting tool insert and evaluation of its wear performance in dry machining of AISI 1040 steel / M. Rana, I. Manna, K. Das, S. K. Biswas // *Surface and Coatings Technology*. - 2018. - 351(). - P. 259-270.
132. Chen, Z. Preparation and properties of nano-multilayered TiN/CrN coatings for high-speed dry machining of Inconel 718 / Z. Chen, B. Chen, Z. Liu, H. Zhou, H. Zhao, W. Zhang // *Surface and Coatings Technology*. - 2021. - 411(). - 127155.
133. Liu, Q. Investigation of the tribological behavior of nano-multilayered TiAlN/TiSiN coatings under dry sliding wear condition / Q. Liu, Z. Zhao, X. Zhu, B. Guo // *Surface and Coatings Technology*, - 2020. - 383(). - 126508.
134. Li, S. Effect of self-adaptive nanoscale multilayer coatings on the cutting performance of carbide cutting tools in dry high-speed machining / S. Li, Z. Wang, F. Huang, X. Zhou, D. Guo // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2020. - № 1-2(107). - P. 231-238.
135. Yang, Z. Preparation and wear resistance of nano-multilayered TiN/TiAlN coatings for dry cutting of hardened steel / Z. Yang, W. Chen, Y. Wang, D. Wu, H. Jiang // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. - 2018. - № 17 (29). - 15017-15023.
136. Zhang, H. A TiAlCrSiN nano-multilayer coating with low friction coefficient and high wear resistance for high-speed dry machining / H. Zhang, X. Wang, J. Xu, Y. Zhang, B. Liu, P. Jiang // *Surface and Coatings Technology*. - 2020. – 401(). - 126104.

137. Wang, X. Nano-multilayered TiAlN/AlCrSiN coating with self-lubrication for high-performance dry machining / X. Wang, S. Zhang, H. Zhang, J. Xu, P. Jiang // *Surface and Coatings Technology*. - 2019. – 377(). - 124888.
138. Li, L. Multicomponent and multiphase hard coatings deposited by physical vapor deposition: a review / L. Li, Y. Li, X. Li, S. Li, L. Wang // *Surface Engineering*. - Jan. 2020. - № 1(36). - P. 1-25.
139. Guerriero, M. Multicomponent and multiphase hard coatings for tribological applications: A review / M. Guerriero, M. Pavese, S. Pastore, S. Fina, F. Biamino, C. Badini // *Coatings*. - May 2019. - № 5(9). - P. 315.
140. Zhang, Y. Self-organization and structural adaptation in high-speed machining of aerospace alloys: A review / Y. Zhang, Y. Liu, Y. Huang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - Aug. 2017. - № 9-12(92). - P. 3213-3233.
141. Cao, J. Self-organization and adaptive response during cutting of metal sheets: A review / J. Cao, L. Wang, J. Cheng // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - Apr. 2017. - № 5-8(91). - P. 1669-1692.
142. Santos, D. A. D. Tribofilm formation in metal cutting: A review / D. A. D. Santos, M. A. R. Domingues, R. M. Natal // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - Apr. 2018. - № 5-8(99). -P. 1361-1387.
143. Ramesh, B. Recent advances in tribofilm formation in machining and their effects on cutting performance: A review / B. Ramesh, V. Vijayaraghavan // *Journal of Manufacturing Processes*. - Jan. 2019. - 38(). - P. 48-68.
144. Luo, J. A review on the tribofilm formation mechanisms, structures and their effects on tool wear and cutting performance during machining / J. Luo, Y. Liu, Y. Huang // *Journal of Materials Processing Technology*. - Dec. 2019. - 267(). - P. 313-333.
145. Zhang, S. Y. Tribofilm formation in metal cutting processes: A review / S. Y. Zhang, S. P. Luo, K. Liu // *Tribology International*. - May 2019. - 137(). - P. 174-192.
146. Yan, J. Recent progress in development of PVD and CVD coatings for cutting tools / J. Yan, Q. Song, H. Zhang // *Surface Engineering*. - 2021. - № 2(37). - P. 95-112.

147. Thakur, A. Coating techniques and developments in cutting tool inserts: A review / A. Thakur, A. Kumar, R. Kumar // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. - 2018. - № 9(7). - P. 73-78.
148. Guo, R. High-temperature deformation behavior of titanium alloys / R. Guo, L. Zhang, T. Huang // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. - 2017. – 119(). - P. 1-34.
149. Wang, H. The development of high-temperature titanium alloys for aeroengine applications: A review / H. Wang, C. Li, Z. Zhang // *Journal of Materials Science & Technology*. - 2019. - № 10(35). - P. 2001-2012.
150. Fan, H. Nanostructured coatings for cutting tools in machining titanium alloys: A review / H. Fan, H. Luo, B. Zhang, Y. Zhang // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2020. - № 4(9). - P. 8261-8271.
151. Colombo, P. Nanostructured coatings for cutting tools in machining of titanium alloys / P. Colombo, G. Strano // *Surface and Coatings Technology*. - 2019. – 359(). - P. 622-635.
152. Li, Z. Research progress of nanostructured coatings for cutting tools in machining of titanium alloys / Z. Li, H. Zhao, M. Chen, X. Zhang, H. Wang, J. Wang // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2019. – 80(). - P. 162.
153. Li, Z. Recent progress in research on nanostructured coatings for cutting tools in machining of titanium alloys / Z. Li, H. Li, M. Li, X. Li, S. Wang, L. Zhang // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2018. - № 1-4 (99). - P. 451-463.
154. Jawaid, A. Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy / A. Jawaid, S. Sharif, S. Koksai // *J. Mater. Process. Technol.* - Mar. 2000. - № 1–3(99). - P. 266–274.
155. Suresh, R. Experimental investigation of surface integrity and tool life during machining of Ti6Al4V using PVD coated carbide tool / R. Suresh, S. Selvaraj // *Materials Today: Proceedings*. - 2019. - 18(). - P. 1962-1971.
156. Rajyalakshmi, G. Tool life and surface integrity study on machining Ti6Al4V using PVD coated carbide tool / G. Rajyalakshmi, K. Ravikiran // *Materials Today: Proceedings*. - 2019. – 18(). - P. 1962-1971.

157. Rahman, M. Effect of PVD coating on tool life and surface quality during machining of Ti6Al4V alloy using carbide insert / M. Rahman, S. A. Raza // *Journal of Mechanical Science and Technology*. - 2017. - № 3(31). - P. 1313-1323.
158. Özel, T. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations / T. Özel, M. Sima, A. K. Srivastava, B. Kaftanoglu // *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* - 2010. - № 1(59). - P. 77–82.
159. Haron, C. H. C. Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S / C. H. C. Haron, A. Ginting, H. Arshad // *J. Mater. Process. Technol.* - 2007. - № 1–3(185). - P. 77–82.
160. Cherukuri, R. Lathe Turning of Titanium Using Pulsed Laser Deposited, Ultra-Hard Boride Coatings of Carbide Inserts / R. Cherukuri, P. Molian // *Mach. Sci. Technol.* – 2003. - № 1(7). – P. 119–135.
161. Weissmann, V. Comparison of Single Ti6Al4V Struts Made Using Selective Laser Melting and Electron Beam Melting Subject to Part Orientation / V. Weissmann, P. Drescher, R. Bader, H. Seitz, H. Hansmann, N. Laufer // *Metals*. – 2017. – 91(7).
162. Sames, W. J. et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W. J. Sames. – *International Materials Reviews*. – 2016. – 61(5). – P. 315-360.
163. Федоров, С.В. Синтез тугоплавких карбидных и нитридных фаз при поверхностном электронно-пучковом легировании инструментальных материалов / С. В. Федоров, Мин Хтет Со // *Станочный парк*. - октябрь 2016. - № 10(139). – С. 36.
164. Федоров, С.В. Исследование процесса сверления синтеграната твердосплавными сверлами с комплексным модифицированием режущей части / С.В. Федоров, Мин Хтет Со // *Всероссийский конкурс, научно-технического творчества молодежи, НТТМ*. – 2014.
165. Федоров, С.В. Оптимизация режимов обработки низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком при комплексной поверхностной обработке сменных многогранных режущих пластин из сплава ВК8 / С.В. Федоров, Мин

Хтет Со // Молодежная научно-практическая конференция «Автоматизация и информационные технологии» АИТ–2014.

166. Федоров, С.В. Электронно-пучковое модифицирование поверхности материалов / С. В. Федоров, Мин Хтет Со // Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», «VacuumTechExpo 2017» 11.4.2017 Москва, КВЦ «Сокольники».

167. Fedorov, S.V. Comprehensive surface treatment of high-speed steel tool / S.V. Fedorov, S.V. Aleshin, Min Htet Swe // *Mechanics & Industry*. – 2017. - № 7 (18).

168. Grigoriev, S.N. Complex surface modification of carbide tool by NbHfTi alloying followed by hardfacing (TiAl)N/ S.N. Grigoriev, S.V. Fedorov, M.D. Pavlov, Ye Min Soe, // *Journal of Friction and Wear*. – 2013. – № 1(34). – С. 14-18.

169. Федоров, С.В. поверхностное упрочнение изделий из цветных сплавов интерметаллидными фазами, синтезированными путем поверхностной электронно-пучковой обработки / С.В. Федоров, А. П. Шевчуков, Мин Хтет Со // V Международную научную конференцию Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении Имящ ран. - 8–10 2017г.

170. Gurin V.D. The study of force parameters when end milling for diagnosing their condition/ V.D. Gurin, S.N. Grigoriev, S.V. Aleshin, V.A. Semenov // *Journal of mechanical engineering*. – 2005. – № (9). – P. 19-22.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по ОД и МП

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

к.т.н., доцент



Бильчук М. В.

30 апреля 2025г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Тета У «Улучшение обрабатываемости сплавов на основе титана путем рационального выбора поверхностной обработки инструмента»

Результаты работы, относящиеся к диссертационному исследованию, были успешно внедрены на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» в качестве дополнительного материала к курсу лекций «Основы вакуумной технологии» и «Ионно-плазменная обработка инструментов и деталей машин», которые читают доценты Федоров С.В. и Мельник Ю.А. Использование результатов работы позволило значительно расширить представление обучающихся о методиках выбора составов износостойких покрытий для улучшения обрабатываемости конкретных материалов.

Введение дополнительного раздела в использование новых материалов в лекционных курсах положительно способствует расширению кругозора и формированию компетенции ПК-16: способность осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств, участвовать в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий, выполнять мероприятия по выбору и эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств диагностики, автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов для их реализации.

Заведующий кафедрой
«Высокоэффективные технологии обработки»
д.т.н., профессор

С. Н. Григорьев

Научный руководитель
«Высокоэффективные технологии обработки»
к.т.н., доцент

С. В. Федоров