

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»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

**Научный руководитель:** **Федоров Сергей Вольдемарович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

**Официальные оппоненты:** **Галиновский Андрей Леонидович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**Вайнштейн Дмитрий Львович**  
кандидат физико-математических наук, заместитель директора общества с ограниченной ответственностью Научно-техническое внедренческое предприятие «Поверхность», г. Москва

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится 01 июля 2025 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/tet-u/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.332.01, к.т.н.

Е.С. Сотова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. Сложность металлообработки 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.

Тем не менее, существует трудность в нахождении сопоставлений этих методов в контексте определения условий, при которых каждый из них может проявить свою эффективность. Наблюдается нехватка исследований, касающихся взаимосвязи между параметрами резания, уровнем тепловыделения и отводом тепла, интенсивностью взаимодействий заготовки с инструментом и изменениями температуры в процессе 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.

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

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 были разработаны антифрикционные слои покрытий, которые могут быть нанесены различными 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 многочисленных исследованиях уделяется внимание механизмам и причинам износа инструмента с покрытиями в различных условиях обработки. На основе анализа этих работ можно сделать вывод о возможности дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента при обработке титана, применяя многослойные наноструктурированные износостойкие покрытия с тщательно подобранной структурой и химическим 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.

**Задачи исследования**, которые решались 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 Амонтона.
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 комбинации 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. выявлении того, 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 исследования.** Ключевые результаты работы были представлены на нескольких конференциях, где также происходило обсуждение этих результатов: Materials Science Forum, v. 1037, p. 245–250, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.245 (Ялта); Research & Development in material science, v. 18(3), RDMS.000937.2023, doi: 10.31031/RDMS.2023.18.000937; 15th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP-2021), p. 145 (Екатеринбург); 16th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows Coatings deposition (EFRE-2022), p. 313 (Томск); XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению», посвященная 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова, p. 83–86 (Москва); научный электронный журнал «Инновации. Наука. Образование», 2024, № 103 (июнь), с. 103–117, <https://innovjourn.ru/nomer/103-nomer/>; Инженерный вестник Дона, 2024, № 10, <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9548>.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 1 статья – в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, 3 публикации в журналах, входящих в РИНЦ и 3 публикации в сборниках материалов международных научно-технических конференций.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационное исследование относится к научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», затрагивая пункты 3 и 6 указанного паспорта.

**Структура диссертации.** Научный труд включает во себе введение, четыре главы, обобщающие выводы и список использованных источников, состоящий из 170 наименований. Основное содержание работы представлено на 124 страницах напечатанного текста и содержит 41 иллюстраций и 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** подробно рассматривается актуальность темы, определяются цели исследования, акцентируется внимание на новизне ставящихся научных задач и их практическом значении. Также в этом разделе четко формулируются ключевые тезисы, которые будут представлены на защите.

**В первой главе** выполнен всесторонний аналитический обзор, основанный на литературу, посвященный характеристикам износа режущих инструментов и проблемам, с которыми сталкиваются при обработке титановых сплавов. Обсуждаются различные методы, которые способствуют повышению их износостойкости. В работе также затрагиваются технологии поверхностного упрочнения титановых сплавов и

варианты их применения в практике. Кроме того, анализируются основные технологии модификации поверхности твердых сплавов и оценивается их эффективность при обработке титана и других конструкционных материалов. Также представлен современный обзор методов нанесения износостойких покрытий на твердые сплавы, используемые для работы с титаном. Применение титана и его сплавов в последнее время стало заметно расширяться в самых различных отраслях промышленности из-за их уникальных свойств. Металлы, особенно титановые сплавы, находят широкое применение в аэрокосмической отрасли для производства различных компонентов двигателей и аэродинамических конструкций, где их доля может достигать 30–40 % от общей массы изделия, благодаря своей выдающейся коррозионной стойкости. Наиболее популярным является сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V), поскольку на его долю приходится 60 % всего производства титана. Ниже 882 °С титан представляет собой  $\alpha$ -фазу с гексагональной кристаллической структурой. При температурах выше 882 °С титан превращается в более пластичную  $\beta$ -фазу, позволяющую более легкое возникновение локальных деформаций. Температура плавления титана 1677 °С.

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. Титановые сплавы считаются труднообрабатываемыми материалами из-за присущих им свойств.

С целью увеличить период стойкости режущих инструментов, предназначенных для обработки титана. Инструментальные материалы, которые показали превосходные рабочие характеристики при обработке, стали, чугуна и даже труднообрабатываемых никелевых сплавов, оказались малоприменимыми для улучшения обрабатываемости 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. Под износом инструмента понимают изменение формы инструмента от его первоначальной формы, в процессе резки, в результате постепенной потери инструментального материала или деформации. 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.

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.

Основным фактором, сказывающимся на обрабатываемости титановых сплавов, является диффузионный износ, возникающий из-за высокой температуры резания, вызванной низкой теплопроводностью титана. Далекое 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 комбинированных методов воздействия на поверхность инструмента.

**Во второй главе** представлено описание материалы и оборудование, используемые при проведении исследований. Для оценки влияния структуры титанового сплава на его обрабатываемость были изучены заготовки из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученные традиционным способом послековки, а также спеченные из порошка методом селективного электронно-лучевого плавления по аддитивной технологии.

Сплавы, подобные ВТ6 (Ti-6Al-4V), применяются как в отожженном, так и в термически упрочненном состоянии. Процесс отжига прутков, поковок и штамповок обычно осуществляется при температуре в диапазоне 750–900 °С. Механические характеристики сплава ВТ6 существенно зависят от типа и параметров его структуры.

Анализ обрабатываемости деталей, изготовленных с помощью аддитивных методов, проводился в сравнении с коваными заготовками, прошедшей неполный отжиг при температуре 680 °С в течение часа с воздушным охлаждением. Твердость материала составила 275 НВ. Структура кованой заготовки отличалась вытянутыми в направлении деформации частицами  $\alpha$ -фазы, а также смешанной матрицей  $\beta$ -превращений, представляющей собой глобулярно-пластинчатую форму. Размер  $\alpha$ -частиц составил примерно 5 мкм, и их форма была близка к равноосной (рис. 1а).

Проведен анализ влияния аддитивного изготовления металлических деталей из титановых сплавов на их микроструктуру. Обнаружено, что процессы электронно-лучевого плавления значительно изменяют микроструктуру сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) по сравнению с литыми или коваными материалами. В процессе 3D-печати сплав Ti-6Al-4V претерпевает фазовые превращения, которые оказывают существенное влияние на механические свойства конечных продуктов. Использование установки Arcam A2 с селективным электронно-лучевым плавлением и предварительным нагревом платформы из нержавеющей стали до 750 °С 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 полученной заготовки составила 318 НВ, а также микроструктура объекта, включающая преимущественно  $\alpha$ -фазу и незначительное включение  $\beta$ -фазы (2–3 %) с измеренной толщиной пластин альфа-фазы, подтверждают важность контроля процесса формирования материала (рис. 1б).

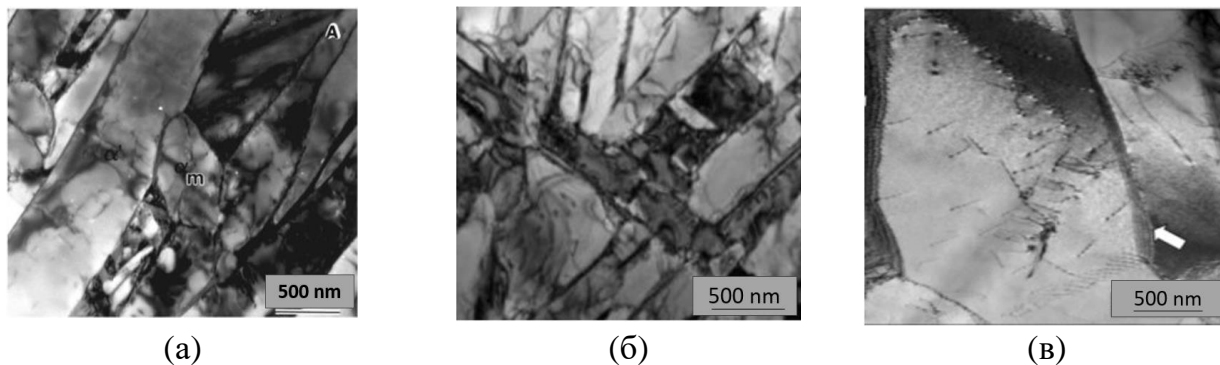


Рис. 1. Микроструктура заготовок из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), полученных ковкой (а) и методом электронно-лучевого плавления (б), и сплава ВТ18У, полученной ковкой (в)

Сплав VT18У принадлежит к системе Ti-Al-Zr-Mo-Nb-Si и представляет собой высокопрочный псевдо- $\alpha$ -сплав, обладающий высокой устойчивостью к ползучести и высокой прочностью при температурах 550–600 °С, что делает его одним из самых термостойких титановых сплавов (рис. 1в). Отжиг заготовки при температуре 900 °С в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе привел к однородному пространственному распределению  $\alpha$ -пластин в структуре сплава, которые были разделены тонкими прослойками  $\beta$ -фазы.

В процессе фрезерования был задействован вертикально-фрезерный станок WF-1, снабженный динамометром от Kistler (Швейцария) и работающий на программном обеспечении DinoWare (рис. 2а).

Во время испытаний радиус округления режущей кромки контролировался с помощью прибора MikroCAD premium+ от GFM (Германия) (рис. 2б). 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. 2в), чтобы визуально отслеживать прогрессирующий износ инструмента. Программное обеспечение NIS-Elements Microscope Imaging Software использовалось для записи изображений.

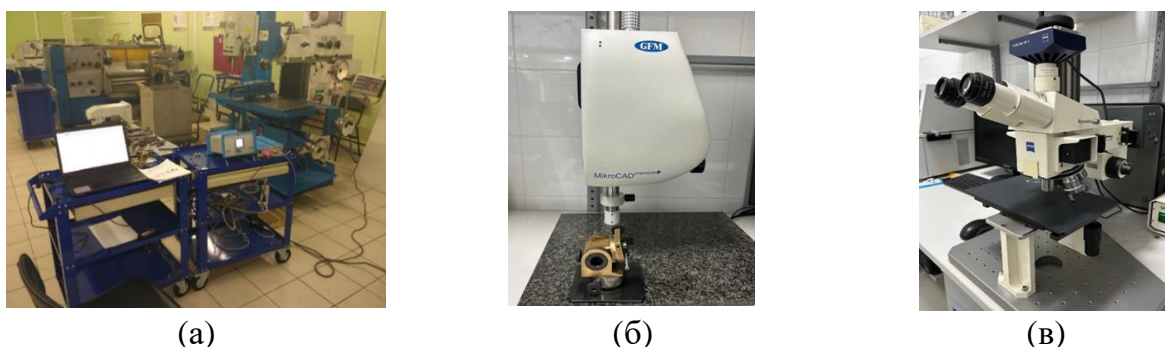


Рис. 2. Аппаратура динамометра Kistler (заготовки из сплава, установленные на чувствительную платформу динамометра) (а) и микроскопы, используемые для исследования износа инструмента MikroCAD premium+ (б) и AxioCam MRc5 (в)

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.

**В третьей главе** сравнивалась обрабатываемость заготовок из сплава VT6, полученных ковкой и методом селективного электронно-лучевой плавления, при фрезеровании быстрорежущим инструментом с поверхностной обработкой. Вычислялся коэффициент трения Амонтона  $\mu$ , который играет важную роль в оценке физических воздействий на контактной поверхности режущего инструмента. Значение коэффициента  $\mu$  зависит как от материалов, которые находятся в контакте, так и от режима взаимодействия, определяющего температурное поле, возникающее в тонком приповерхностном слое.

Моделирование процесса концевое фрезерования осуществлялось при помощи экспериментальной металлообрабатывающей пластины (рис. 3а и 3б).



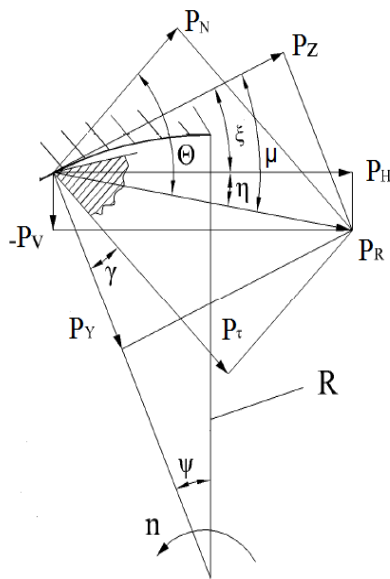
(a)



(б)

Рис. 3. Заготовки из сплава ВТ6, установленные на чувствительную платформу динамометра (а), режущая пластина P6M5 и специальная державка (б)

Основная составляющая,  $P_z$ , создает крутящий момент, преодолевающий сопротивление резанию. 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. Равнодействующую силу ( $P_{yz}$ ) можно разложить на силу отжима ( $P_v$ ), направленную перпендикулярно скорости подачи  $V_s$ , и силу  $P_h$ , действующую в направлении  $V_s$  (рис. 4).



$$P_z = \sqrt{P_v^2 + P_h^2} \cdot \cos \left( \xi \pm \arctg \frac{P_v}{P_h} \right);$$

$$P_y = \sqrt{P_v^2 + P_h^2} \cdot \sin \left( \xi \pm \arctg \frac{P_v}{P_h} \right);$$

Рис. 4. Силы, действующие на зуб концевой фрезы в модели встречного фрезерования и формулы расчета составляющих силы резания;  $\xi$  – определяет угол вращения точки прикрепления результирующего вектора  $R_{vh}$ . Он непосредственно связан с углом поворота зуба фрезы  $\psi$  в данный момент

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, значения  $P_y$  и  $P_z$  могут быть вычислены по формулам, представленным на рис. 4.

На рис. 5 представлены рассчитанные мгновенные усилия сдвига  $P_z$  и  $P_y$ , полученные в процессе торцевого фрезерования с использованием экспериментальной режущей пластины из быстрорежущей стали. Графики 5а и 5в иллюстрируют

расчетные значения мгновенных сил  $P_z$  и  $P_y$  в процессе концевой фрезерования пластины, изготовленной из быстрорежущей стали. Сравнение представленных значений даст возможность определить, как структура титанового сплава влияет на составляющие сил резания. В процессе фрезерования заготовки, подвергнутой обработке электронно-лучевым плавлением, сила резания  $P_z$  увеличивается примерно на 15 %, в то время как сила  $P_y$  уменьшает свои показатели на 20 % по сравнению с обработкой ковальной заготовки.

В ходе исследования влияния упрочненного слоя на режущем инструменте на силу резания при обработке различных материалов стоит отметить, что применение инструмента с покрытием приводит к заметному сокращению силы резания  $P_z$ . В частности, при обработке ковальной заготовки наблюдается уменьшение этой силы в два раза (согласно рис. 5а и 5б), тогда как при фрезеровании сплава, полученного с использованием метода электронно-лучевого плавления, снижение составляет уже в 2,5 раза (показано на рис. 5в и 5г).

Кроме того, согласно проведенным исследованиям (рис. 5б и 5г), использование инструмента, выполненного из быстрорежущей стали с комбинированной обработкой, позволяет существенно сблизить значения компонентов сил резания для рассматриваемых заготовок. Но из-за того, что материал, полученный электронно-лучевым плавлением более твердый, наблюдается некоторое повышение осевой составляющей силы резания  $P_x$ .

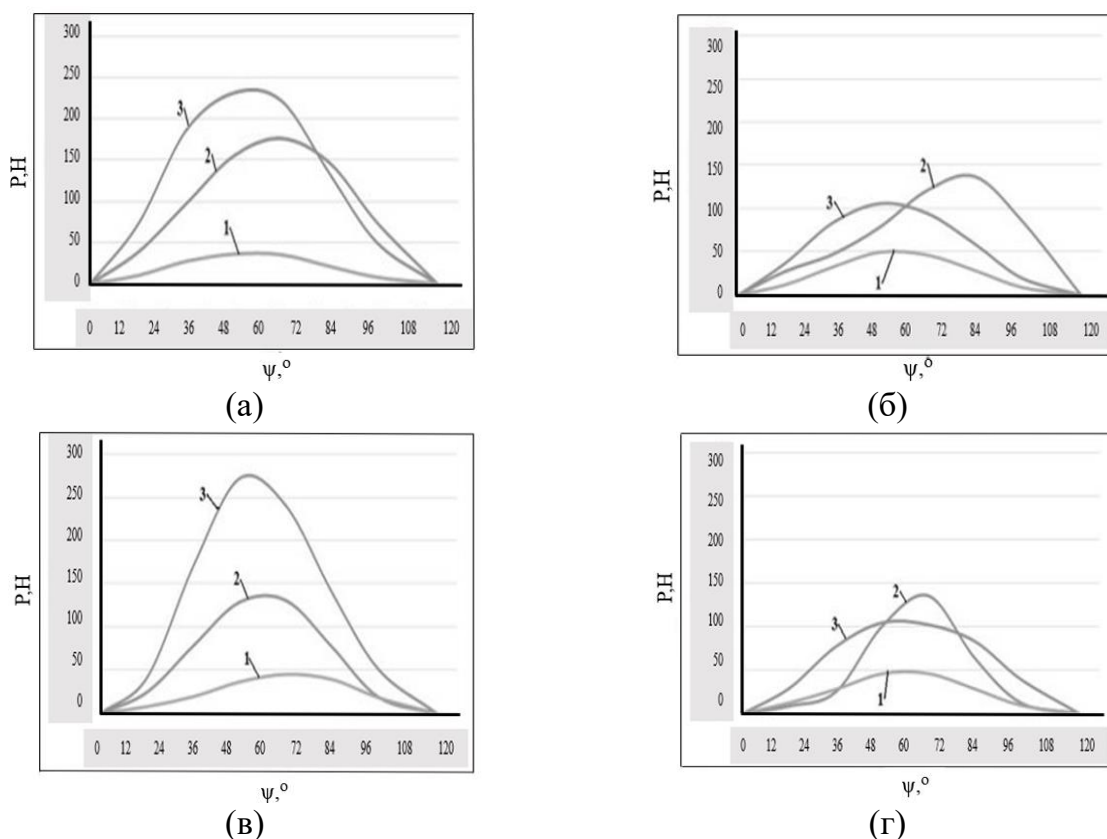


Рис. 5. Данные о мгновенных силах резания (1 –  $P_x$ , 2 –  $P_y$ , 3 –  $P_z$ ) при концевом фрезеровании сплава Ti-6Al-4V представлены в зависимости от угла поворота зуба фрезы: а – обработка ковальной заготовки инструментом без покрытия; б – обработка электронно-лучевое плавление заготовки инструментом без покрытия; в – обработка ковальной заготовки инструментом с комбинированной поверхностной обработкой; г – обработка электронно-лучевое плавление заготовки инструментом с комбинированной поверхностной обработкой

Коэффициент трения  $\mu$  определяется как отношение касательной силы  $P_\tau$  к нормальной силе  $P_n$ , действующей на переднюю поверхность инструмента, в соответствии с законом Амонтона. Тангенциальная сила  $P_\tau$  определялась в соответствии со следующей зависимостью:

$$P_\tau = P_y \cos\gamma$$

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

где  $R'$  – является результирующей силой, действующей под прямым углом к основной режущей кромке. Можно считать, что силовые факторы, которые воздействуют на кромку резцов, не имеют критического значения и не влияют на точность расчета коэффициента трения  $\mu$  (табл. 1).

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

где  $\omega$  – мгновенный угол поворота фрезы.

Таблица 1.

Средние значения компонент сил резания и вычисленные по ним показатели коэффициента трения Амонтона  $\mu$ .

заготовка / инструмент	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$\mu$
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

Процессы упругопластической деформации слоя металла, подминаемого под резец, могут значительно увеличить касательную составляющую и повысить значение коэффициента трения  $\mu$  значительно более 1. Тем не менее, удельная сила трения, инвариантная к условиям резания, определяется в основном свойствами заготовки и в какой-то части способна определять обрабатываемость материала. Изменение среднего коэффициента трения Амонтона во время цикла фрезерования приведены на рис. 6.

Следует также подчеркнуть, что силы, действующие на торцевую часть зубьев фрезы, часто считаются незначительными. Их воздействие на установление значения коэффициента трения  $\mu$  в ходе механической обработки инструмента, как с острым лезвием, так и без фаски, а также на износ рабочих кромок, в большинстве случаев является минимальным. Значения угла поворота фрезы  $\psi$ , при которых будет осуществляться резание на полную ширину  $B$ , составило приблизительно от 7 до 11°. Анализ коэффициента трения Амонтона  $\mu$  при фрезеровании инструментом из исходного инструментального материала кованой заготовки позволяет утверждать, что этот коэффициент изменяется 0,65–0,90.

При применении инструмента с комбинированной поверхностной обработкой на начальном этапе происходит снижение адгезионного взаимодействия у инструмента с покрытием. Однако при увеличении номинальной толщины снимаемого слоя 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, наблюдается увеличение коэффициента  $\mu$  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, что приводит к скалыванию мелких частиц инструментальной стали, что также способствует интенсивному износу.

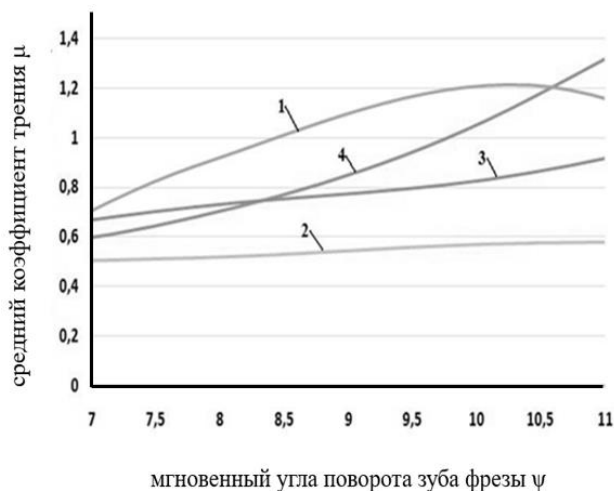


Рис. 6. Средний коэффициент трения Амонтона для фрезерования сплава Ti-6Al-4V (BT6):

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 кованой заготовки резцом из стали P6M5; 4 – обработка кованой заготовки резцом из стали P6M5 с комбинированной поверхностной обработкой

Чтобы избежать этого неблагоприятного явления, кромку инструмента желательно сформировать путем повторного шлифования или лазерной абляции, что уменьшит радиус  $\rho$  и увеличит адгезионную составляющую трения на передней поверхности. Материал, созданный с использованием метода электронно-лучевого плавления, характеризуется более высокой твердостью и низкой пластичностью. При резании данного материала остро заточенным инструментом практически не происходит образования нароста, и коэффициент трения  $\mu$  остается в пределах 0,5–0,6. Однако при использовании фрезы с комбинированной обработкой поверхности значение  $\mu$  возрастает до 1,2 из-за упругопластической деформации заготовки, после чего стабилизируется.

**В четвертой главе** представлено влияние взаимодействия материалов износостойких покрытий и титанового сплава BT18У на стойкость твердосплавных концевых фрез с поверхностной обработкой.

Покрытия, 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, которые определялись при сверлении титанового сплава инструментом с различными покрытиями.

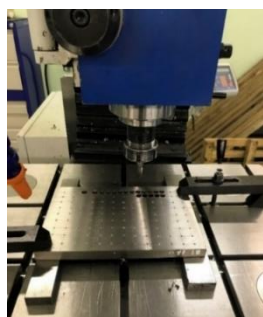
В процессе сверления, из-за плохой теплопроводности титана, диаметр обрабатываемого отверстия несколько уменьшается за счет теплового расширения вследствие нагрева заготовки, что приводит к подклиниванию инструмента. В результате в первую очередь повреждается ленточка и на ней образуется большое количество наростов, 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 сказывается 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. Эксперименты проводились на группе 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 ( $2\phi = 118^\circ$ ,  $\omega = 30^\circ$ ) (рис. 7б, табл. 2). Сверление производилось на фрезерном станке KNUTH WF-1 (режим резания: 2000 об/мин, подача 53 мм/мин) с использованием динамометра Kistler (Швейцария) с применением СОЖ (рис. 7а).

Нитридные износостойкие покрытия с различным содержанием хрома, алюминия и титана TiN, (CrAlSi)N, (CrAlSi)N+(TiCr)N, (TiAlSi)N, (TiCr)N толщиной 4 мкм были нанесены на установке Platit π311+DLC. Дополнительно на часть сверл сверху было нанесено DLC покрытие в атмосфере ацетилена с добавлением тетраметилсилана толщиной 2 мкм, а часть сверл была подвергнута процедуре эпиламирования в кипящей композиции 6SFC-180-05 при температуре 55 °С в течение 40 минут.

Покрытие DLC, обладающее антрацитовым цветом, отличается высокой прочностью и низким коэффициентом трения. Оно в значительной степени состоит из графитных алмазоподобных кластеров размером в несколько нанометров. Благодаря своей слоистой алмазоподобной структуре это покрытие демонстрирует исключительную прочность.

Эпилам (6SFC) – это смазочная полимерная смесь, образующая на поверхности защитную нанопленку до 100 нм, обладающую многофункциональными свойствами.



(а)



(б)

Рис. 7. Заготовка из сплава ВТ18У, установленная на чувствительную платформу динамометра (а) и используемое сверло (б)

Радиус округления режущей кромки инструмента контролировался на приборе MicroCad lite (GFM, Германия). Налипы на ленточке сверла исследовались при помощи стилусного профилометра Dektak XT (Bruker, США).

Таблица 2.

#### Характеристики инструмента

<b>Сверло спиральное короткой серии, сплав KFM39 (9 % Co)</b>	
Диаметр режущей части, D	8,665 мм
Задний угол у уголка, $\alpha$	17,42°
Передний угол у уголка, $\gamma$	23,92°
Угол при вершине, $2\phi$	125,80°
Угол спирали, $\omega$	32,28°

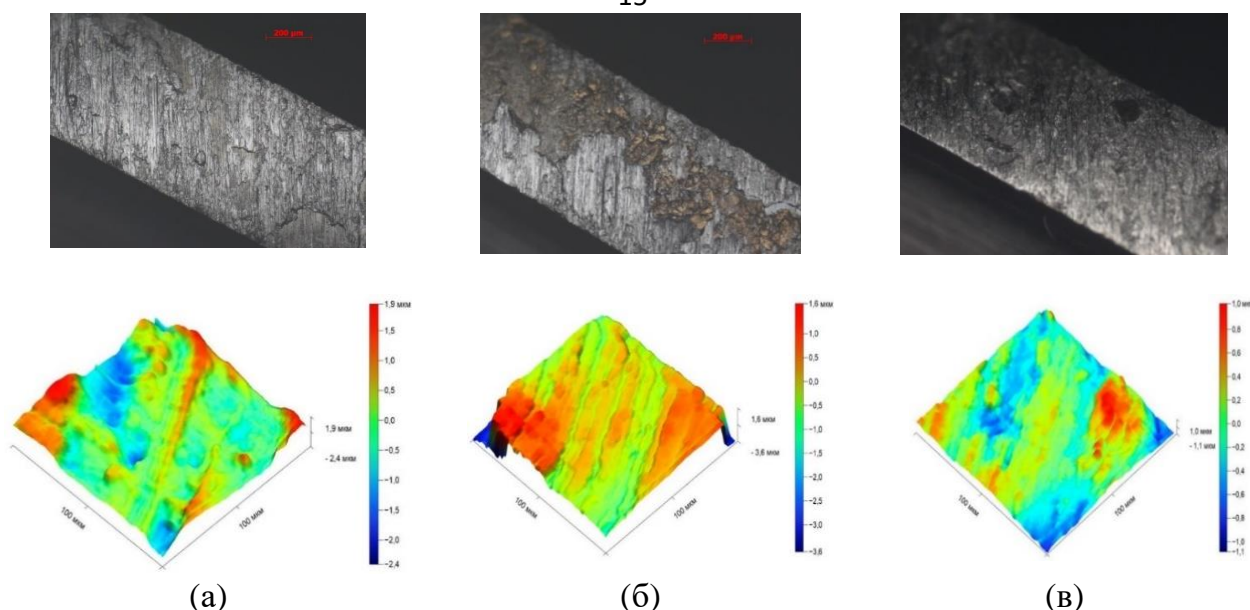


Рис. 8. Налипы титана на ленточке сверла: а – исходное сверло без обработки; б – покрытие TiN+DLC; в – покрытие (TiAlSi)+6SFC

В зависимости от состава покрытия и вида антифрикционного слоя интенсивность налипания меняется, по-разному отражаясь на параметрах качества отверстия. На рис.8 можно увидеть характерные фотографии, а в табл. 3 данные по измерению параметра шероховатости  $R_z$ , косвенно связанного с толщиной титанового налива.

Таблица 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

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. 9. При этом следует заметить,

что радиус округления режущей кромки после нанесения покрытия практически не изменился и его значения колебались в пределах 8–11 мкм.

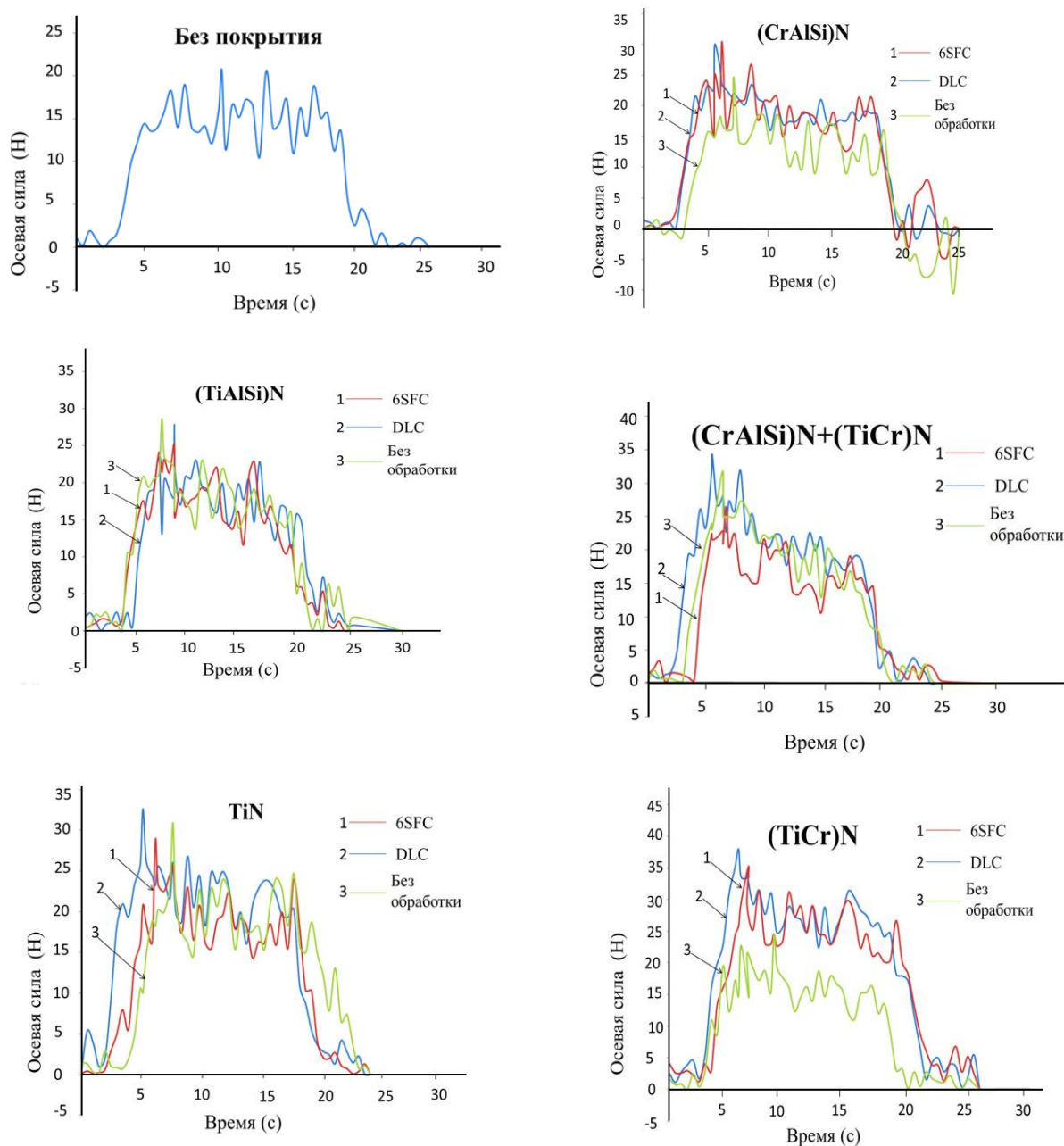


Рис. 9. Значения осевой составляющей силы резания при сверлении сплава ВТ-18У

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.

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 0,15–0,30 после нанесения антифрикционной составляющей покрытия, количество налипшего титана принципиально не изменилось. Образование налипов приводит к образованию на ленточке сверла отрицательного заднего угла и

инструмент, по крайней мере по своей цилиндрической части начинает работать, как дорн. Это приводит к существенному падению шероховатости поверхности в обработанном отверстии, увеличению диаметра отверстия (табл. 4) и является причиной увеличения осевой силы. Неустойчивая работа сверла, связанная с появлением вибраций, сказывается на нецилиндричности отверстий, но отклонение носит скорее случайный характер и здесь сложно выделить какую-либо зависимость. Лучшие характеристики показал инструмент с покрытием (TiAlSi)N с обоими антифрикционными слоями.

Таблица 4.

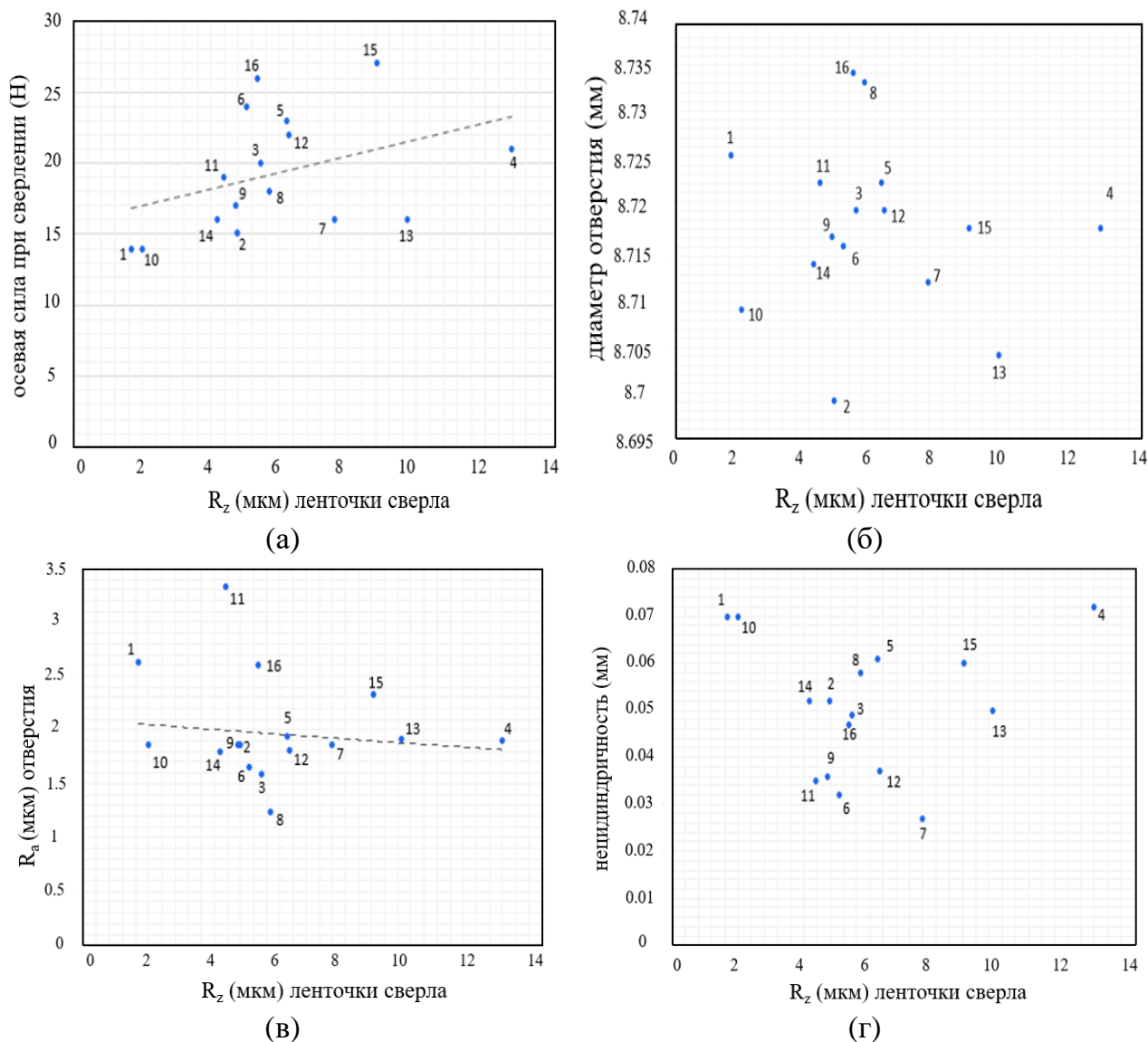
## Параметры отверстий

	Состав покрытия	R <sub>a</sub>	Ø	<i>K<sub>f</sub></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

Для удобства анализа влияния величины нароста, образующегося в результате взаимодействия материалов под воздействием трения при температурах, характерных для процесса резания (в частности, сверления), на осевую силу и характеристики полученного отверстия, представим данные из таблиц в виде графиков (рис. 10).

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, 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.

Одновременно было проведено исследование на твердосплавных фрезах из того же твердого сплава с теми же покрытиями для того, чтобы выяснить существует ли корреляция между изменениями осевого усилия и параметров качества отверстий и шероховатости ленточки сверла, полученных при сверлении, по которым качественно можно судить о степени взаимодействия материалов покрытия и титанового сплава, со стойкостью инструмента при фрезеровании той же заготовки.



- |                   |              |                           |                           |
|-------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| 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          |

Рис. 10. Влияние параметра шероховатости ленточки сверла  $R_z$ , вызванной образованием налива материала заготовки: а – на осевую силу при сверлении; б – на диаметр отверстия; в – на шероховатость внутренней поверхности в отверстии; г – на его нецилиндричность

Таблица 5.

#### Технические характеристики концевой фрезы

<b>Фреза чистовая спиральная, сплав KFM39 (9 % Co)</b>	
Диаметр режущей части, D	11,988 мм
Кол-во зубьев, z	4
Передний угол, $\gamma$	1,45°
Главный задний угол, $\alpha$	12,96°
Угол спирали, $\omega$	39,96°
Ширина главной задней поверхности	1,30 мм
Длина режущей части	12 мм

Для фрезерных операций использовались концевые фрезы, представленные на рис. 11 и табл. 5. Режим резания включает следующие параметры: частота вращения шпинделя  $n = 2000$  об/мин, скорость подачи  $S_{\text{мин}} = 200$  мм/мин. Скорость резания  $v = 75$  м/мин, ширина фрезерования  $a_e = 5$  мм, глубина резания  $a_p = 1,5$  мм. В качестве критерия износа была выбрана величина фаски износа, равная 0,4 мм, на задней поверхности инструмента.



Рис. 11. Концевая фреза и обработка титановой заготовки с СОЖ

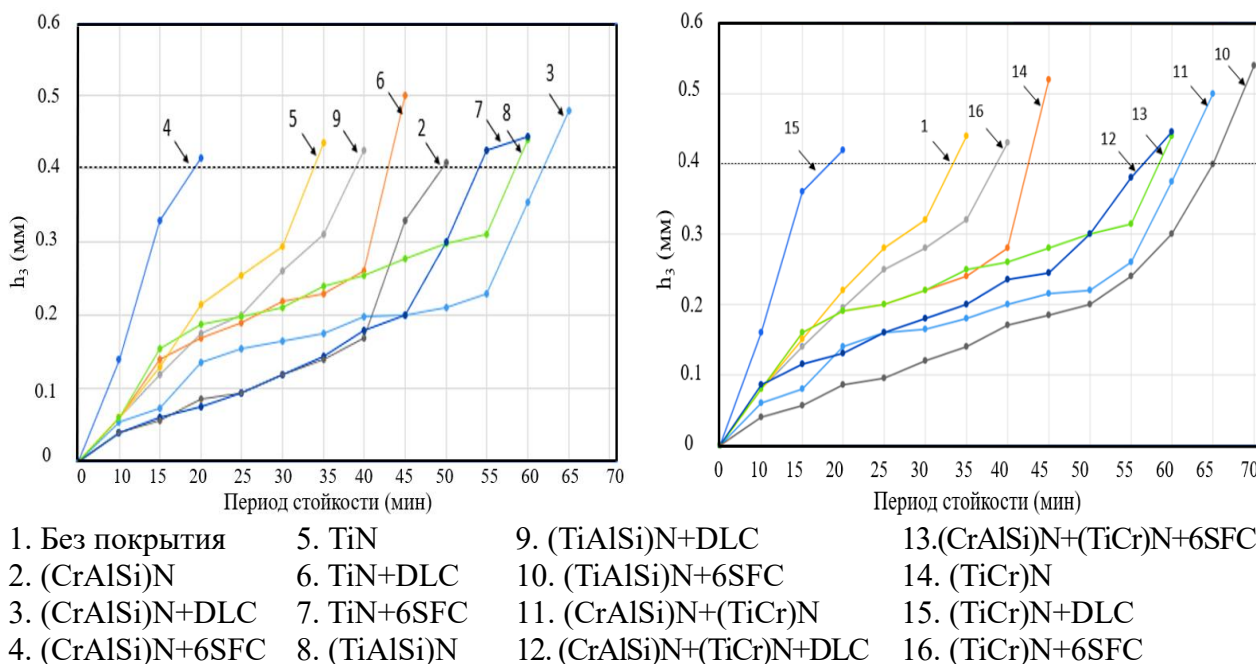
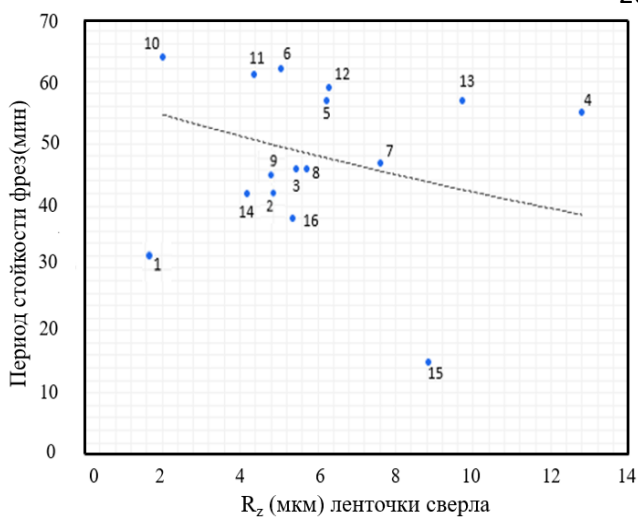


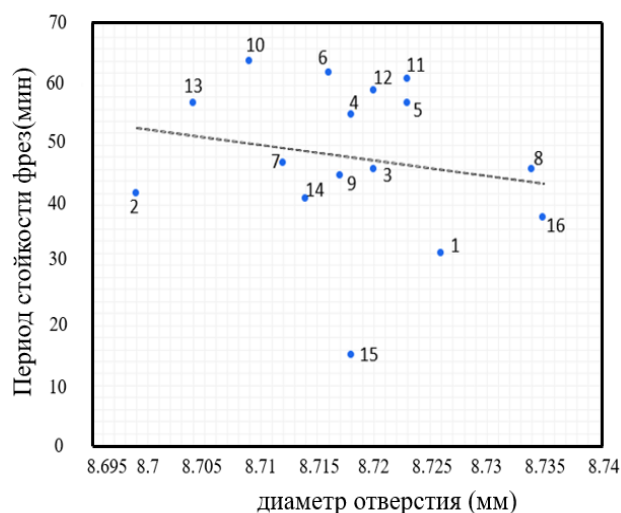
Рис. 12. Стойкость с твердосплавных фрез с различными покрытиями

На рис. 12 представлены результаты стойкостных испытаний фрез с тем же рядом износостойких покрытий. Большинство покрытий способствовало повышению стойкости фрез до двух раз за исключением некоторых случаев, когда основной причиной неудовлетворительной работы инструмента наблюдались небольшие сколы твердого сплава на режущей кромке. Лучший результат был получен на фрезе с покрытием (TiAlSi)N+6SFC.

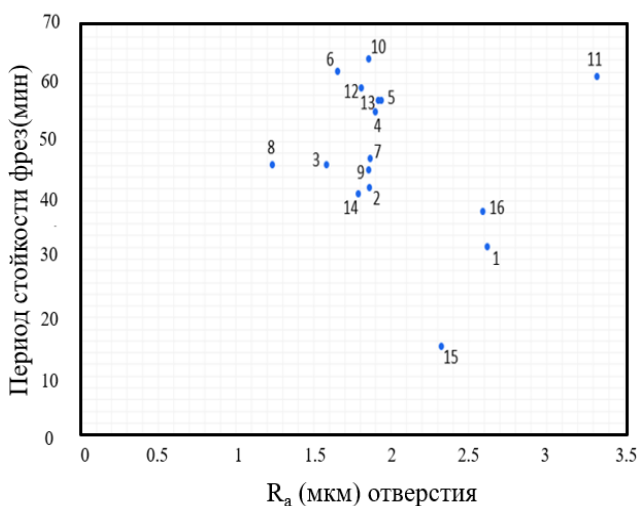
С целью выяснения, существует ли влияние интенсивности налипания титана, исследование которого было описано в разделе 4.1, на срок службы фрез, несмотря на другой способ обработки заготовки резанием, перенесем данные на координатную сетку (рис. 13).



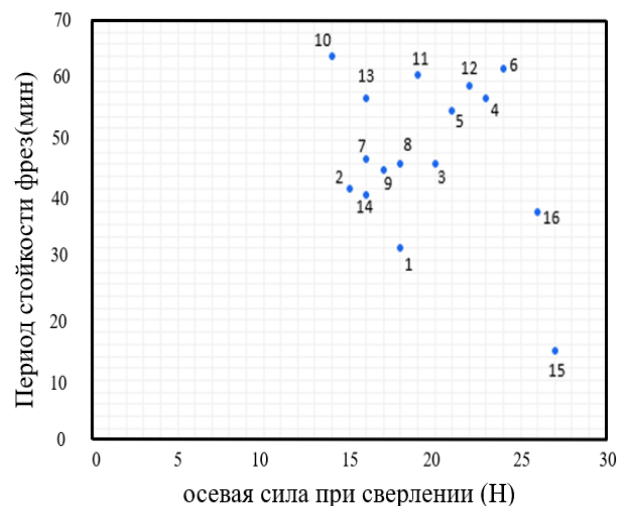
(а)



(б)



(в)



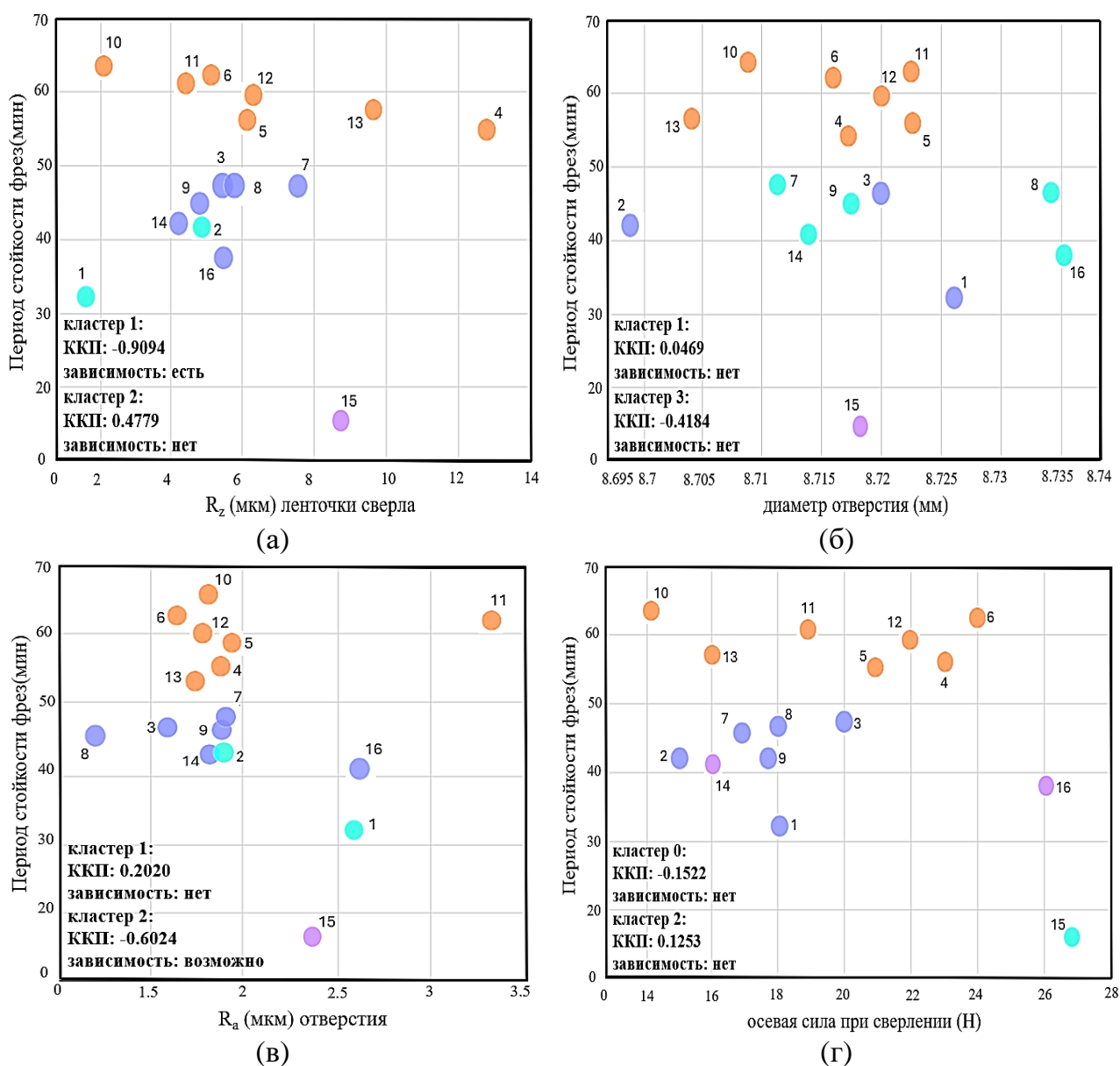
(г)

- |                   |              |                           |                           |
|-------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| 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          |

Рис. 13. Связь между параметрами шероховатости ленточки сверла  $R_z$  и: а – шероховатостью на ленточке сверла; б – диаметром отверстия; в – шероховатостью внутренней поверхности в отверстии; г – осевой силой при сверлении с периодом стойкости фрез из того же материала с теми же покрытиями

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



- |                   |              |                           |                           |
|-------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| 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          |

Рис. 14. Кластеризация данных для выявления возможной зависимости между параметрами: а – шероховатостью на ленточке сверла; б – диаметром отверстия; в – шероховатостью внутренней поверхности в отверстии; г – осевой силой при сверлении с периодом стойкости фрез из того же материала с теми же покрытиями

Метод К-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 К-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  $\text{ККП} > |0,5|$ .

Применение метода К-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 ( $\text{ККП} = 0,9$ ), а также, возможная между периодом стойкости фрез и шероховатостью  $R_a$  внутренней поверхности в отверстии ( $\text{ККП} = 0,6$ ).

Полученные данные (рис. 14) 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 и прогнозировать поведение инструмента с таким покрытием. В то же время по силовым характеристикам процесса резания сделать такое предсказание не получается.

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 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 ВТ18У 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.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И 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  $R_z$  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 эпиламированием 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 эпиламированием дало повышение стойкости до 2 раз при фрезеровании сплава BT18У концевыми фрезами.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. **Tet Oo.** Milling of Electron Beam Melting Ti-6Al-4V by HSS Instrument with Combined Surface Treatment / **Tet Oo**, S.V. Fedorov, E.S. Mustafayev // Materials Science Forum. 2021. V. 1037. P. 245–250.
2. **Тет, У.** Повышение стойкости концевых твердосплавных фрез при обработке титановых сплавов путем комбинирования износостойких и антифрикционных слоев покрытия / **Тет У**, С.В. Федоров // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2025. № 3. (в печати).
3. Федоров, С.В. Влияние взаимодействия материалов износостойких покрытий и титанового сплава ВТ18У на стойкость твердосплавных концевых фрез. / С.В. Федоров, **Тет У** // Инновации. Наука. Образование. 2024. № 103 (июнь). С. 103–117.
4. Куликова, А.С. Применение метода дисперсионного анализа для выявления наличия неочевидных зависимостей между характеристиками процесса обработки титановых пластин / А.С. Куликова, **Тет У**, О.В. Новоселова // Инженерный вестник Дона, № 10 (2024). <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9548>.
5. **Thet Oo.** The Effect of Antifriction Coatings on the Drilling Process of Titanium Alloy / **Thet Oo**, S.V. Fedorov // Research & Development in Material Science. 2023. V. 18(3). RDMS.000937. P. 2086–2089.
6. **Thet, O.** Drilling of titanium alloy using a carbide tool with antifriction coatings. / Thet Oo, G.V. Oganyan, E.Yu. Kropotkina // EFRE 2022: 16th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows Coatings deposition. P. 313.
7. Волосова, М.А. Влияние антифрикционных покрытий на процесс сверления титанового сплава. / М.А. Волосова, С.В. Федоров, **Тет У**, Н.В. Колосова // XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению 2022», посвященная 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова. С. 83-86.
8. Fedorov, S.V. Processing of the Titanium alloy by high-speed steel tools with combine surface treatment. / S.V. Fedorov, **Tet Oo**, E.S. Mustafayev // 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021. p. 145.