

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»
Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

На правах рукописи

МЕДИСОН ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ
СПЛАВОВ**

Специальность 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пегашкин Владимир Фёдорович

Нижний Тагил – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Влияние термоэлектричества на износ режущего инструмента.....	10
1.1. Влияние электрического тока на износ при трении.....	10
1.2. Влияние электрического тока на износ при резании	12
1.3. Выводы к главе 1.....	26
1.4. Формулировка цели и задач диссертационной работы.....	28
2. Материалы и методика исследования.....	35
2.1. Используемые материалы	35
2.2. Экспериментальные методы исследования.....	35
2.2.1. Методика исследования силы тока при точении	35
2.2.2. Методика исследования силы резания при точении.....	41
2.2.3. Методика исследования усадки стружки при точении	45
2.2.4. Методика исследования термически оксидированных титановых сплавов	47
2.2.5. Методика исследования термоЭДС в термопарах «титановый сплав – сталь Р6М5».....	50
2.2.6. Методика исследования стойкости резцов, оснащенных твердосплавной неперетачиваемой пластиной	51
2.2.7. Методика исследования стойкости спиральных сверл.....	53
2.2.8. Методика исследования предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента в промышленных условиях	55
3. Исследование влияния электрической изоляции режущего инструмента на силу резания и усадку стружки при точении титановых сплавов.....	60
3.1. Сущность теории электропластической деформации металлов	60
3.2. Результаты исследования силы тока при точении титановых сплавов	63
3.3. Расчет дополнительной силы, вызванной действием электрического тока	66

3.4. Экспериментальное исследование силы резания при точении титановых сплавов	69
3.5. Экспериментальное исследование усадки стружки при точении титановых сплавов	75
3.6. Выводы к главе 3.....	81
4. Разработка способа электрической изоляции режущего инструмента	83
4.1. Термическое оксидирование титановых сплавов как метод получения покрытия с высоким электрическим сопротивлением	83
4.2. Исследование термически оксидированных титановых сплавов.....	87
4.2.1. Исследование электрического сопротивления.....	87
4.2.3. Исследование прироста массы.....	89
4.2.4. Исследование твердости.....	93
4.3. Предлагаемый способ электрической изоляции металлорежущего инструмента	95
4.4. Выводы к главе 4.....	100
5. Исследование эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов.....	102
5.1. Исследование термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5»	102
5.2. Исследование стойкости резцов при обработке титановых сплавов	106
5.3. Исследование стойкости электрически изолированных спиральных сверл при обработке титановых сплавов	122
5.4. Исследование стойкости электрически изолированных спиральных сверл при обработке титановых сплавов в промышленных условиях.....	131
5.5. Расчет экономической эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента	134
5.6. Выводы к главе 5.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	140

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Использование результатов диссертационной работы	154
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Рентгеноструктурный фазовый анализ оксидных пленок	155

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроения невозможно без использования современных материалов, одними из которых являются титановые сплавы. Основными характеристиками титановых сплавов по данным работ [20, 30, 57, 58] являются:

1. Высокая удельная прочность титановых сплавов, достигающая $300 \div 350 \text{ м}^2/\text{с}^2$, в сравнении с алюминиевыми сплавами, имеющими удельную прочность $160 \div 180 \text{ м}^2/\text{с}^2$ и сталями с удельной прочностью порядка $240 \div 260 \text{ м}^2/\text{с}^2$;
2. Коррозионная стойкость титановых сплавов, то есть их способность сопротивляться воздействию химически агрессивных сред за счет наличия на поверхности титановых сплавов тонкой оксидной пленки TiO_2 , что обеспечивает их применимость в химическом машиностроении, но, в то же время, снижает их обрабатываемость резанием вследствие необходимости увеличивать глубину резания;
3. Низкая теплопроводность титановых сплавов, которая в 15 раз ниже, чем у алюминиевых сплавов и в 5 раз ниже, чем у сталей;
4. Высокий коэффициент трения в контакте с большинством конструкционных материалов, что приводит к невозможности использования титановых сплавов в узлах трения вследствие возможности заедания и быстрого износа узла.

Эти свойства обуславливают применимость титановых сплавов в:

- 1 авиастроении и космической технике, где титан находит применение [14, 33, 50, 84, 94] в производстве газотурбинных двигателей, лонжеронов, шпангоутов, балок, деталей шасси, деталей обшивки корпусов самолетов, а также при производстве ракет-носителей [29];
- 2 судостроении [89], где титан используют при производстве обшивки судов, деталей насосов, трубопроводов, конденсаторных труб, паровых котлов и турбинных двигателей;

3 машиностроении, главным образом химическом (производство емкостей для работы с агрессивными жидкостями и парогазовыми смесями, теплообменной аппаратуры) и энергетическом (производство лопаток паровых турбин).

В то же время повышение производительности обработки изделий из титановых сплавов ограничено их низкой обрабатываемостью резанием по сравнению с конструкционными сталями [43, 77].

Одним из существующих методов повышения стойкости является метод электрической изоляции режущего инструмента. При этом осуществляется разрыв замкнутой электрической цепи «станок – инструмент – изделие – станок». По данным ряда исследований [11, 60, 73, 74] этот метод позволяет повысить стойкость режущего инструмента в $1,15 \div 7,0$ раз в зависимости от условий обработки.

В то же время данный метод оказался невостребованным в промышленности в связи со следующими недостатками:

1. Все существующие способы электрической изоляции режущего инструмента приводят к снижению жесткости инструментальной системы, а также, зачастую, сложны и дорогостоящи в реализации;
2. Данные об эффективности метода электрической изоляции режущего инструмента противоречивы: наряду с положительными результатами, приведенными в работах [9, 11, 37, 65, 73, 74], имеется ряд работ, в которых получены отрицательные результаты [40, 42, 63];
3. Объяснение наблюдаемого явления повышения стойкости режущего инструмента далеко не полно. По ряду направлений, таких как влияние электрической изоляции режущего инструмента на диффузионный и окислительный износ, достигнут существенный прогресс. В то же время практически отсутствуют данные по влиянию электрической изоляции режущего инструмента на силы резания и усадку стружки, хотя ряд работ [25, 98, 105] напрямую указывает на существование взаимосвязи между

силой резания и наличием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок».

Актуальность предлагаемой темы научно-исследовательской работы обусловлена:

- 1 существованием пробелов в объяснении явлений, наблюдающихся при работе электрически изолированным режущим инструментом;
- 2 недостаточностью и противоречивостью данных об эффективности электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов;
- 3 необходимостью разработки новых, более совершенных способов электрической изоляции режущего инструмента, которая обусловлена недостатками существующих способов;
- 4 возрастающими потребностями в продукции из титановых сплавов в аэрокосмическом, морском и химическом машиностроении, которые обуславливают рост требований к стойкости режущего инструмента, используемого при обработке титановых сплавов, а также необходимость снижения себестоимости обработки резанием титановых сплавов;
- 5 ростом числа публикаций, посвященных исследованию электрических явлений при резании металлов [51, 61, 65, 66, 81, 88, 98, 105] и электроизоляции как методу повышения стойкости режущего инструмента [71 – 74].

В ходе работы получены следующие **новые научные результаты**:

1. На основе положений электропластической деформации металлов теоретически показано, что электрическая изоляция режущего инструмента способствует уменьшению силы резания и усадки стружки в связи с устранением дополнительной силы, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок». Показано, что уменьшению силы резания способствует устранение силы электронного увлечения, действующей на единицу длины дислокации. Данное следствие

из теории электропластической деформации металлов подтверждено экспериментально;

2. Установлена множественная корреляция между силой резания, усадкой стружки и стойкостью режущего инструмента. Показана прямая корреляционная связь между уменьшением силы резания при точении титановых сплавов и расчетной величиной дополнительной силы, вызванной протеканием электрического тока по цепи «станок – инструмент – изделие – станок». Показана прямая корреляционная связь между усадкой стружки и стойкостью резцов, обратная – между силой резания и усадкой стружки и между силой резания и стойкостью резцов;
3. Получены регрессионные зависимости силы тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок», силы резания и стойкости резцов от параметров режима резания при точении титановых сплавов. Получены регрессионные зависимости стойкости сверл от диаметра сверла и скорости резания.

Практическая ценность состоит в том, что:

1. Повышена стойкость резцов, оснащенных твердосплавными пластинами, при обработке титановых сплавов в $1,23 \div 2,03$ раз, и сверл из быстрорежущей стали Р6М5 в $1,66 \div 2,76$ раз;
2. Разработан способ электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов, состоящий в использовании вспомогательного инструмента и специальных приспособлений, поверхности которых имеют оксидный слой, обладающий диэлектрическими свойствами (патент РФ №2456125);

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на: 15-й международной научно-практической конференции «Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика» (Санкт-Петербург, 2013); международной научной школе для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» (Екатеринбург, 2010);

международной заочной конференции «Инженерная поддержка инновации и модернизации» (Екатеринбург, 2010); XII (2011) и XIV (2013) международных научно-технических уральских школах-семинарах металловедов-молодых ученых (Екатеринбург); международной заочной научно-практической конференции «Проблемы науки, техники и образования в современном мире» (Липецк, 2012); всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2012); VI уральской научно-практической конференции «Сварка, реновация, триботехника» (Нижний Тагил, 2013); региональных научно-практических конференциях «Молодежь и наука» (Нижний Тагил, 2010, 2012 и 2013); региональной научно-технической конференции «Наука – образование – производство: опыт и перспективы развития» (Нижний Тагил, 2011); III (2009), IV (2010) и V (2013) региональных научно-технических конференциях «Образование и производство» (Верхняя Салда).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 20 печатных работ, в том числе 4 работы в журналах из списка ВАК [44, 46, 47, 48], 2 работы в журналах, включенных в международную базу цитирования SCOPUS [99,100], получен патент на изобретение [45].

Разработанный способ, а также методики, установки и модели приняты к использованию в инженерной и производственной практике ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Верхняя Салда, Свердловская область).

Работа выполнена на кафедре «Общего машиностроения» Нижнетагильского технологического института (филиала) Федерального государственного автономного образовательного учреждения «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Исследование проведено при финансовой поддержке молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ в 2011 и 2013 гг., а также на средства государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ Н.641.42Г.002/12.

1. Влияние термоэлектричества на износ режущего инструмента

1.1. Влияние электрического тока на износ при трении

Впервые негативное действие электрического тока на износ было обнаружено при трении. П.Л. Гордиенко и С.Л. Гордиенко в 1952 году исследовали электрические явления при трении металлов, и их влияние на износ трущихся металлических тел [19]. Они выявили, что электрический ток при трении возникает вследствие возникновения термоЭДС в замкнутой электрической цепи, образованной парой трения и машиной трения. По данным работы [19], наименьший износ образцов наблюдался при использовании электрической изоляции образцов, а наибольший – при введении в зону трения электрического тока той же полярности, что и у термоэлектрического тока в системе. Гордиенко выдвинули гипотезу, которая объясняла отрицательное действие электрического тока на износ при трении электроэрозионным разрушением, аналогичным тому, что происходит в процессе электроэрозионной обработки.

Л.Г. Коршунов и Р.И. Минц в работе [38] показали, что влияние электрического тока на износ образцов при трении различается в зависимости от величины и направления электрического тока в системе. В частности ими показано, что при пропускании тока с полярностью, обратной полярности собственного электрического тока в трущейся паре, и большего по величине, чем собственный электрический ток в системе, износ существенно снижается. Авторами [38] показано, что электрический ток при трении влияет на процессы окисления, протекающие на трущихся поверхностях. При этом Коршунов и Минц указывают, что влияние электрического тока на износ металлов при трении вызвано главным образом явлениями электропереноса, а не электроэрозионного разрушения, как ранее указывали Гордиенко. Коршунов и Минц обосновывают свою идею тем, что при трении металлов термоЭДС не превышает десятков милливольт, а электрический ток – долей миллиампера, следовательно, искровой

разряд, возникающий на контактных площадках, будет недостаточно мощным, чтобы привести к существенному износу.

Впоследствии исследования в данном направлении были продолжены и развиты М. Т. Галеем [17]. В своей работе он указывает, что непременным условием возникновения электрического тока является химическая неоднородность материалов, находящихся в контакте. Им было показано, что при изменении параметров режима резания или трения изменяется и термоЭДС. Галей также указывает на существование линейной корреляции между термоЭДС и температурой на основе закона Зеебека

$$E = \int_{T_1}^{T_2} S_A dT - \int_{T_1}^{T_2} S_B dT = \int_{T_1}^{T_2} S_{AB} dT, \quad (1.1)$$

где E – термоЭДС, мВ, T – температурный градиент, °К, S_A и S_B – коэффициенты термоЭДС материалов термопары, равные разности потенциалов, возникающей на концах проводников при их размещении в температурном поле при разности температур на концах проводника, равной один кельвин, мВ/°К.

Галей приводит данные о том, что износ при трении зависит от направления электрического тока в цепи. Им показано, что при введении в замкнутую электрическую цепь электрического тока, противоположного по направлению имеющемуся в системе току, износ образцов из стали Р18 снижается почти в два раза. Особенностью работы [17] является то, что автор пытается связать термоЭДС с тепловыми явлениями при трении, и показывает, что существует корреляция между направлением электрического тока в системе и охлаждением на площадках трения, которая связана с эффектом Томсона. Эффект Томсона состоит в том, что в однородном неравномерно нагретом проводнике с постоянным током дополнительно к теплоте Джоуля-Ленца будет выделяться или поглощаться теплота Томсона, зависящая от направления электрического тока.

Таким образом, уже в ранних исследованиях термоэлектрических явлений при трении было выявлено, что электрический ток оказывает комплексное воздействие на износ трущихся пар. По мнению авторов работ [17, 19, 38]

электрический ток приводит к интенсификации электроэрозионного, электродиффузионного и окислительного износа.

1.2. Влияние электрического тока на износ при резании

В 1953 году *Н. Ахер*, работавший под руководством *Г. Опитц*, обнаружил, что электрический ток, возникающий в системе «станок – инструмент – изделие – станок», приводит к повышенному износу режущего инструмента. *Н. Ахер* предложил метод, состоящий в электрической изоляции режущего инструмента от станка, за счет чего удавалось повысить стойкость резцов почти в 2,5 раза [92]. Сам *Н. Ахер* не предложил никакого объяснения наблюдаемому повышению стойкости, однако его работы были продолжены многими исследователями.

В 1958 году *Т. Нехенkamp* опубликовал работу [97], в которой во-первых, предложил метод повышения стойкости режущего инструмента за счет введения в зону резания дополнительной ЭДС, противоположной по знаку имеющейся в системе «станок – инструмент – изделие – станок» термоЭДС (метод противотока), а во-вторых, впервые предложил электродиффузионную модель износа режущего инструмента.

Ю. С. Дубров и Г. С. Николаева [25, 26] предположили, что процесс изнашивания под действием электрического тока при резании происходит вследствие интенсификации адгезионного изнашивания, происходящего вследствие контактного схватывания материалов с образованием сварного шва, и его последующим разрушением. Авторы работ [25, 26] кроме того, предлагают оригинальный подход к электрической изоляции режущего инструмента – нанесение на поверхности деталей станка, контактирующих с режущим инструментом или заготовкой пластмассу (поливинилбутираль), тем самым обеспечивая электрическую изоляцию режущего инструмента, а затем дополнительно устанавливать в корпус станка искрогасящие устройства. Авторами работы [25] показано, что устранение электрического тока в цепи

«станок – инструмент – изделие – станок» приводит к изменению силы резания, хотя они не приводят в своих работах никаких конкретных значений. По данным Дуброва и Николаевой электрическая изоляция и искрогашение приводят к повышению стойкости режущего инструмента в $1,3 \div 2,0$ раза.

Г.И. Якунин и Н.Г. Молчанова [87] указали на тот факт, что намагничивание резцов из быстрорежущей стали с северной полярностью приводит к существенному (на 50%) повышению стойкости резца. Авторы связывают это явление с эффектом Риги-Ледюка, который состоит в том, что под действием магнитного поля, вызванного электрическим током в системе «станок – инструмент – изделие – станок», тепловой поток в зоне резания отклоняется либо в сторону вершины резца (при намагничивании с южной полярностью), либо от вершины резца (при намагничивании с северной полярностью), тем самым обеспечивая улучшение или ухудшение теплоотвода в зоне резания. Необходимо отметить, что намагничивание является известным методом повышения стойкости металлорежущего инструмента [12, 13].

Большую роль в популяризации исследований электрических явлений при резании сыграли работы В. А. Бобровского [8, 9, 10, 11]. Бобровский связывал отрицательное действие электрического тока в системе «станок – инструмент – изделие – станок» с интенсификацией взаимного диффузионного переноса компонентов инструментального и обрабатываемого материалов в процессе резания. При этом В. А. Бобровский критиковал существовавшие на тот момент гипотезы об электроэрозионной или окислительной природе изнашивания режущего инструмента при работе без изоляции.

В работе [11] В. А. Бобровский рассматривает существующие методы повышения стойкости металлорежущего инструмента. К ним относятся:

1. Метод разрыва цепи. Суть метода состоит в том, что в цепи электрического тока ставят изолятор, препятствующий прохождению электрического тока по контуру «станок – инструмент – изделие – станок». В этом случае через зону резания не проходит электрический ток, но между передней и задней

поверхностями инструмента может существовать локальный электрический ток.

2. Компенсационный метод, при котором в зону резания от постороннего источника вводится ЭДС с полярностью, противоположной полярности результирующей термоЭДС, и равная ей по значению. В этом случае результирующая величина тока, проходящего через зону резания, становится равной нулю и локальные электрические токи в той или иной мере компенсируются.
3. Метод противотока. В зону резания от постороннего источника вводится ЭДС, полярность которой противоположна полярности результирующей термоЭДС, а величина введенной в зону резания ЭДС превышает величину термоЭДС. В результате через зону резания проходит ток в направлении противоположном направлению результирующего электрического тока.

Применение последних двух методов осложняется необходимостью использования специального оборудования для измерения и ввода в зону резания ЭДС, противоположной по направлению термоЭДС в цепи «станок – инструмент – изделие – станок». Использование данного оборудования также усложняет технологию обработки, снижает безопасность на производстве и предъявляет повышенные требования к квалификации рабочих-станочников, вследствие чего использование данных методов на производстве затруднено.

Наибольшее распространение получил метод разрыва цепи, как наиболее простой в реализации, дешевый и безопасный метод. Рассмотрим его на примере повышения стойкости инструмента при сверлении [9]. На Рисунке 1.1 приведены известные схемы обработки с замкнутым и разомкнутым контуром результирующего электрического тока.

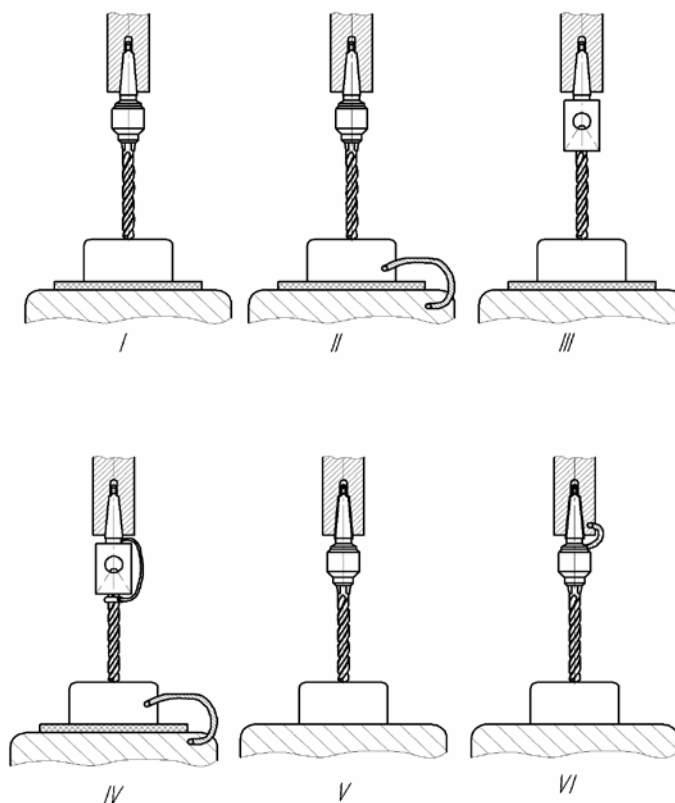


Рисунок 1.1. Схемы обработки:

I, II, V, VI – стандартными сверлами; III, IV – сверлами с пластмассовыми хвостовиками

Схема I. Спиральное сверло закрепляется в обычном трехкулачковом патроне. Заготовка укладывается на текстолитовую прокладку, и тем самым электрически изолируется от станка. Схема II. То же, что на схеме I, но заготовка соединена со станком многожильным медным проводом.

Схема III. Сверло с пластмассовым коническим хвостовиком закреплено в специальной стальной переходной втулке, а заготовка изолирована от станка. Схема IV. То же, что на схеме III, но сверло соединено специальным проводом со шпинделем станка, а заготовка – со столом станка.

Схема V. Спиральное сверло устанавливается в склеенную при помощи клея ВК-24М переходную втулку. При этом толщина клеевого соединения не превышает 0,15 мм, а электрическое сопротивление такой схемы оказывается не

менее 70 МОм, а зачастую превышает 200 МОм. Схема VI. Сверло и заготовку устанавливали так же, как на схеме V, но сверло соединяли со станком при помощи медного многожильного провода.

На Рисунке 1.2 представлены кривые износа сверл при использовании представленных на Рисунке 1.1 схем обработки. Как видно из Рисунка 1.2, наибольшей стойкостью обладают сверла, работавшие по схеме V. Основные результаты работы инструментом со склеенными электроизолирующими устройствами изложены в работе [11].

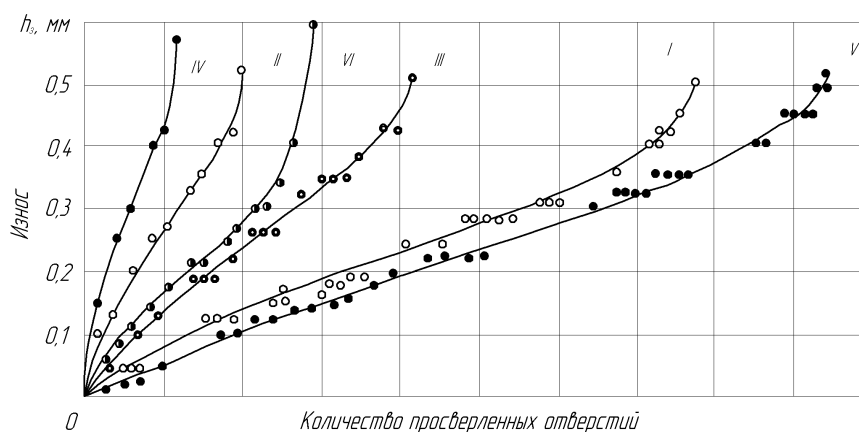


Рисунок 1.2. Кривые максимального износа задних поверхностей сверл стандартных и с пластмассовыми хвостовиками: I-VI – схемы обработки

Бобровским установлено [9], что износ сверл, эксплуатируемых при разомкнутой цепи результирующего электрического тока, отличается от износа сверл в обычных условиях. Форма площадки износа задних поверхностей сверл в первом случае представляет собой, как правило, полосу, почти одинаковой ширины, вдоль всей режущей кромки сверла. У сверл же, работающих в обычных условиях, площадка износа задней поверхности имеет форму близкую к треугольной, что показано на Рисунке 1.3. Иначе говоря, электрическая изоляция не только приводит к повышению стойкости сверл, но также приводит к изменению ширины площадки износа. При этом стойкость сверл, работавших в условиях электрической изоляции, возрастает.

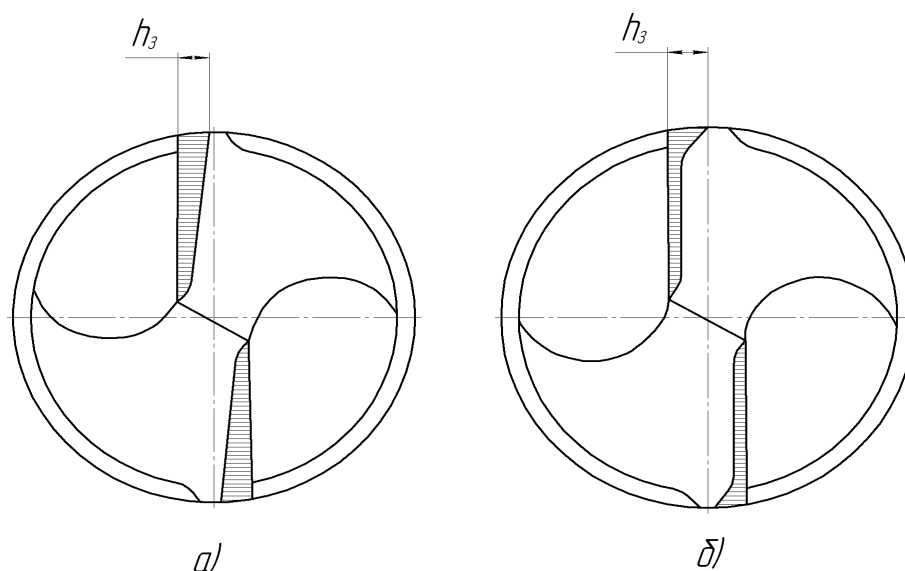


Рисунок 1.3. Форма площадок износа на задних поверхностях
спирального сверла при работе:

а) с замкнутой цепью результирующего электрического тока; б) с разомкнутой цепью
электрического тока

Попытка обобщения информации о влиянии электрического тока на износ при резании была предпринята С.Н. Постниковым [60]. В качестве основных источников возникновения термоЭДС при резании он называет:

1. Контактную разность потенциалов пары «инструментальный материал – обрабатываемый материал» равную разности работ выхода электронов с поверхности инструментального и обрабатываемого материалов;
2. Различие концентраций свободных электронов;
3. Температурную зависимость кинетической энергии носителей заряда.

При этом контактная разность потенциалов и различие концентраций свободных электронов составляют постоянную часть термоЭДС, а температурная зависимость кинетической энергии носителей заряда – переменную часть. Таким образом, С.Н. Постников констатирует, что величина термоЭДС в цепи «станок – инструмент – изделие – станок» в большей степени зависит от свойств контактирующих разнородных материалов, и в меньшей степени от температуры в зоне резания.

При этом С.Н. Постников указывает на тот факт, что наиболее информативным свойством, определяющим обрабатываемость металлов резанием, является контактная разность потенциалов, поэтому он утверждает, что измеряя термоЭДС пары «инструментальный материал – обрабатываемый материал» можно судить об обрабатываемости резанием. В качестве подтверждения этому он приводит Рисунок 1.4, где приведены результаты измерения термоЭДС от температуры горячего спая при нагревании ряда материалов в комбинации с быстрорежущей сталью Р18. Действительно, в ряду приведенных на Рисунке 1.4 материалов худшей обрабатываемостью [43] обладают титановый сплав ВТ5 и сталь Х18Н10Т, в то время как сталь 30ХГСА и титановый сплав ОТ4-1 обрабатываются резанием относительно легко. Таким образом, заключает Постников, необходимо подбирать материалы инструмента и детали таким образом, чтобы минимизировать величину термоЭДС при их нагреве, и тем самым, уменьшить величину электрического тока в системе «станок – инструмент – изделие – станок». В современной литературе аналогичного мнения о необходимости использования термоЭДС при исследовании обрабатываемости резанием металлов придерживался И.С. Праведников [61]. В то же время С.В. Васильев [16] показывает, что термоЭДС при нагреве пары «инструментальный материал – обрабатываемый материал» зависит главным образом от контактной разности потенциалов, а при резании на нее существенное влияние оказывает также температурная зависимость кинетических носителей заряда. Поэтому, подтверждая возможность использования термоЭДС в качестве источника информации об обрабатываемости резанием металлов, С.В. Васильев предупреждает об опасности абсолютизации этого способа определения обрабатываемости. В действительности, по величине термоЭДС при нагреве термопар «обрабатываемый материал – инструментальный материал» логичнее говорить не об обрабатываемости резанием, а об интенсивности термоэлектрических явлений в зоне резания, вызванных контактной разностью потенциалов, или, иначе, по

величине термоЭДС при нагреве термопар можно судить об эффективности метода электрической изоляции режущего инструмента.

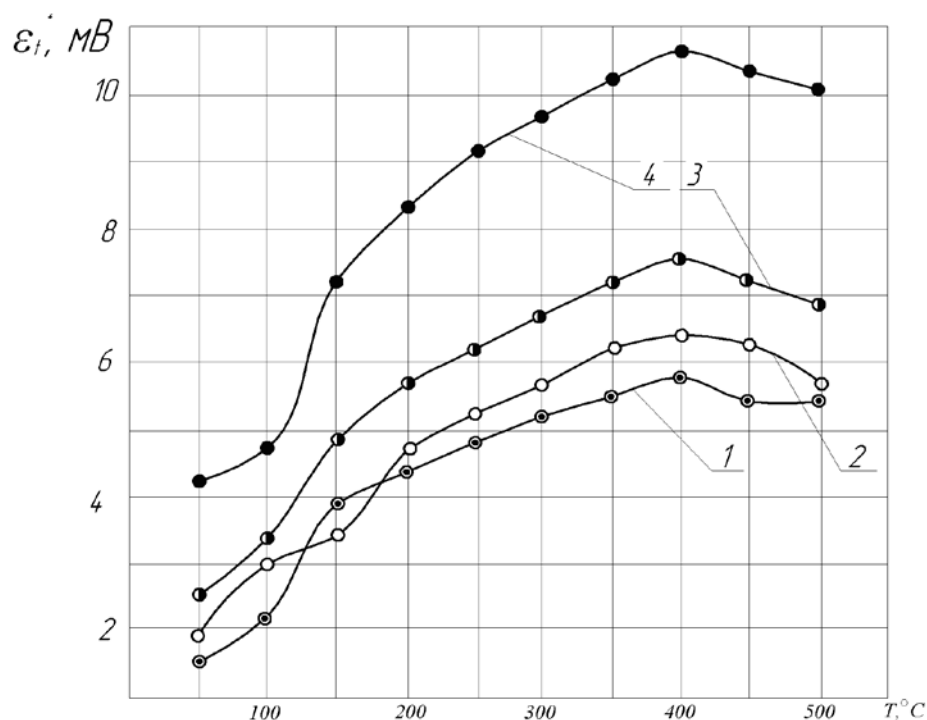


Рисунок 1.4. Зависимость термоЭДС от температуры горячего спая при нагревании ряда материалов в комбинации с P18:

1 – 30ХГСА; 2 – ОТ4-1; 3 – X18H10T; 4 – BT5.

С.Н. Постников приводит следующие результаты собственных работ в области исследования влияния электрического тока на износ при резании:

1. Средняя стойкость быстрорежущих сверл в условиях электрической изоляции при обработке титановых сплавов возрастала в $2 \div 4,5$ раза, а содержащих титан сталей – в $1,5 \div 3,5$ раза;
2. Размыкание цепи электрического тока приводит к увеличению равномерности износа по задним поверхностям при одновременном снижении износа по ленточкам, что также было показано Бобровским [9];
3. Эффект электрической изоляции зависит помимо прочего от электрического сопротивления металлорежущего станка, на котором ведется обработка;

4. Одним из следствий размыкания цепи «станок – инструмент – изделие – станок» является уменьшение микротвердости нароста и прирезцовой части стружки, что свидетельствует о влиянии электрического тока на пластическую деформацию срезаемого слоя;
5. Метод электрической изоляции позволяет добиться повышения качества обработанной поверхности в среднем на один класс, что С.Н. Постников связывает с уменьшением адгезионного износа режущего инструмента.

Наиболее важным с точки зрения темы диссертационной работы результатом С.Н. Постникова является то, что он впервые убедительно показал, что электрическая изоляция режущего инструмента должна приводить к наилучшим результатам при обработке резанием титановых сплавов в связи с тем, что [60]:

1. Сочетание быстрорежущая сталь – титановый сплав представляет собой *p-n* переход;
2. При нагревании титанового сплава BT5 в паре с быстрорежущей сталью P18 величина термоЭДС пары была наибольшей в ряду исследованных материалов;
3. Титановые сплавы обладают низкой теплопроводностью;
4. Титановые сплавы химически активны, и, тем самым, предрасположены к электродиффузионному изнашиванию, при этом в титане растворяются практически все известные элементы, входящие в состав инструментальных материалов.

Аналогичное предложенному С.Н. Постниковым [60] разделение термоЭДС, возникающей в процессе резания, на постоянную и переменную составляющие было предложено Ю.М. Коробовым [36]. В работе [36] Коробов указывает на тот факт, что электрическая изоляция резцов приводит к увеличению их стойкости за счет устранения электрических разрядов на контактных площадках между резцом и обрабатываемой деталью. В работе [37] Ю.М. Коробов и Г.А. Прейс констатируют, что минимально необходимым

электрическим сопротивлением для осуществления электрической изоляции режущего инструмента является электросопротивление порядка 200 МОм.

Еще одним исследователем, работающим в направлении повышения стойкости инструмента устранением влияния термоэлектрических явлений, является А. А. Рыжкин [64, 65, 66, 70]. В работе [64] Рыжкин указывает на тот факт, что электрический ток при резании способствует интенсификации окислительных процессов, происходящих на поверхности металлорежущего инструмента, что приводит к образованию оксидных пленок, обладающих высокой склонностью к хрупкому разрушению. Впоследствии А.А. Рыжкиным в соавторстве с В.Э. Бурлаковой [66, 67] и В.Г. Солоненко [70] была проделана значительная работа по исследованию причин повышения стойкости металлорежущего инструмента в условиях электрической изоляции.

В работе [66] Рыжкин и Бурлакова анализируют физические причины износа инструментальных материалов, вызванного действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок». Ими показано, что в зависимости от направления тока при резании в области контакта между инструментальным и обрабатываемым материалом будет выделяться или поглощаться тепло в соответствии с эффектом Томсона. Таким образом, по мнению Рыжкина и Бурлаковой, ввиду того, что режущий инструмент зачастую выполняет роль положительного полюса в электрической цепи «станок – инструмент – изделие – станок», устранение электрического тока в этой цепи, достигнутое путем электрической изоляции режущего инструмента, приводит к охлаждению зоны резания.

А. А. Рыжкин и В. Г. Солоненко в работах [70, 73, 74] сообщают, что термоэлектрические явления в процессе резания усиливают диффузию компонентов инструментального материала в обрабатываемый материал, влияют на окислительные процессы и адгезию материалов. В работе [70] они предлагают определять теоретический коэффициент повышения стойкости режущего инструмента при электрической изоляции по формуле

$$K = 1 + \left| \frac{e}{k} \frac{\sum z_i - z_1}{z_1} \frac{\sum \psi_i}{\rho_0} \right|, \quad (1.2)$$

где $\sum z_i$ – сумма валентностей легирующих элементов инструментального материала;

z_1 – валентность основного элемента инструментального материала;

$\sum \psi_i$ – суммарное удельное электросопротивление элементов инструментального материала, Ом·мм²/м;

ρ_0 – удельное электросопротивление инструментального материала, Ом·мм²/м;

e – заряд электрона, К;

k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Согласно расчетам В.Г. Солоненко по формуле (1.2) стойкость режущего инструмента в условиях электрической изоляции повышается в 1,25÷2,25 раз [73]. Данные результаты экспериментально подтверждены в работах [69, 74].

Завершая обсуждение причин повышения стойкости режущего инструмента, отметим, что по данным большинства рассмотренных работ, электрический ток при резании оказывает комплексное сложное воздействие на процессы, происходящие в зоне резания и на контактных поверхностях режущего инструмента. При этом существуют данные, показывающие, что электрический ток, протекающий по цепи «станок – инструмент – изделие – станок» при резании приводит к интенсификации окислительного, адгезионного и диффузионного износа режущего инструмента. Однако влияние электрического тока на износ при резании не ограничивается этими видами изнашивания. В частности, нужно отметить, что по экспериментальным данным *R. Tanaka* [105] электрический ток при резании оказывает влияние на величину силы резания. На это прямо указывают результаты теоретических исследований С.В. Васильева [15], И.В. Омельченко [51], *J.M. Fildes* [96], *H.A. Abdel-Aal* [88], а также экспериментальных исследований Ю.С. Дуброва и Г.С. Николаевой [25]. При

этом, хотя изменение силы резания в условиях электрической изоляции режущего инструмента было зафиксировано при обработке сталей, не существует данных, подтверждающих существование аналогичного эффекта при обработке титановых сплавов.

Необходимо, однако, отметить, существование ряда работ, авторам которых не удалось добиться сколь-нибудь ощутимого повышения стойкости режущего инструмента [40, 42, 63]. Данные работы заслуживают особого внимания.

В работе [42] Р.Г. Маркосян на основе исследования стойкости резцов, оснащенных твердосплавными пластинками из сплавов Т5К10 и ВК8 при точении стали 45 не обнаружила положительного влияния электрической изоляции на стойкость резцов. При этом, однако, автор не сообщает ничего о способе, которым осуществлялась электрическая изоляция, что затрудняет объективный анализ причин, приведших к подобным результатам. Р.Г. Маркосян объясняла положительный эффект от электроизоляции недостаточной тщательностью проведения экспериментов, указывая на то, что и в его опытах различия в стойкости твердосплавных пластин из одной партии достигали 300%. В то же время, автор работы [42] не исключает полностью возможности существования взаимосвязи между интенсивностью электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок» и стойкостью режущего инструмента.

В работе [63] коллектив исследователей под руководством Н.И. Резникова исследовал эффективность методов электрической изоляции режущего инструмента и противотока при сверлении титанового сплава ОТ4. В качестве электроизолирующей оснастки использовались: текстолитовая подкладка под заготовку и текстолитовый конус патрона сверлильного станка. Наибольший износ наблюдался у электрически изолированных сверл, затем следовали сверла, работавшие в обычных условиях. Наименьший износ наблюдался в случае пропуска в зоне резания электрического тока в том же направлении, что и имеющийся в системе «станок – инструмент – изделие – станок» ток. Оптимальное значение силы тока оказалось равным 30 мА, что существенно

превышает силу тока, действующую в замкнутой цепи «станок – инструмент – изделие – станок» при резании. Отрицательные результаты использования метода электрической изоляции, полученные в работе [63] связаны с недостатками использованной электроизолирующей оснастки, поскольку негативный эффект от использования текстолитовой подкладки и текстолитового конуса токарного патрона, вызванный тем, что подобная оснастка существенно снижает жесткость инструментальной системы, превышал положительный эффект от электрической изоляции. Авторы работы [63] также указывают на необходимость уточнения результатов, полученных при работе электрически изолированным режущим инструментом.

Наиболее серьезным критическим исследованием влияния разрыва цепи электрического тока при сверлении на стойкость инструмента является работа [40]. В данной работе коллектив авторов на основании исследования стойкости сверл в условиях электрической изоляции и без таковой пришел к выводу об отсутствии влияния электроизоляции на стойкость режущего инструмента, так как в среднем стойкость повышалась лишь на 5,3%. В то же время, в работе [40] показано, что износ электрически изолированных сверл при обработке стали 12X18H10T по задней поверхности, по передней поверхности и по углу протекал соответственно на 8,3%, 22,7% и 5% медленнее, чем в обычных условиях. При обработке стали 45 износ сверл по задней поверхности протекал на 6,3% медленнее, чем в обычных условиях. При этом по данным работы [40], при работе сверлами диаметром 8 мм. электрическая изоляция приводила к повышению стойкости сверл на 28%, но после переточки повышение стойкости составило всего 5,6%. Однако при работе сверлами диаметром 9 мм. стойкость сверл в условиях электрической изоляции до переточки была даже ниже, чем без изоляции, а после переточки стойкость электрически изолированных сверл оказалась на 23,6% выше, чем у сверл, работавших без изоляции. Таким образом, результаты полученные авторами работы [40] противоречивы, поскольку с одной стороны авторы утверждают, что влияние электрической изоляции на стойкость

режущего инструмента ничтожно мало, а с другой – приводятся экспериментальные данные, показывающие, что стойкость сверл в условиях электрической изоляции возрастает, а износ замедляется.

Важно отметить, что в работе [40] электрическую изоляцию режущего инструмента осуществляли способом, предложенным в работе [7], состоящим в использовании склеенного вспомогательного инструмента. При этом, по данным работы [40] электрическое сопротивление такого устройства составляло порядка $8 \div 10$ МОм, в то время как в работе [37] приводятся данные о том, что минимально необходимое электрическое сопротивление для электрической изоляции режущего инструмента должно быть не менее 200 МОм. Иначе говоря, полученные авторами работы [40] отрицательные результаты можно объяснить недостатками предложенного В. А. Бобровским способа электрической изоляции режущего инструмента, так как данный способ не обеспечивал достаточной величины электрического сопротивления.

При этом, несмотря на существование ряда работ, содержащих отрицательные результаты применения метода электрической изоляции режущего инструмента, полученных авторами работ [40, 42, 63], более поздние работы, как отечественные [65, 66, 72–74], так и зарубежные [98, 102, 105, 106] указывают на существование положительного эффекта электрической изоляции режущего инструмента на его стойкость. Эффективность метода электрической изоляции режущего инструмента подтверждается данными, приведенными в Таблице 1.1. Из результатов, приведенных в Таблице 1.1 видно, что стойкость режущих инструментов в условиях электрической изоляции возрастает в $1,15 \div 7,0$ раз, при этом эффективность электрической изоляции выше при обработке титановых сплавов инструментом из быстрорежущих сталей, что подтверждает данные С.Н. Постникова [60].

Эффективность метода разрыва цепи электрического тока

№	Наименование завода	Инструмент	Сплав	Коэффициент повышения стойкости
1	Муромский машиностроительный завод им. С. Орджоникидзе [11]	Сверла, Р18	ЭИ654	1,5 – 4,0
			BT22	2,5 – 4,5
			BT5	3,0 – 7,0
2	Рыбинский машиностроительный завод [11]	Сверла, Р18	X18H9T	3,0
			ЭИ437БЦ	2,5
			4X14H14B2M	1,5
			45X	1,7
3	Московский автомобильный завод им. И.А. Лихачева [11]	Протяжки, Р18	40X	1,6
4	Харьковский завод «Электростанок» [11]	Протяжки, Р18	45	1,4
5	Московский завод «Динамо» им. С.М. Кирова [11]	Фрезы, Р18	45	1,7 – 2,0
		Фрезы, Р9К5 и BK10OM	X18H10T	1,5 – 2,0
6	Киевский завод станков- автоматов им. Горького [11]	Резцы, BK3M	СЧ 32 – 52	2,0
7	Харьковский инструментальный завод [11]	Сверла, Р6М5	ХВСТ	1,5 – 2,5
8	По данным работы [60]	Сверла, Р18	OT4-1	3
		Сверла, Р18	BT6	2,5
		Сверла, Р12	BT3	4
		Сверла, Р12	OT4-1	4,5
9	По данным работы [74]	Резцы, T15K6	45	1,2 – 2,0
		Резцы, BK8	СЧ20	1,9 – 3,3
		Резцы, BK8	BT5	1,15 – 1,25
		Резцы, TN20	BT5	2,06 – 2,93
		Резцы, KHT16	BT5	1,37 – 2,21
		Сверла, BK8	СЧ25	1,2 – 1,65
		Метчики	45	1,56

1.3. Выводы к главе 1

Завершая аналитический обзор литературы о влиянии электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок» на стойкость и износ режущего инструмента, на основании вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Существуют многочисленные данные, экспериментально подтверждающие эффективность электрической изоляции режущего инструмента как метода повышения его стойкости;
2. Большинство авторов соглашается, что электрический ток оказывает комплексное влияние на износ при резании, которое включает в себя интенсификацию окислительного, адгезионного и диффузионного изнашивания. При этом существуют данные и о влиянии электрического тока на силу резания, однако данные по влиянию электрической изоляции режущего инструмента на силу резания при обработке титановых сплавов полностью отсутствуют;
3. Ряд авторов, в частности С.Н. Постников и С.В. Васильев показывают, что на обрабатываемость резанием металлов существенное влияние оказывает контактная разность потенциалов пары «инструментальный материал – обрабатываемый материал», являющаяся постоянной частью термоЭДС. Из этого следует вывод о возможности определения по величине термоЭДС термопары «инструментальный материал – обрабатываемый материал» как обрабатываемости резанием различных материалов, так и эффективности электроизоляции как метода повышения стойкости режущего инструмента;
4. Существующие негативные результаты применения метода электрической изоляции режущего инструмента противоречивы, и могут быть объяснены недостатками имеющихся способов электрической изоляции режущего инструмента;
5. Недостатки существующих способов электрической изоляции режущего инструмента, состоящие в снижении жесткости инструментальной системы, трудоемкости изготовления и восстановления изолирующей оснастки, а также низкой долговечности изолирующей оснастки, являются также главной причиной того, что данный метод не находит широкого применения в промышленности;

6. Применение метода противотока ограничивается, в свою очередь, дороговизной специального оборудования, необходимого для осуществления данного метода, повышенными требованиями к квалификации рабочих при осуществлении метода противотока, а также снижением безопасности при проведении станочных работ на станках, оснащенных устройствами для введения в зону резания тока, противоположного существующему термоэлектрическому току в цепи «станок – инструмент – изделие – станок»;
7. В последние годы наблюдается рост интереса к исследованию электрических явлений в процессе резания и влияния электрической изоляции на стойкость режущего инструмента, как среди отечественных [65, 66, 72, 73, 74], так и среди зарубежных [98, 105, 106] исследователей.

1.4. Формулировка цели и задач диссертационной работы

Из литературного анализа следует, что задача повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов является актуальной для современного машиностроения, поэтому **целью** диссертационной работы является повышение стойкости режущего инструмента методом электроизоляции при обработке титановых сплавов.

Из представленных в литературном анализе данных видно, что для эффективного применения метода электрической изоляции при обработке титановых сплавов необходимо решить несколько задач: во-первых, задачу разработки и исследования эффективности нового способа электрической изоляции режущего инструмента, поскольку существующие способы не обеспечивают достаточной жесткости инструментальной системы, а технические средства для их осуществления отличаются дороговизной, недолговечностью и сложностью изготовления и восстановления; во-вторых, задачу исследования влияния электрической изоляции на силу резания и усадку стружки при резании

титановых сплавов, поскольку в ряде работ [25, 98, 105, 106] показано, что электрическая изоляция оказывает влияние на силу резания и усадку стружки при точении конструкционных сталей, в то время как по отношению к титановым сплавам такое влияние никогда не было исследовано.

Таким образом, для достижения поставленной цели в представленной диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние электрической изоляции режущего инструмента при точении титановых сплавов на силу резания и усадку стружки;
2. Исследовать взаимосвязь между изменением силы резания и усадки стружки при точении электрически изолированными резцами изделий из титановых сплавов и стойкостью режущего инструмента;
3. Разработать усовершенствованный способ электрической изоляции режущего инструмента, отвечающий требованиям по жесткости инструментальной системы, долговечности изолирующей оснастки и простоте её изготовления и восстановления;
4. Исследовать стойкость режущего инструмента при обработке титановых сплавов в условиях электрической изоляции.

Решение поставленных задач требует применения комплекса экспериментальных и теоретических методов, связанных с решением различных подзадач работы.

Первой задачей является исследование влияния электрического тока на силу резания и усадку стружки. Как было указано ранее, одним из интересных, но малоизученных при резании титановых сплавов явлений при электрической изоляции режущего инструмента является изменение силы резания. Применительно к стали *AISI 1045 BN* уменьшение силы резания при использовании электрической изоляции резца было показано в работе [105], в то время как при обработке титановых сплавов этот эффект остается неисследованным, и представляет существенный научный интерес. При этом отсутствует теоретическое объяснение наблюдаемого явления уменьшения силы

резания при использовании электрической изоляции, хотя оно может быть создано на основе теории электропластической деформации, основные положения которой излагаются в работах [3, 4, 75]. Данная теория успешно применяется для объяснения явлений, происходящих при воздействии на зону резания импульсным электрическим током высокой плотности [81]. При этом авторы работы [81] указывают на необходимость рационального выбора направления импульсного тока при работе, таким образом, резание с импульсным током по существу аналогично методу противотока. Очевидно, что явления, происходящие в зоне резания при использовании метода противотока должны быть аналогичны явлениям, происходящим в зоне резания при использовании метода электрической изоляции режущего инструмента, поскольку речь идет об использовании одного и того же механизма воздействия на зону резания, а именно изменения силы тока в зоне резания. Исследование усадки стружки необходимо поскольку во-первых, по данным работы [1] изменение силы резания при резании приводит к изменению усадки стружки, а во-вторых, по данным работы [90] усадка стружки является ключевым параметром, определяющим энергетические затраты на осуществление процесса резания.

Таким образом, для решения задачи исследования влияния электрической изоляции на силу резания при точении титановых сплавов, необходимо решить следующие **подзадачи**:

1. Произвести расчет дополнительной силы, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок», существование которой предсказывается теорией электропластической деформации металлов [3, 4, 75];
2. Экспериментально определить степень влияния электрического тока на силу резания при точении титановых сплавов;
3. Экспериментально определить степень влияния электрического тока на усадку стружки при точении титановых сплавов.

Второй задачей является установление корреляционных связей между изменением силы резания и усадки стружки при точении титановых сплавов электрически изолированным режущим инструментом, и стойкостью режущего инструмента. Для решения этой задачи необходимо решить следующие **подзадачи**:

1. Рассчитать коэффициент корреляции между дополнительной силой, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок» и изменением силы резания при работе электрически изолированным токарным резцом;
2. Рассчитать коэффициент множественной корреляции между силой резания, усадкой стружки и стойкостью режущего инструмента, для чего определить соответствующие частные коэффициенты корреляции между данными тремя параметрами.

Третьей задачей, поставленной в данной работе, является задача разработки усовершенствованного способа электрической изоляции режущего инструмента. Новый способ должен обладать следующими основными характеристиками:

1. Способ должен быть относительно дешев и прост в реализации;
2. Приспособления и оснастка, используемые при реализации нового способа должны отличаться долговечностью и простотой восстановления в случае утраты ими технологических свойств;
3. Нельзя допустить снижения жесткости инструментальной системы при использовании нового способа повышения стойкости режущего инструмента методом электроизоляции.

Известно что оксид титана TiO_2 обладает диэлектрическими свойствами, что обуславливает его применяемость в конденсаторной керамике [24, 67]. Известно также, что на поверхности титанового сплава достаточно легко создать оксидную пленку, которая будет содержать TiO_2 , переходные оксиды титана, а также оксиды других элементов, входящих в состав сплава. Использование вспомогательного инструмента, изготовленного из титановых сплавов с оксидным

покрытием, могло бы быть приемлемым решением поставленной задачи. Однако данные по физическим свойствам оксидной пленки, образующейся на поверхности титановых сплавов, практически отсутствуют. По данным работы [37] для успешного разрыва цепи электрического тока требуется электрическое сопротивление величиной не менее 200 МОм.

В то же время, существует также ряд ограничений, накладываемых на материал, из которого изготавливается вспомогательный инструмент. Материал должен обладать достаточно высокой прочностью и твердостью. Кроме того существуют ограничения и на толщину оксидной пленки, так как чрезмерно толстая оксидная пленка будет приводить к изменению геометрических размеров вспомогательного инструмента и, как следствие, биению, вибрациям при резании, и ухудшению качества обработанной поверхности.

Таким образом, обозначенная задача разработки нового способа электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов, разбивается на ряд **подзадач**:

1. Исследовать электрическое сопротивление титановых сплавов различных марок после термического оксидирования. При этом известно, что минимально необходимое для осуществления электрической изоляции режущего инструмента сопротивление должно составлять не менее 200 МОм [37];
2. Исследовать прирост массы и толщины образцов из титановых сплавов после термического оксидирования, поскольку при реализации предлагаемого способа существуют жесткие допуски на толщину оксидного слоя, так как необходимо, чтобы геометрические размеры вспомогательного инструмента из титановых сплавов с диэлектрическим оксидным покрытием отвечали требованиям стандартов;
3. Исследовать твердость образцов из титановых сплавов после термического оксидирования в связи с тем, что государственные стандарты накладывают

ограничения на минимально допустимую твердость вспомогательного инструмента;

4. Сформулировать предлагаемый способ электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов на основании полученных результатов.

Последней задачей является определение стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов с электрической изоляцией инструмента и без нее. Из работы [60] известно, что существует возможность предсказания эффективности метода электрической изоляции режущего инструмента при обработке тех или иных конструкционных материалов на основе исследования термоЭДС при нагреве термопар «инструментальный материал – обрабатываемый материал», поэтому целесообразно провести тарирование термопар «титановый сплав – сталь Р6М5» с целью прогнозирования эффективности предлагаемого способа. Затем, полученные данные необходимо сопоставить с результатами экспериментальных исследований. Необходимо экспериментально исследовать эффективность предлагаемого способа при работе твердосплавным и быстрорежущим инструментом на различных операциях обработки резанием титановых сплавов.

Поэтому для решения задачи определения эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента при обработке резанием титановых сплавов необходимо решить следующие **подзадачи**:

1. Исследовать термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5» с целью прогнозирования эффективности предлагаемого способа при обработке различных титановых сплавов, а затем сопоставить получившиеся результаты с экспериментальными данными;
2. Исследовать стойкость режущего инструмента при точении титановых сплавов в условиях электрической изоляции;
3. Исследовать стойкость режущего инструмента при сверлении титановых сплавов различных марок электрически изолированными сверлами;

4. Исследовать стойкость режущего инструмента при обработке титановых сплавов в промышленных условиях;
5. Рассчитать экономический эффект от внедрения предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента в производство.

2. Материалы и методика исследования

2.1. Используемые материалы

В представленной работе использованы титановые сплавы, марка, химический состав, и некоторые свойства которых приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1

Физические и механические свойства исследуемых титановых сплавов в отожженном состоянии

Марка сплава	Средний химический состав, мас. %	Механические свойства		Физические свойства	
		σ_B	KCU	E	α
		МПа	кДж/м ²	ГПа	Вт/м·град
BT1-0	Технический титан	345	500	112	8,85
OT4	Ti-3,5Al-1,5Mn	685	500	115	8
BT20	Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V	885	450	112	8
BT6	Ti-5Al-4V	885	400	115	8,37
BT3-1	Ti-3Al-2,5Mo-2Cr-0,5Fe-0,3Si	930	300	115	8,01
BT14	Ti-4,5Al-3Mo-1V	885	500	110	8,37
BT23	Ti-5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,7Fe	885	300	115	8
VST 5553	Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr	1190	300	115	8

2.2. Экспериментальные методы исследования

В представленной работе применяется обширный эмпирический инструментарий, поэтому целесообразно сгруппировать его по подзадачам, решаемым с использованием данного инструментария.

2.2.1. Методика исследования силы тока при точении

Исследования проводились при точении прутков из титановых сплавов марок BT1-0, OT4, BT6 и VST5553, химический состав и некоторые механические свойства которых приведены в Таблице 2.1, на токарно-винторезном станке ФТ-11. При исследовании термоЭДС и силы тока при точении использовался резец проходной, отогнутый сборный PTTNR 2525M-22, изображенный на

Рисунке 2.1, оснащенный твердосплавной пластиной производства Sandvik марки *TNMG220408-SF* из сплава *GC 1105* без покрытия, изображенной на Рисунке 2.2. При установке пластины в державке обеспечивается передний угол -6° , задний угол 6° , и угол наклона режущей кромки -6° .

Измерение силы тока проводилось при помощи экспериментальной установки, изображенной на Рисунке 2.3, аналогичной установке, предложенной в работе [68], без электрической изоляции и с электрической изоляцией. Резец был электрически изолирован от станка при помощи двух прокладок, изготовленных из сплава *OT4* и подвергнутых термическому оксидированию в печи при 850°C в течение 5 часов.

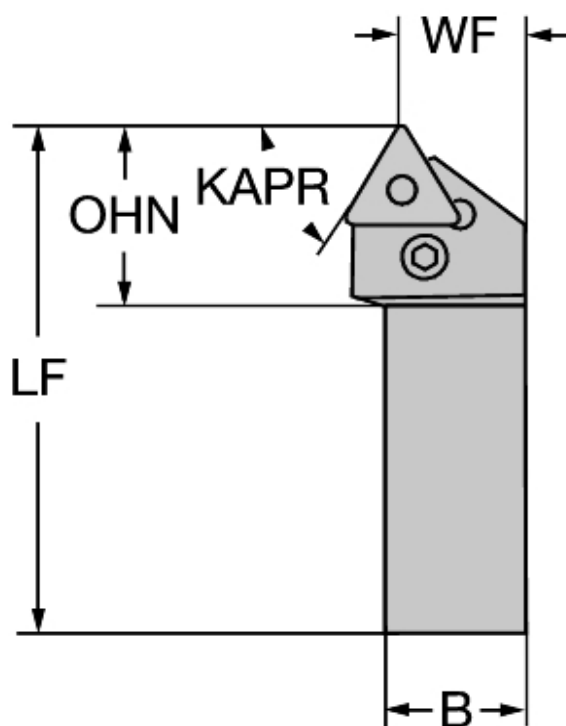


Рисунок 2.1. Резец *PTTNR 2525M-22*:

$KAPR = 60^\circ$, $WF = 22$ мм, $OHN = 31,9$ мм, $LF = 150$ мм, $B = 25$ мм

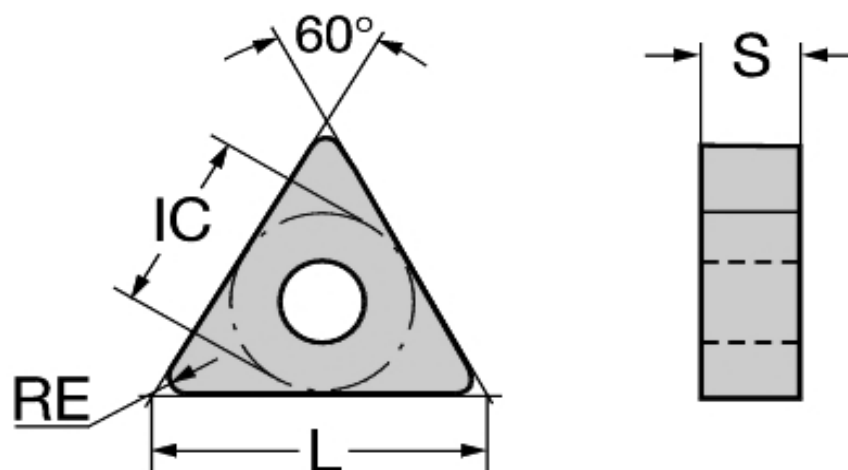


Рисунок 2.2. Пластина твердосплавная *TNMG220408-SF*:

$L = 21,997$ мм, $S = 4,7625$ мм, $IC = 12,7$ мм, $RE = 0,8$ мм

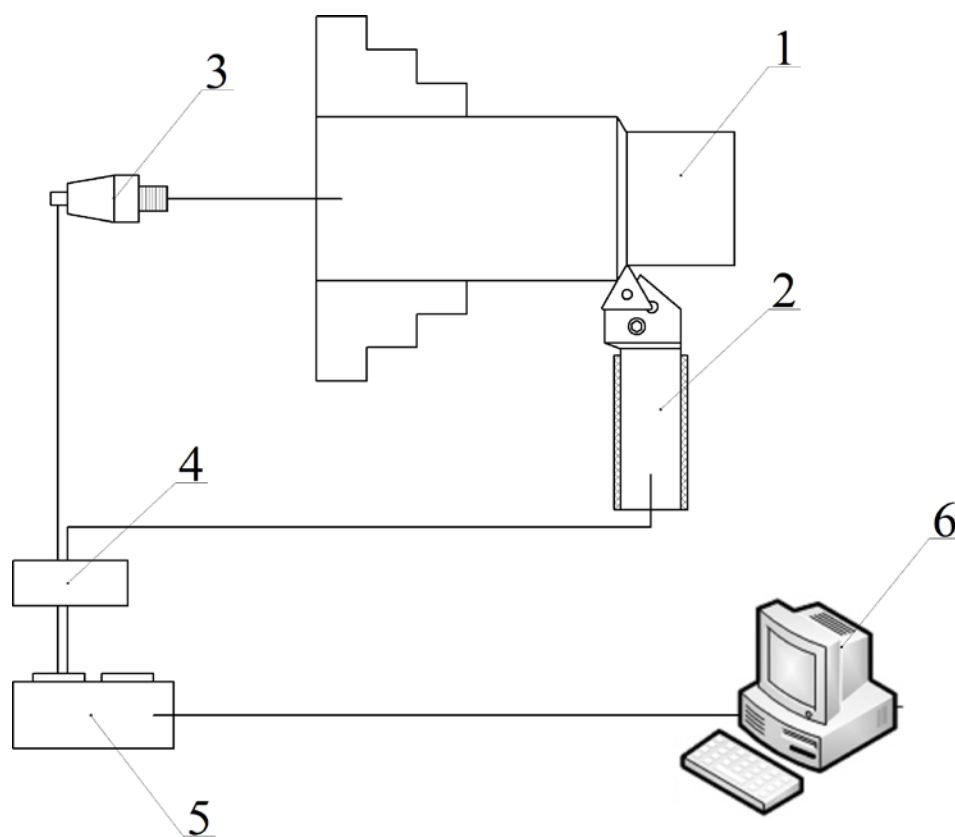


Рисунок 2.3. Экспериментальная установка:

1 – пруток; 2 – резец; 3 – электрический соединитель *Mercotac 110*; 4 – шунт *75ШСУЗ*; 5 – плата сбора данных *NI-USB 6210*; 6 – персональный компьютер



Рисунок 2.4. Экспериментальная установка

Плата сбора данных *NI USB 6210* позволяет обрабатывать сигнал ЭДС, точность измерения которого указана в Таблице 2.2.

Таблица 2.2

Точность измерения сигнала ЭДС платой *NI USB 6210*

Диапазон измерения сигнала	Номинальное разрешение сигнала
От -10 до +10 В	320 мкВ
От -5 до +5 В	160 мкВ
От -1 до +1 В	32 мкВ
От -200 мВ до +200 мВ	6,4 мкВ

Сбор экспериментальных данных производился в программном пакете *LabVIEW 2010* с использованием дополнения *NI-DAQmx*. Главное рабочее окно программы сбора данных изображено на Рисунке 2.5. Блок-схема изображена на Рисунке 2.6.

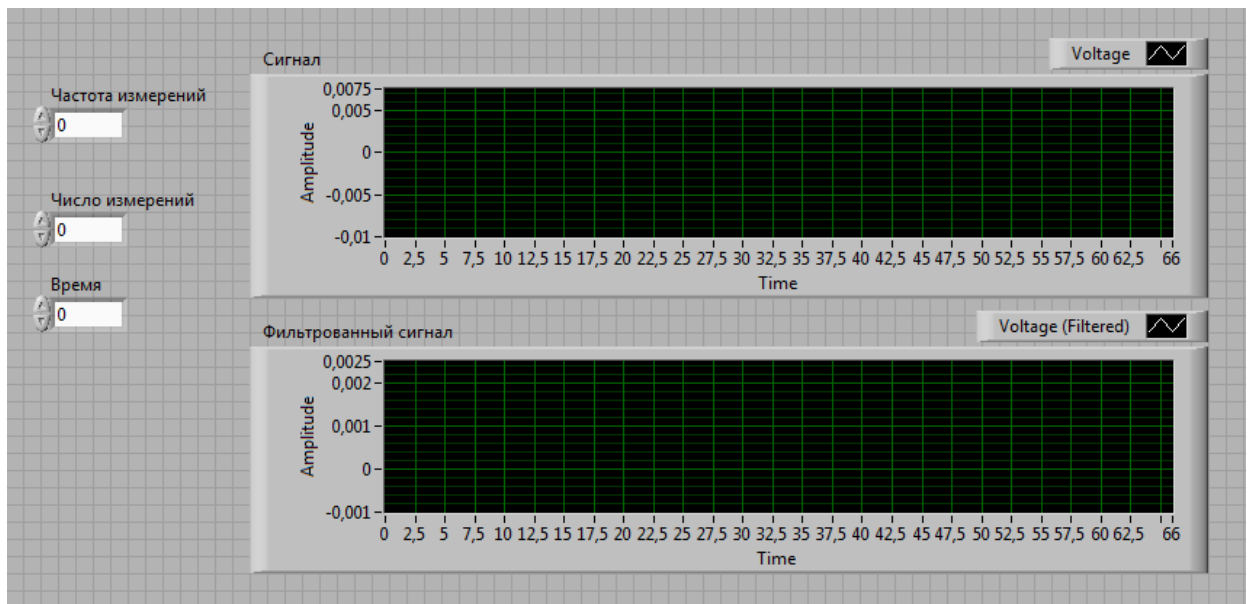


Рисунок 2.5. Главное окно программы сбора данных

Как видно из Рисунка 2.5 и Рисунка 2.6, для запуска программы пользователю необходимо задать частоту измерений, время измерений и общее число измерений.

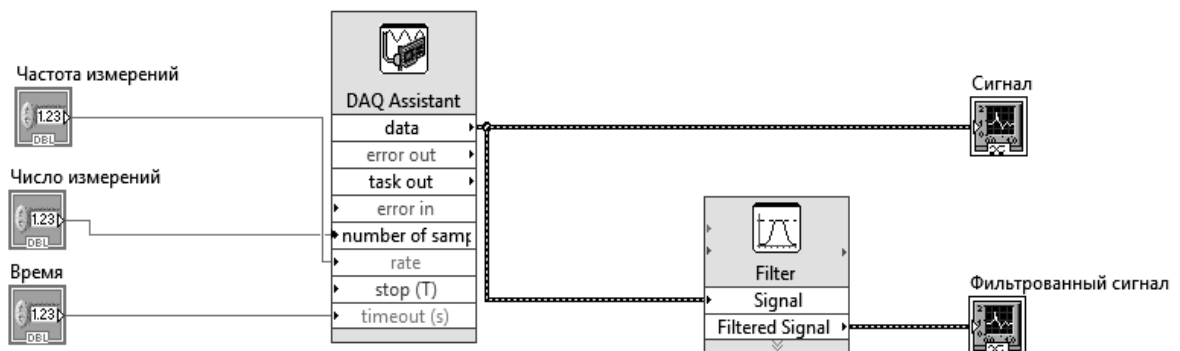


Рисунок 2.6. Блок-схема программы сбора данных

Для выделения и очистки сигнала от шумов рекомендуется применение фильтрации. Использовался низкочастотный фильтр Чебышева первого рода, основными особенностями которого по данным [83, 86] являются:

1. Минимизация пиковой ошибки в полосе пропускания;

2. Неизменные пульсации частотной характеристики в полосе пропускания;
3. Монотонно уменьшающаяся частотная характеристика в полосе задержания;
4. Более крутой спад АЧХ по сравнению с фильтром Баттерворта (фильтр Чебышева может обеспечить более крутой переход между полосой пропускания и полосой задержания в фильтре более низкого порядка).

Частота дискретизации сигнала во всех случаях была принята равной 1 кГц, по аналогии с работой [55], соответственно использовалась полоса пропускания фильтра Чебышева от 25 до 400 Гц. Используемая конфигурация фильтра приведена на Рисунке 2.7.

Результаты измерений анализировали с использованием методики регрессионного анализа результатов многофакторного эксперимента, изложенной в [53].

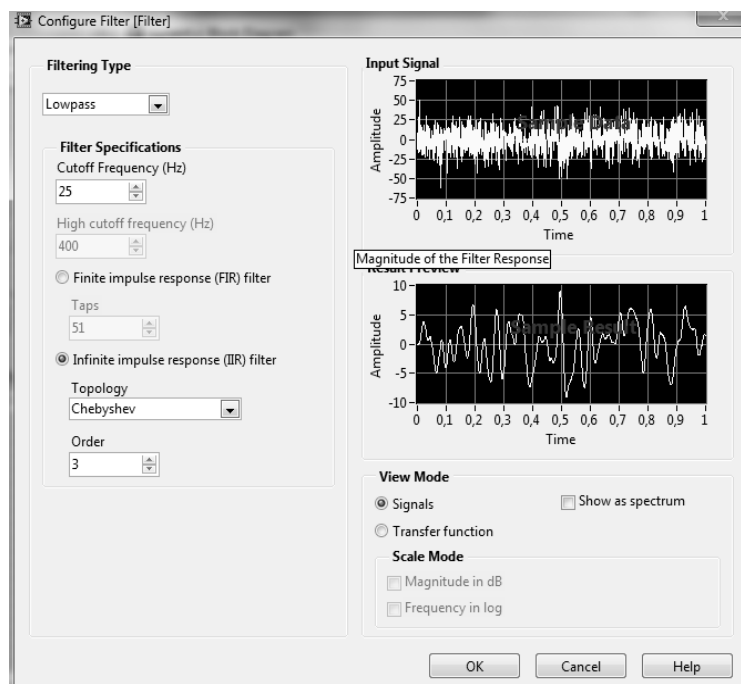


Рисунок 2.7. Параметры настройки фильтра Чебышева

2.2.2. Методика исследования силы резания при точении

Исследования проводились при точении прутков из сплавов ВТ1-0, ОТ4, ВТ6 и VST5553 на токарно-винторезном станке ФТ-11. Использовался резец проходной отогнутый сборный *PTTNR 2525M-22*, оснащенный твердосплавной пластиной производства *Sandvik* марки *TNMG220408-SF* из сплава *GC 1105*.

Для измерения силы резания использовалась экспериментальная установка, представленная на Рисунках 2.8 и 2.9. Экспериментальная установка состоит из укороченной державки резца с отверстием, которая при помощи струбцины крепится к датчику силы балочного типа *SBA* (Токвес, Россия), который, подобно обычной державке резца, закреплен в резцедержателе станка. Датчик испытывает упругие деформации, в результате чего генерируется ЭДС, поступающая в аналоговый усилитель сигнала, откуда она передается на плату сбора данных *NI USB 6210* (*National Instruments*, США). Плата сбора данных выполняет функции АЦП, и передает оцифрованный сигнал на персональный компьютер.

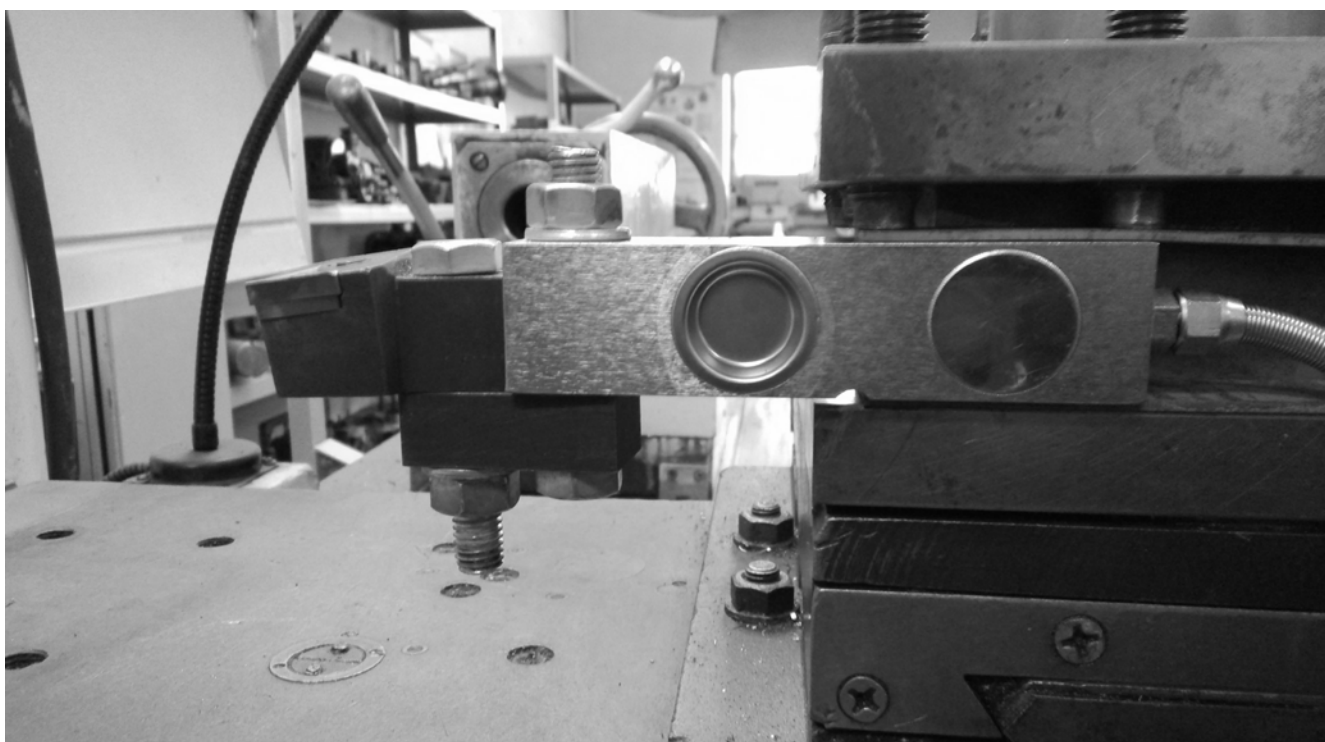


Рисунок 2.8. Установка для измерения силы резания

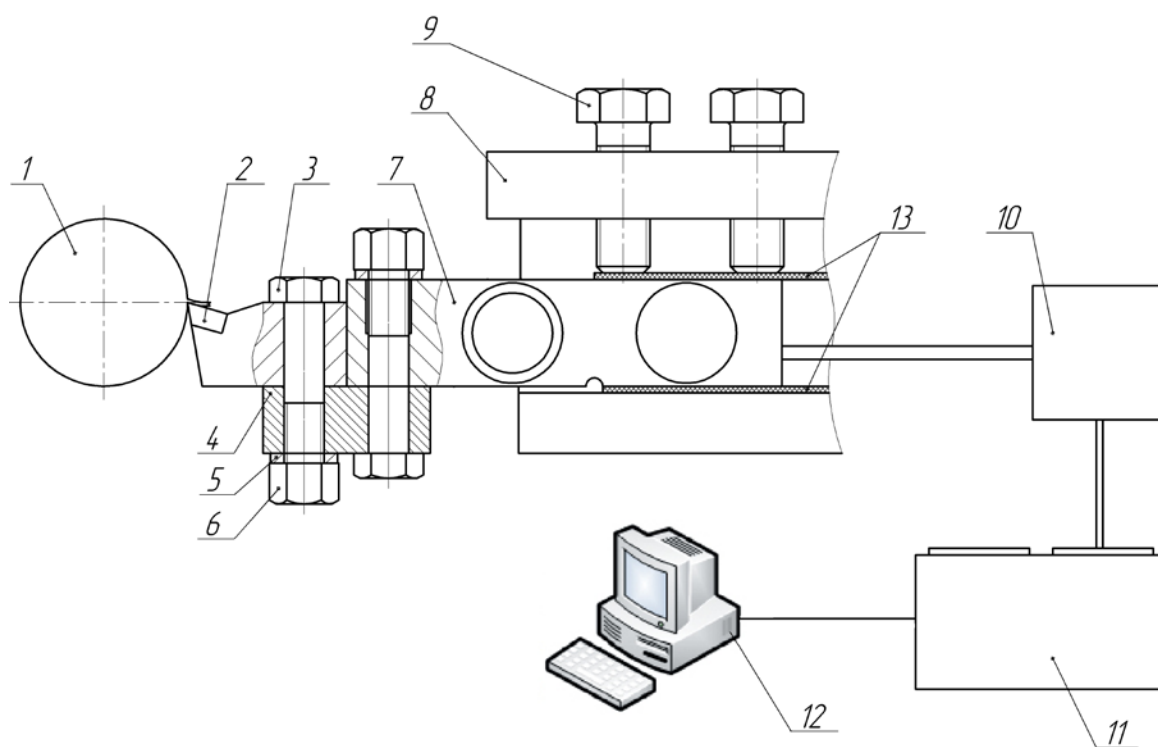


Рисунок 2.9. Схема установки для измерения силы резания:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – резец; 3 – болт М12; 4 – трубка; 5 – шайба; 6 – гайка М12; 7 – балочный тензодатчик SBA; 8 – резцедержатель; 9 – винты резцедержателя; 10 – усилитель сигнала датчика; 11 – плата сбора данных NI USB 6210; 12 – персональный компьютер

Значительный вылет резца в представленной измерительной схеме приводит к вибрациям, что обуславливает необходимость использования фильтрации для выделения и очистки сигнала силы резания от шумов. Для этого использовался фильтр Чебышева первого рода третьего порядка с полосой пропускания $25 \div 400$ Гц при частоте измеряемого сигнала 1 кГц.

Тарирование датчика осуществляли на установке, приведенной на Рисунке 2.10. Датчик 7 вместе с прикрепленным к нему резцом устанавливали в резцедержателе 2 так же, как на станке, резцедержатель крепился к суппорту токарного станка 3, который в свою очередь закреплялся при помощи болтов на металлическом столе 4. Стол 4 и универсальная испытательная машина *Zwick/Roell Z050* (с максимальным усилием на траверсе, равным 50 кН) прикреплялись к полу. В процессе испытания траверса универсальной испытательной машины 1 перемещалась вниз, как при испытании образцов на

сжатие, при этом нагружающее устройство универсальной испытательной машины 1 создавало давление на резец, прикрепленный к датчику. В траверсе универсальной испытательной машины установлен высокоточный динамометр *Xforce*, позволяющий измерять силу с точностью до 0,25%, который соединен с АЦП в управляющей колонне универсальной испытательной машины. Сигнал с АЦП универсальной испытательной машины поступал на персональный компьютер 6, где обрабатывался в программе *Zwick testXpert*. В результате обработки сигнала в этой программе строились графики зависимости силы на траверсе от времени нагружения, пример такого графика приведен на Рисунке 2.11.

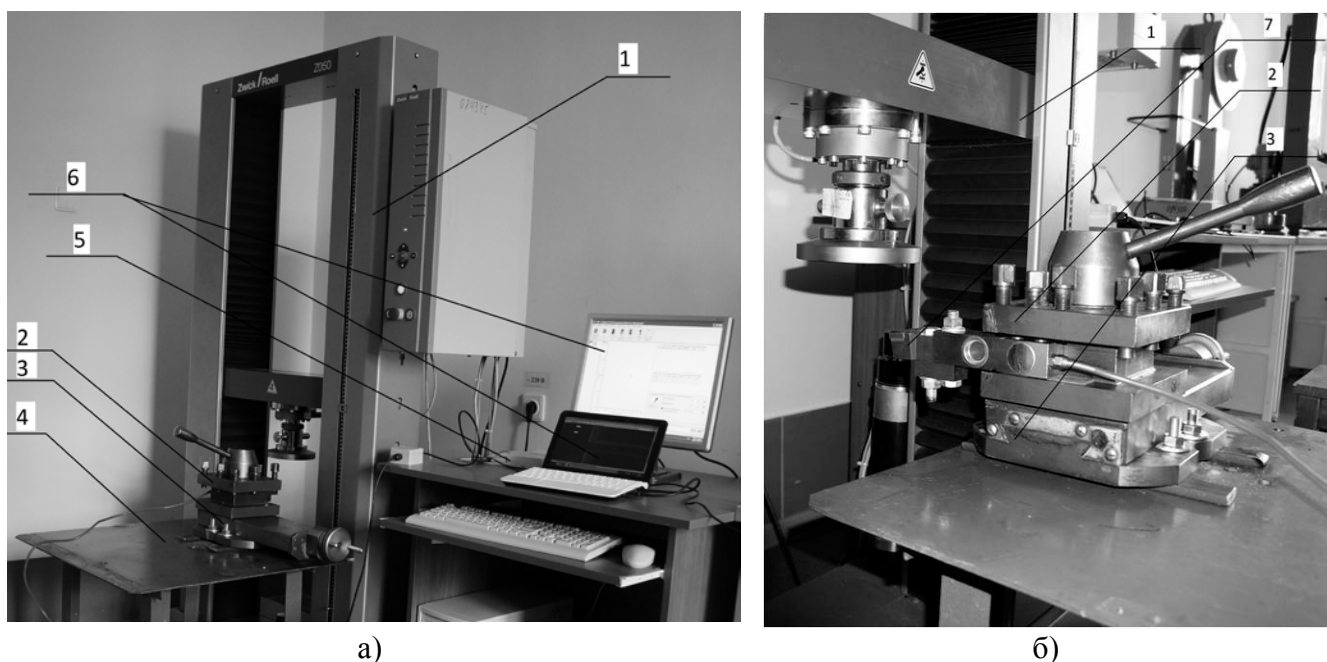


Рисунок 2.10. Установка для тарирования датчика силы резания:

1 – универсальная испытательная машина *Zwick/Roell Z050*; 2 – резцедержатель; 3 – суппорт станка ФТ-11; 4 – стол; 5 – плата сбора данных *NI USB 6210*; 6 – персональные компьютеры; 7 – датчик силы резания *SBA*

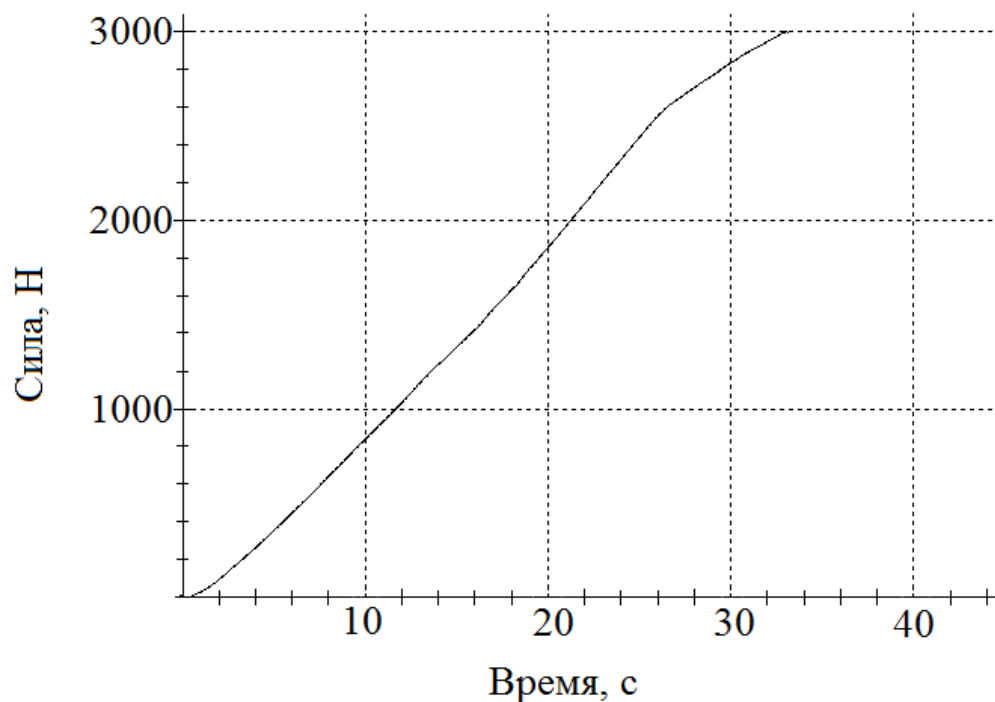


Рисунок 2.11. График зависимости силы на траверсе универсальной испытательной машины *Zwick/Roell Z050* от времени

Одновременно, датчик силы резания через усилитель передавал сигнал на плату сбора данных *NI USB 6210*, которая, выполняя функции АЦП, передавала сигнал на компьютер 6. В результате строились графики зависимости ЭДС датчика от времени, пример такого графика приведен на Рисунке 2.12.

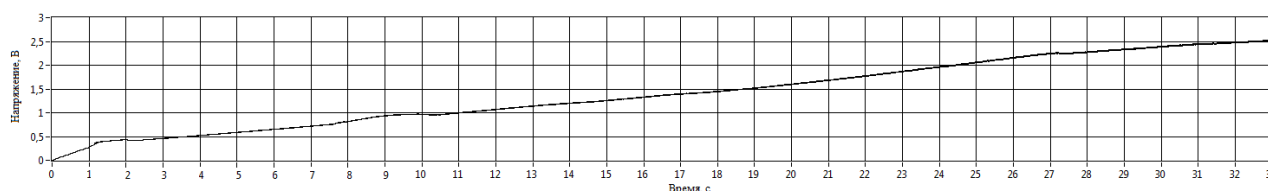


Рисунок 2.12. График зависимости ЭДС датчика силы от времени

Была проведена серия из пяти испытаний. Анализ и обработка данных, полученных в ходе испытания, позволили построить тарировочный график зависимости силы от ЭДС датчика, приведенный на Рисунке 2.13.

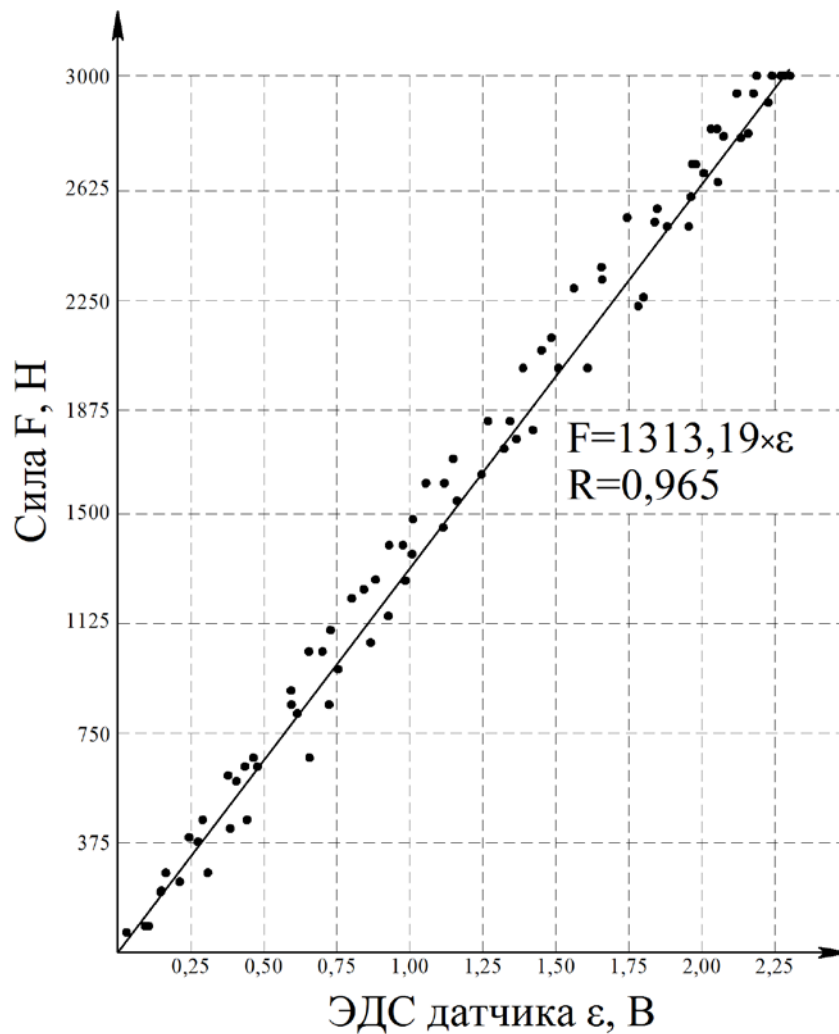


Рисунок 2.13. Тарировочный график датчика силы резания

По результатам анализа данных была получена следующая формула для перевода значений ЭДС датчика в значения силы резания

$$F = 1313,19 \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

где F – сила резания, Н; ε – ЭДС датчика силы, В.

2.2.3. Методика исследования усадки стружки при точении

Коэффициент продольной усадки стружки ζ_L определяли методом взвешивания (способом А.М. Розенберга) [81, 91] из соотношения [91]

$$\zeta_L = \frac{A_{ch}}{A_w}, \quad (2.2)$$

где A_{ch} – площадь поперечного сечения стружки, мм², а A_w – площадь поперечного сечения срезаемого слоя, мм².

Для определения площади поперечного сечения стружки используется формула [81, 91]

$$A_{ch} = \frac{m_{ch}}{l_c \cdot \rho_w}, \quad (2.3)$$

где m_{ch} – масса измеренного участка стружки, кг; l_c – длина измеренного участка стружки, м, а ρ_w – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Для определения площади поперечного сечения срезаемого слоя используется формула [81, 91]

$$A_w = t \cdot s, \quad (2.4)$$

где t – глубина резания, мм; s – подача мм/об.

Таким образом, коэффициент продольной усадки стружки определяется по формуле

$$\zeta_L = \frac{m_{ch}}{l_c \cdot \rho_w \cdot t \cdot s} \quad (2.5)$$

Массу участка стружки определяли с помощью аналитических весов *ОНАУS Adventurer Pro* с дискретностью 0,0001 г., длину участка стружки измеряли по наружному контуру при помощи гибкой проволоки и электронного штангенциркуля ШЦЦ-I-125 с точностью до 0,01 мм.

Плотность титанового сплава ВТ1-0 считали равной 4505 кг/м³, титанового сплава ОТ4 равной 4550 кг/м³, титанового сплава ВТ6 4450 кг/м³, титанового сплава VST 5553 4620 кг/м³.

Усадку стружки измеряли как при использовании электрической изоляции резца посредством двух прокладок (верхней и нижней), изготовленных из титанового сплава ОТ4 и подвергнутых термическому оксидированию при температуре 850 °С в течение 5 часов, так и без использования электрической изоляции.

2.2.4. Методика исследования термически оксидированных титановых сплавов

Для решения поставленных задач исследовались следующие марки титановых сплавов: BT1-0, OT4, BT20, BT6, BT3-1, BT14, BT23, VST 5553. Химический состав и некоторые свойства сплавов по данным работ [18, 27, 31, 78] приведены в Таблице 2.1. Среди исследуемых сплавов присутствуют сплавы α - и $(\alpha+\beta)$ -групп. Сплав BT1-0 выбран как модельный, остальные – вследствие близости их механических свойств механическим свойствам конструкционных сталей, используемых для изготовления вспомогательного инструмента. В Таблице 2.3 для сравнения приведены физические и механические свойства сталей 45 и 40X [23].

Таблица 2.3

Физические и механические свойства конструкционных сталей

Марка сплава	Механические свойства		Физические свойства	
	σ_B	<i>HB</i>	<i>E</i>	<i>l</i>
	МПа		МПа	Вт/(м·°C)
45	600	229	2	48
40X	980	269	2,14	46

Из сопоставления данных Таблиц 2.1 и 2.2 нетрудно заметить, что только сплав BT1-0 не обладает прочностью, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 17166-71, однако его исследование является важным для понимания механизма образования диэлектрических поверхностных свойств при оксидировании титановых сплавов.

Образцы с геометрическими размерами 40×30×4 мм из исследуемых сплавов нагревали в печи ПКЛ-1,2-12, а затем закаливали в воду. После закалки образцы зачищали на шлифовально-полировальном станке *Struers LaboPol-1* и обезжиривали погружением в ванну со смесью 2% раствора соляной и 0,5% раствора азотной кислоты в воде в течение 4÷5 минут.

После обезжиривания измеряли исходную массу образцов на весах марки ГОСТМЕТР ВЛТЭ-210, имеющих точность до 0,0015 г, твердость образцов после закалки на твердомере Бринелля марки ТБ5004, и исходную величину электрического сопротивления на приборе *Sonel MIC-1000* с точностью до 3% при напряжении постоянного тока, равном 50 В.

Измерение данных параметров, как указывалось ранее, необходимо для определения марки и химического состава титанового сплава, который после термического оксидирования будет обладать высокой твердостью, высоким поверхностным сопротивлением, но при этом минимальным приростом массы за счет роста оксидной пленки и, соответственно, минимальным изменением геометрических размеров.

Затем образцы подвергали термическому оксидированию в печи при температурах 650, 700, 750 и 800 °С и времени выдержки соответственно 8, 7, 6 и 5 часов. Температура нагрева выбрана в соответствии с рекомендациями работы [20], так как меньшие температуры нагрева требуют большей выдержки, что нецелесообразно с точки зрения временных затрат на производство технологической оснастки, в то время как большие температуры нагрева приводят к отслаиванию оксидной пленки. Время нагрева выбрано с целью обеспечения одинаковой толщины покрытия порядка 10÷60 мкм в соответствии с диаграммой Дженкинса, приведенной на Рисунке 2.14.

На диаграмме имеется три зоны:

- А) оксидирование при высоких температурах (свыше 925 °С), происходящее по параболическому закону. Имеет место диффузия через плотную окалину, толщина которой превосходит критическую. При еще более высоких температурах происходит полное спекание окалины;
- В) оксидирование при средних температурах (от 600 до 925 °С). При достижении плотной окалиной критической толщины параболический закон окисления сменяется линейным. Растущая окалина имеет пористость;

С) окислирование при низких температурах (ниже 600 °С), характеризующееся параболическим законом, так как при окислении происходит диффузия кислорода через плотную растущую окалину.

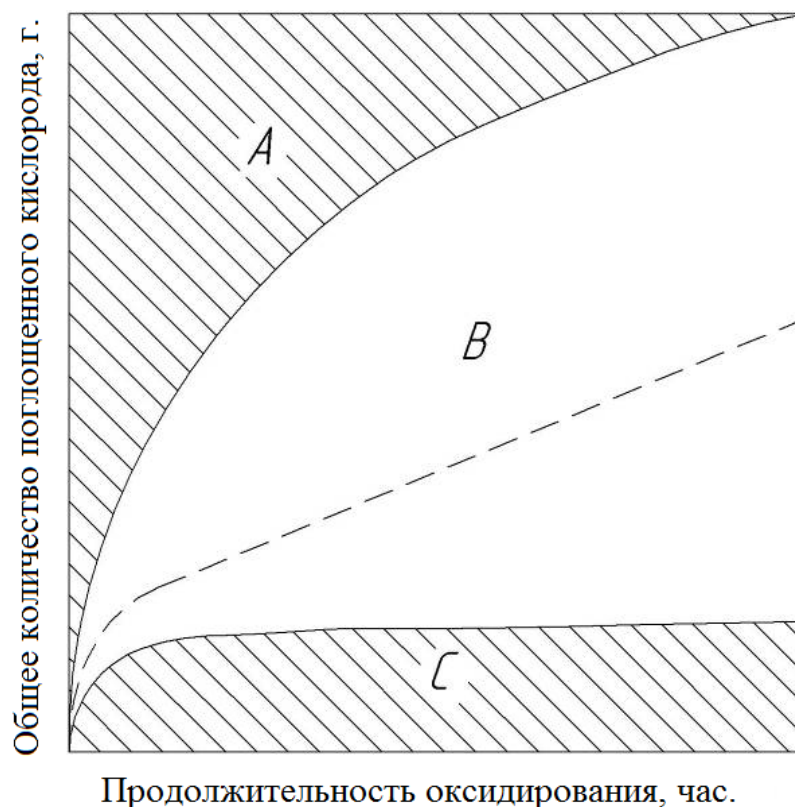


Рисунок 2.14. Диаграмма Дженкинса, демонстрирующая характер окисления титана

Образцы после термического окислирования охлаждали на воздухе. После термического окислирования производили повторное измерение массы, твердости и электрического сопротивления образцов.

Прирост массы образцов оценивали по формуле

$$\Delta m_{\text{оти}} = \frac{\Delta m_{\text{абс}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

где $\Delta m_{\text{оти}}$ - относительный прирост массы образца; $\Delta m_{\text{абс}}$ - абсолютный прирост массы образца, равный разности массы образца после и до окислирования, г; $m_{\text{исх}}$ - исходная масса образца, г.

2.2.5. Методика исследования термоЭДС в термопарах «титановый сплав – сталь Р6М5»

Для проверки гипотезы С.Н. Постникова о полуэмпирическом определении эффективности электроизоляции режущего инструмента по величине термоЭДС при нагреве термопар «обрабатываемый материал – инструментальный материал» проводили исследование термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5». Для измерения термоЭДС в температурном диапазоне от 50 до 850 °С материалом исследования послужили изготовленные термопары из сплавов титана ВТ1-0, ОТ4, ВТ20, ВТ6 и ВТЗ-1, а также из сталей марок 45 и 12Х18Н10Т, где один проводник – проволока диаметром 4,5 мм. из титанового сплава, другой проводник – проволока диаметром 4,5 мм. из стали Р6М5. Сварку проволок осуществляли на установке «Форсаж 160 АД». Сваривали в ручном режиме неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона. Термопары подвергали отжигу в горизонтальной трубчатой печи в течении 60 мин., при температуре 840 °С

Измерение термоЭДС осуществляли в автоматическом режиме на автоматизированной системе поверки термопреобразователей в условиях ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» под руководством начальника лаборатории Медведева В.В. Измерительная схема для построения тарировочного графика термопар приведена на Рисунке 2.15.

Термопару «титановый сплав – сталь Р6М5» поместили в малоиндукционную горизонтальную трубчатую печь МТП-2МР и подключили к измерительной схеме (блок управления БУ-1М). Внутри нагревательного элемента печи установлена платинородий-платиновая термопара, являющаяся датчиком блока управления. Точность платинородий-платиновой термопары в диапазоне температур 0÷600 °С составляет ± 1 °С, а в температурном диапазоне 600÷1300 °С $\pm 0,003$ °С [5]. Рабочий конец термопары расположен у стенки нагревательного элемента в центре печи. Свободные концы термопары и провода

электропитания выведены через кабель печи на разъем, который подключается к блоку управления. Блок управления показывал температуру, установившуюся в печи при её нагреве, каждому значению температуры соответствовало значение термоЭДС наблюдаемое на мониторе АСПТ (автоматизированная система поверки термопреобразователей).

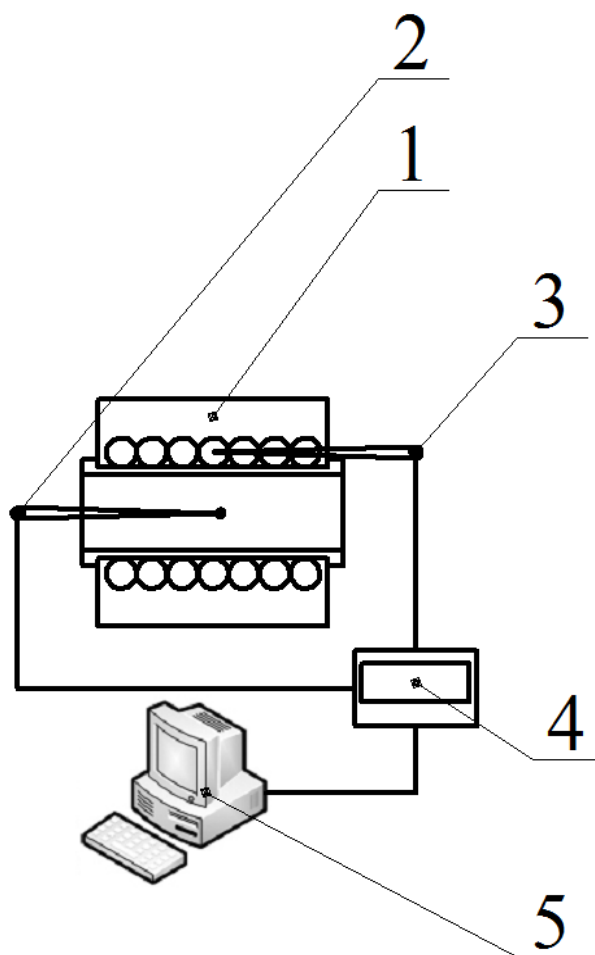


Рис. 2.15. Установка для тарирования термопар:

1 – горизонтальная трубчатая печь МТП-2МР; 2 – термопара «титановый сплав – сталь Р6М5»;
3 – платиновый платиновая термопара; 4 – блок управления БУ-1М; 5 – автоматизированная система поверки термопреобразователей

2.2.6. Методика исследования стойкости резцов, оснащенных твердосплавной неперетачиваемой пластиной

Исследовали влияние электрической изоляции и параметров режима резания на стойкость резцов проходных отогнутых сборных *PTTNR 2525M-22*

(Рисунок 2.1), оснащенными неперетачиваемыми пластинами марки *TNMG220408-SF* (Рисунок 2.2) из твердого сплава *GC 1105* при точении титановых сплавов марок *BT1-0*, *OT4*, *BT6* и *VST 5553*, химический состав и свойства которых приведены в Таблице 2.1.

Критерием износа служила величина площадки износа по задней поверхности. Износ замеряли после каждого прохода при помощи микроскопа МПБ-3, оснащенного объективом с увеличением в $50 \pm 2,5$ крат, цена деления микроскопа $0,02 \pm 0,0025$ мм, предел абсолютной допустимой погрешности $\pm 0,006$ мм. Когда износ по задней поверхности достигал величины 0,2 мм, или незначительно превышал её, пластинку считали затупленной, и резание прекращалось. Данная величина износа соответствует периоду нормального износа режущего инструмента при обработке титановых сплавов [108]. Период стойкости оценивали в минутах.

Электрическую изоляцию резца осуществляли при помощи двух прокладок (верхней и нижней) из титанового сплава марки *OT4*, подвергнутых термическому оксидированию при 800°C в течение 5 часов. Охлаждение при обработке не использовалось.

Матрица планирования эксперимента приведена в Таблице 2.4. Аналогичная матрица планирования эксперимента использовалась в исследованиях термоЭДС и силы тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок», силы резания, методика проведения которых расписана в разделах 2.2.1 и 2.2.2. Выбор таких режимов резания обусловлен следующими зависимостями [90], рекомендованными фирмой-изготовителем режущего инструмента для полустойкой обработки

$$\begin{cases} t \geq r_n (1 - \cos \varphi) \\ s \leq 2r_n \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

где t – глубина резания, мм; r_n – радиус при вершине резца, мм; s – подача, мм/об; φ – главный угол в плане, °; φ_1 – вспомогательный угол в плане, °.

Рассчитывая при $r_n = 0,8$ мм, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 60^\circ$, получаем

$$\begin{cases} t \geq 0,4 \text{ мм} \\ s \leq 1,38 \text{ мм/об} \end{cases}$$

Таблица 2.4

Матрица планирования эксперимента при точении титановых сплавов

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция
1	15,70	0,1	0,5	+1
2	31,40	0,1	0,5	+1
3	15,70	0,38	0,5	+1
4	31,40	0,38	0,5	+1
5	15,70	0,1	1,0	+1
6	31,40	0,1	1,0	+1
7	15,70	0,38	1,0	+1
8	31,40	0,38	1,0	+1
9	15,70	0,1	0,5	-1
10	31,40	0,1	0,5	-1
11	15,70	0,38	0,5	-1
12	31,40	0,38	0,5	-1
13	15,70	0,1	1,0	-1
14	31,40	0,1	1,0	-1
15	15,70	0,38	1,0	-1
16	31,40	0,38	1,0	-1

2.2.7. Методика исследования стойкости спиральных сверл

Предлагаемый способ повышения стойкости режущего инструмента исследовался в лаборатории НТИ (филиала) УрФУ при сверлении листов из титановых сплавов с размерами 250×250×20 мм. Марки, химический состав и механические свойства обрабатываемых сплавов приведены в Таблице 2.1. Использовались сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком ГОСТ 10902-77 [21] из стали марки Р6М5 с диаметрами Ø2,5, Ø3,7 и Ø5,0 мм. Основные размеры сверл приведены в Таблице 2.5.

Сверление производили на вертикально-сверлильном станке марки 2Н135. При проведении испытаний использовали только одну подачу $S=0,1$ мм/об, так как применение большей подачи ограничено диаметром сверла и свойствами обрабатываемых материалов в соответствии с [76]. При сверлении использовали 25% раствор СОЖ *Struers Cutting Fluid* в воде. Состав смазывающе-охлаждающей

жидкости приведен в Таблице 2.6. Матрица планирования эксперимента приведена в Таблице 2.7.

Таблица 2.5

Основные размеры сверл по ГОСТ 10902-77 [21]

№	Диаметр сверла d , мм	Длина сверла L , мм	Длина режущей части l , мм	Угол при вершине сверла λ
1	2,50	57	30	118°
2	3,70	70	39	118°
3	5,00	86	52	118°

Таблица 2.6

Состав смазывающе-охлаждающей жидкости *Struers Cutting Fluid*

№	Наименование компонента	Содержание компонента в концентрированной СОЖ, %
1	Минеральные масла	95%
2	Полисульфиды, ди-трет-додецил сульфат	5%

Таблица 2.7

Матрица планирования эксперимента

№	d , мм	V , м/мин	Изоляция
1	2,5	1,413	+1
2	3,7	1,413	+1
3	5,0	1,413	+1
4	2,5	3,925	+1
5	3,7	3,925	+1
6	5,0	3,925	+1
7	2,5	7,850	+1
8	3,7	7,850	+1
9	5,0	7,850	+1
10	2,5	1,413	-1
11	3,7	1,413	-1
12	5,0	1,413	-1
13	2,5	3,925	-1
14	3,7	3,925	-1
15	5,0	3,925	-1
16	2,5	7,850	-1
17	3,7	7,850	-1
18	5,0	7,850	-1

В качестве критерия износа использовался износ сверла по задней или по передней поверхности свыше 0,5 мм, измеренный при помощи микроскопа марки

МПБ-3. Для электрической изоляции сверл использовались втулки специальной конструкции, изготовленные из титанового сплава марки ОТ4, и подвергнутые термическому оксидированию в печи при температуре 800°C в течение 5 часов. Конструкция втулки, использованной для зажима сверла диаметром 2,5 мм., приведена на Рисунке 2.16.

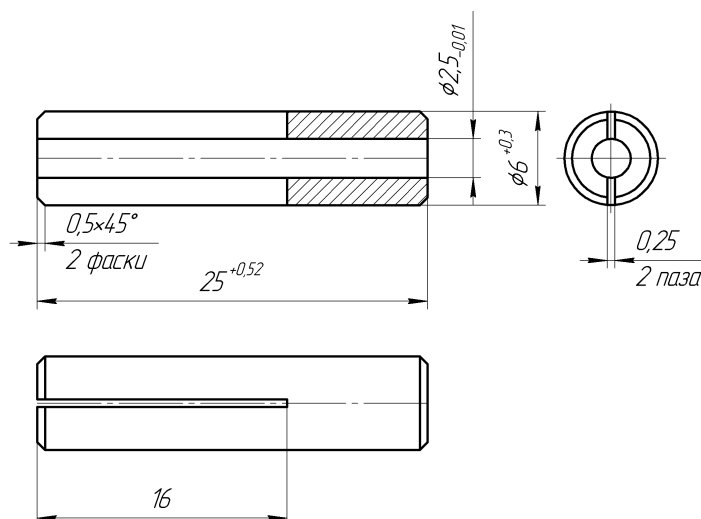


Рисунок 2.16. Конструкция втулки, использованной для зажима сверла диаметром 2,5 мм

Сверло, установленное во втулку, зажимали в трехкулачковом сверлильном патроне ПС-10 В-16, при этом паз втулки сжимался под действием нагрузки, создаваемой кулачками, и втулка плотно зажимала сверло. При этом за счет высокого электрического сопротивления поверхности экспериментальной втулки, достигалась электрическая изоляция сверла. Проводили регрессионный анализ экспериментальных данных по методике, изложенной в работах [52, 53].

2.2.8. Методика исследования предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента в промышленных условиях

Исследование износа спиральных сверл производилось в условиях цеха по производству нестандартного оборудования №38 ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Исследование проводили при сверлении трубных досок для

теплообменников, изготовленных из титанового сплава марки ВТ1-0. Трубная доска изображена на Рисунке 2.17.

Использовали спиральные сверла с коническим хвостовиком ГОСТ 10903-77 диаметром 24,5 мм. Сверление производили на радиально-сверлильном станке модели 25500С1000МФ4, оснащенном стойкой с ЧПУ NC-210. Режимы резания: скорость резания 32 м/мин, минутная подача 87,5 мм/мин. Использовалось охлаждение поливом зоны резания сверху смазывающе-охлаждающей жидкостью Базотон.

В первом случае сверло закреплялось в переходную втулку КМ 4/3 ГОСТ 13598-85, изготовленную из титанового сплава марки ВТ3-1, и подвергнутую термическому оксидированию в печи при температуре 800 °С в течение 5 часов, которая, в свою очередь, закреплялась в переходнике В210.250.095.04. Во втором случае сверло закреплялось в переходнике В210.250.075.03 без электрической изоляции.

Каждым сверлом выполнялось по 40 отверстий, после чего сверление прекращалось, и исследовали износ сверла при помощи микроскопа МПБ-3, оснащенного объективом с увеличением в $50 \pm 2,5$ крат, цена деления микроскопа $0,02 \pm 0,0025$ мм, предел абсолютной допустимой погрешности $\pm 0,006$ мм. Затем сверление возобновляли, и доводили сверло до полной потери режущих свойств в результате износа. Таким образом, оценивали, во-первых, скорость изнашивания сверл, а во-вторых, стойкость сверл.

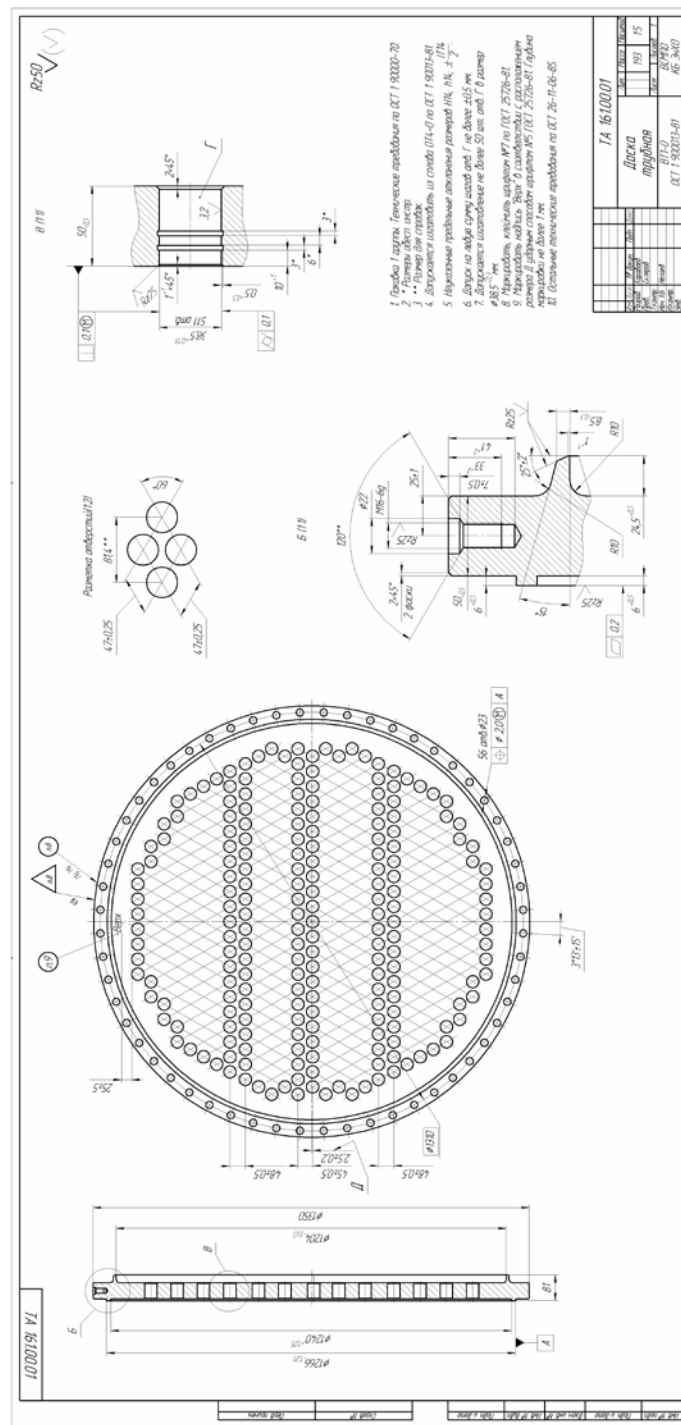


Рисунок 2.17. Доска трубная

Указанные переходные втулки из титанового сплава ВТ3-1 измерялись с использованием координатно-измерительной машины портального типа *Zeiss Accura*, обладающей линейной точностью измерений до 0,0012 мм, по следующим параметрам: углы наружного и внутреннего конусов, максимальные диаметры

наружного и внутреннего конусов, соосность наружного и внутреннего конуса, биение внутреннего конуса. При этом в качестве номинала использовалась трехмерная твердотельная модель переходной втулки.

Измерение проводилось при помощи щупа контрольно-испытательной машины, оснащенного пьезодатчиком. Измерение проводилось в автоматическом режиме с использованием системы ЧПУ, а обработка экспериментальных данных проводилась по методу Гаусса.

Исследовали также химический состав стружки, полученной при сверлении трубных досок методом атомно-эмиссионного спектрального анализа на предмет наличия в ней включений следующих химических элементов: *Fe*, *C*, *Cr*, *V*, *W*, *N* и *O*. Для этого образцы стружки помещали в атомизатор, в котором под действием электрической дуги производится возбуждение свободных атомов вещества. Излучение из атомизатора поступает в монохроматор, где производится его разложение на отдельные спектральные линии. Интенсивность выбранных линий атомного спектра регистрируется посредством фотоэлемента, соединенного со спектрофотометром, и по ней судят о количестве вещества. Для контроля использовались эталонные образцы из искоемых элементов. Точность атомно-эмиссионной спектроскопии позволяет определять количество вещества с точностью до 0,001 мг.

2.3. Выводы к главе 2

В главе представлены методики проведения экспериментальных исследований, необходимых для решения поставленных задач:

- Методика исследования силы тока при точении титановых сплавов;
- Методика исследования силы резания и усадки стружки при точении титановых сплавов;
- Методика исследования свойств титановых сплавов после термического оксидирования;

- Методика исследования термоЭДС в термопарах «титановый сплав – сталь Р6М5»
- Методика исследования стойкости резцов при точении титановых сплавов;
- Методика исследования стойкости сверл при сверлении титановых сплавов;
- Методика исследования предлагаемого способа повышения стойкости при обработке титановых сплавов в промышленных условиях в ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

3. Исследование влияния электрической изоляции режущего инструмента на силу резания и усадку стружки при точении титановых сплавов

3.1. Сущность теории электропластической деформации металлов

Известно [32], что электрический ток, проходящий по металлическому проводнику в процессе пластической деформации, приводит к возникновению трех основных эффектов:

1. Разогреву металла за счет тепловыделения по закону Джоуля-Ленца;
2. Пинч-эффекту (действию магнитного поля проводника);
3. Электронно-пластическому эффекту.

Часть энергии при протекании электрического тока замкнутой цепи «станок – инструмент – изделие – станок» расходуется на выделение тепла в зоне резания по закону Джоуля-Ленца

$$Q = IU\tau, \quad (3.1)$$

где Q – полное количество теплоты, Дж, выделенное за время τ , с., I – сила тока, А, где U – напряжение (ЭДС) в цепи, В.

Другим механизмом, порождаемым электрическим током в деформируемом металле, является пинч-эффект. Сущность пинч-эффекта по данным работ [3, 4, 75, 81] состоит в том, что электрический ток в проводнике приводит к возникновению магнитного поля, которое действует на вызвавший его электронный газ с силой Лоренца. Вне зависимости от направления вектора тока сила Лоренца направлена в центр проводника, что приводит к возникновению положительного заряда у поверхности проводника, и отрицательного заряда в центре. В результате такой поляризации в металле формируется электромагнитное поле, перпендикулярное вектору тока, которое действует на ионную решетку с силой Кулона, вызывая ее упругое сжатие с образованием механических напряжений.

Многочисленные исследования [3, 4, 32, 75, 81] показывают, что основной причиной механического воздействия электрического тока на деформируемый проводник является электронно-пластический эффект. Электроны в металлическом проводнике в рамках квантово-механической теории металлов принято рассматривать [4] как газ квазичастиц (электронов проводимости). Отсюда электрический ток – это дрейфовое движение электронного газа в металле. При этом в идеальном кристалле газ движется без сопротивления, в то время как наличие дефектов кристаллической решетки (атомов примесей, вакансий, дислокаций и т.д.) приводит к торможению газа. По аналогии с движением обычного газа, электронный газ будет действовать на единицу длины дислокации с силой, которую принято называть силой электронного увлечения F_j , и которая равна [75]

$$F_j = V \cdot b \cdot 10^2, \quad (3.2)$$

где 10^2 – размерный коэффициент, кг/м²·с; b – вектор Бюргерса, м; V – дрейфовая скорость электронов в проводнике, м/с, которая определяется по формуле [4]

$$V = -\frac{j}{en}, \quad (3.3)$$

где j – плотность тока, А/м²; e – элементарный электрический заряд, равный $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; n – концентрация электронов, м⁻³. Знак « $-$ » в формуле (3.3) означает, что направление движения электронов противоположно направлению вектора плотности тока.

Известно [75], что

$$\frac{1}{en} = R_H, \quad (3.4)$$

где R_H – коэффициент Холла, м³/Кл.

Согласно работам [3, 4] формула (3.2) эквивалентна формуле

$$F_j = B \cdot V, \quad (3.5)$$

где B – коэффициент электронного торможения дислокаций, имеющий порядок $10^{-4} \sim 10^{-6}$ г/см·с

Сила электронного увлечения в формуле (3.2) имеет размерность дин/см в системе СГС или Н/м в системе СИ, при этом данная сила создает напряжение на единичную дислокацию, определяемое по формуле [75]

$$\sigma = \frac{F_j}{b}. \quad (3.6)$$

Размерность напряжений в формуле (3.5) дин/см² в системе СГС или Н/м² в системе СИ. Таким образом, согласно работе [75] приложение электрического тока к деформируемому проводнику эквивалентно приложению к кристаллам механического напряжения. Отсюда следует, что электрический ток в проводнике должен приводить к увеличению силы резания на величину, пропорциональную F_j , которую можно определить по формуле

$$F^* = \frac{\sigma}{\rho}, \quad (3.7)$$

где ρ – плотность дислокаций, м⁻².

Необходимо отметить, что электронно-пластический эффект является нетермическим в макроскопическом масштабе, т.е. не приводит к изменению температуры [75]. Согласно работе [75] вклад электрического тока в температуру составляет порядка 0,2÷0,4 °С.

Уменьшение силы резания при работе электрически изолированным инструментом на величину порядка F^* приведет к уменьшению усадки стружки в соответствии с работой [1, С. 567]. Уменьшение усадки стружки, в свою очередь, также будет оказывать положительное влияние на стойкость режущего инструмента за счет сокращения энергетических затрат на пластическую деформацию металла, и, таким образом, уменьшения мощности, потребной для совершения процесса резания [91].

3.2. Результаты исследования силы тока при точении титановых сплавов

Результаты измерения силы тока в системе «станок – инструмент – изделие – станок» при работе резцом без изоляции приведены в Таблице 3.1. Следует отметить, что в результате измерения силы тока при работе электрически изолированным резцом были зафиксированы лишь небольшие величины силы тока порядка 2,5 мкА, которые не зависели от изменения параметров режима резания, и, следовательно, могут быть отнесены к наведенным токам, неизбежно присутствующим в любой электромеханической системе. Следовательно, в условиях электрической изоляции ток в «системе станок – инструмент – изделие – станок» не протекает.

Таблица 3.1

Результаты измерения силы тока при точении

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Сила тока I, мА			
				BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	0,467	0,396	0,699	0,786
2	31,40	0,1	0,5	0,76	0,713	0,85	0,946
3	15,70	0,1	1,0	0,581	0,479	0,681	0,72
4	31,40	0,1	1,0	0,737	0,723	0,821	0,899
5	15,70	0,38	0,5	0,734	0,64	0,828	0,886
6	31,40	0,38	0,5	0,98	0,907	0,904	0,998
7	15,70	0,38	1,0	0,742	0,685	0,841	0,888
8	31,40	0,38	1,0	1,037	0,926	1,158	1,309

По результатам обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены следующие зависимости силы тока от параметров режима резания

$$\text{BT1-0} \quad I = 0,23 \cdot V^{0,49} \cdot s^{0,24} \cdot t^{0,09} \quad (3.8)$$

$$\text{OT4} \quad I = 0,21 \cdot V^{0,52} \cdot s^{0,25} \cdot t^{0,11} \quad (3.9)$$

$$\text{BT6} \quad I = 0,40 \cdot V^{0,34} \cdot s^{0,15} \cdot t^{0,07} \quad (3.10)$$

$$\text{VST5553} \quad I = 0,47 \cdot V^{0,32} \cdot s^{0,14} \cdot t^{0,05} \quad (3.11)$$

Статистические расчеты, посредством которых получены модели (3.8) – (3.11) приведены в Таблице 3.2.

Статистические расчеты моделей $I(V,s,t)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
				BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	0,000386	0,000761	0,000853	0,000138
2	31,40	0,1	0,5	0,000568	0,000231	0,000469	0,000611
3	15,70	0,1	1,0	0,000334	0,000254	0,000617	0,000259
4	31,40	0,1	1,0	0,000549	0,000557	0,000161	0,000509
5	15,70	0,38	0,5	0,000545	0,000666	0,000105	0,000246
6	31,40	0,38	0,5	0,000790	0,000112	0,000467	0,000290
7	15,70	0,38	1,0	0,000845	0,000162	0,000191	0,000130
8	31,40	0,38	1,0	0,000960	0,000164	0,000665	0,000300
Максимальная дисперсия $S_{i(max)}^2$				0,000960	0,000761	0,000853	0,000611
Сумма дисперсий $\sum_{i=1}^N S_i^2$				0,004977	0,002907	0,003528	0,002483
Критерий Кохрена $G = \frac{S_{i(max)}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$				0,1929	0,2617	0,2418	0,2461
G_T				0,391			
Коэффициенты при факторах $b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} \bar{y}_i}{N}$			b1	0,4864	0,5250	0,3350	0,3198
			b2	0,2420	0,2483	0,1472	0,1421
			b3	0,0919	0,1056	0,0729	0,0486
Свободный коэффициент $b_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^k b_j X_j$				0,234	0,210	0,4011	0,4678
Дисперсия воспроизводимости $S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$				0,000622	0,000363	0,000441	0,00031
Доверительный интервал для коэффициентов регрессии Δ				0,0160	0,0122	0,0135	0,0113
Вычисление дисперсии адекватности $S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - (k + 1)}$				0,001787	0,001087	0,001256	0,000917
$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$ Критерий Фишера				2,8725	2,9909	2,8486	2,9558
F_T				3,01			

Представленные модели (3.8) – (3.11) проиллюстрированы графиками на Рисунках 3.1 – 3.3.

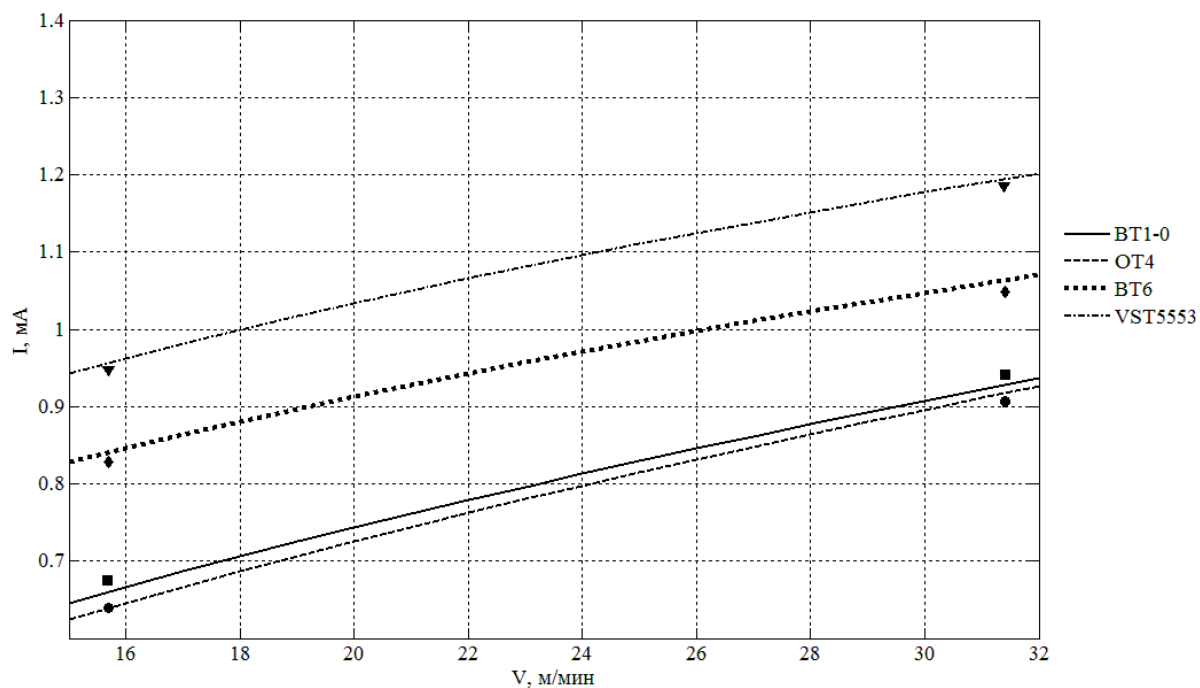


Рисунок 3.1. Влияние скорости резания V на силу тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок»: $s = 0,38$ мм/об; $t = 0,5$ мм.

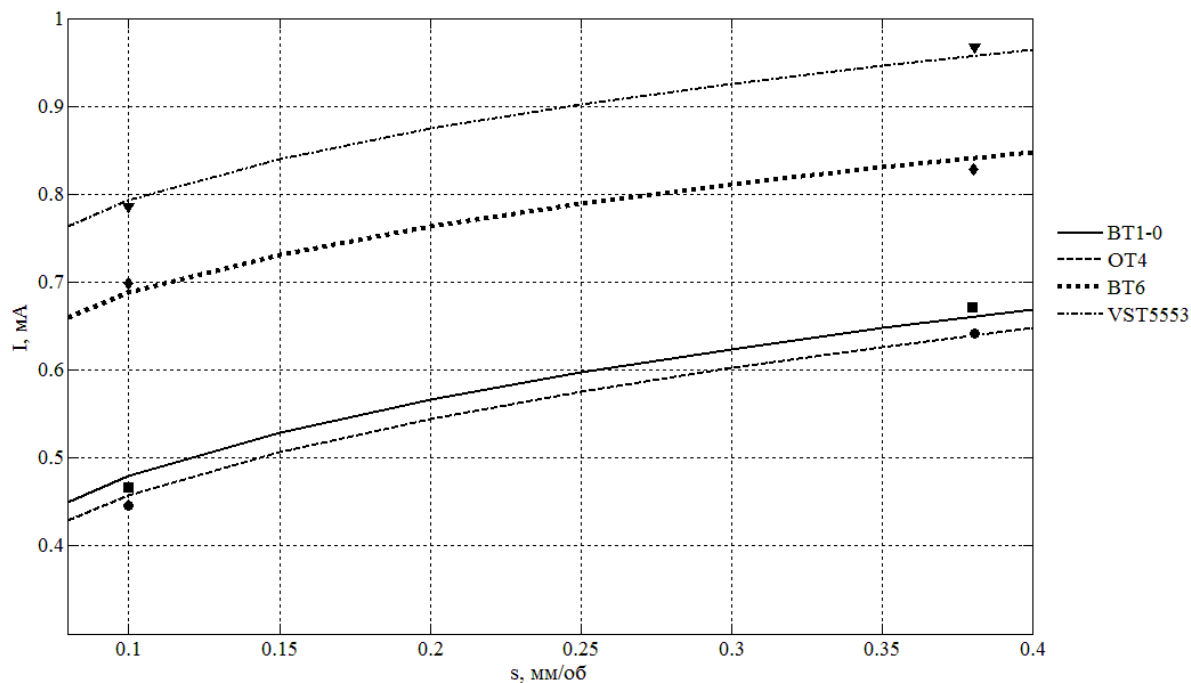


Рисунок 3.2. Влияние подачи s на силу тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок»: $V = 15,40$ м/мин; $t = 0,5$ мм.

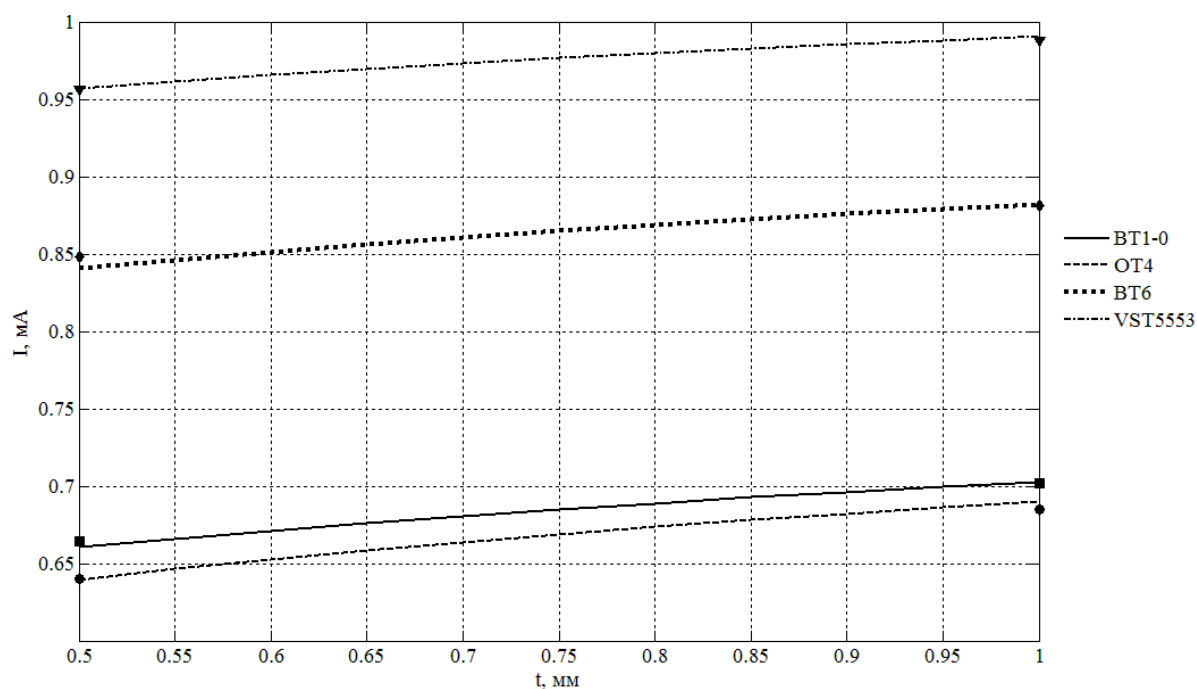


Рисунок 3.3. Влияние глубины резания t на силу тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок»: $V = 15,40$ м/мин; $s = 0,38$ мм/об

3.3. Расчет дополнительной силы, вызванной действием электрического тока

Для расчета дополнительной силы, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок» воспользуемся формулами (3.2) – (3.7). Ввиду того, что точная оценка коэффициента Холла и плотности дислокаций, необходимых для расчета силы электронного увлечения, затруднена, воспользуемся известными приближенными оценками. Коэффициент Холла для титановых сплавов по данным работы [23] равен

$$R \approx 1,82 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{Кл}$$

Плотность дислокаций в соответствии с работой [77] принимали равной

$$\rho \approx 10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ м}^{-2}$$

Плотность тока определяли из соотношения

$$j = \frac{I}{A_s}, \quad (3.12)$$

где I – сила тока при точении титановых сплавов, А; A_s – площадь поперечного сечения срезаемого слоя, см², определяемая из соотношения

$$A_s = s \cdot t \cdot 10^{-2}, \quad (3.13)$$

где t – глубина резания, мм; s – подача, мм/об.

Результаты расчета по формулам (3.12) и (3.13) сведены в Таблицу 3.3. Результаты приближенного расчета дрейфовой скорости электронов по формуле (3.3) сведены в Таблицу 3.4, результаты приближенного расчета напряжения, вызванного действием силы электронного увлечения на единичную дислокацию по формуле (3.6) приведены в Таблице 3.5, а результаты приближенного расчета добавочной силы, на которую должна измениться сила резания в условиях электроизоляции, по формуле (3.7) приведены в Таблице 3.6.

Таблица 3.3

Плотность тока j

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	j , А/см ²			
				BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	0,934	0,792	1,398	1,572
2	31,40	0,1	0,5	1,520	1,426	1,700	1,892
3	15,70	0,1	1,0	0,581	0,479	0,681	0,720
4	31,40	0,1	1,0	0,737	0,723	0,821	0,899
5	15,70	0,38	0,5	0,386	0,337	0,436	0,466
6	31,40	0,38	0,5	0,516	0,477	0,476	0,525
7	15,70	0,38	1,0	0,195	0,180	0,221	0,234
8	31,40	0,38	1,0	0,273	0,244	0,305	0,344

Таблица 3.4

Дрейфовая скорость электронов V

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	V, см/с			
				BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$2,86 \cdot 10^{-7}$
2	31,40	0,1	0,5	$2,77 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$3,09 \cdot 10^{-7}$	$3,44 \cdot 10^{-7}$
3	15,70	0,1	1,0	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$8,72 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$
4	31,40	0,1	1,0	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-7}$	$1,49 \cdot 10^{-7}$	$1,64 \cdot 10^{-7}$
5	15,70	0,38	0,5	$7,03 \cdot 10^{-8}$	$6,13 \cdot 10^{-8}$	$7,93 \cdot 10^{-8}$	$8,49 \cdot 10^{-8}$
6	31,40	0,38	0,5	$9,39 \cdot 10^{-8}$	$8,69 \cdot 10^{-8}$	$8,66 \cdot 10^{-8}$	$9,56 \cdot 10^{-8}$
7	15,70	0,38	1,0	$3,55 \cdot 10^{-8}$	$3,28 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-8}$	$4,25 \cdot 10^{-8}$
8	31,40	0,38	1,0	$4,97 \cdot 10^{-8}$	$4,44 \cdot 10^{-8}$	$5,55 \cdot 10^{-8}$	$6,27 \cdot 10^{-8}$

Таблица 3.5

Напряжения, действующие на единичную дислокацию σ

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	σ , Н/м ²			
				BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	$1,69 \cdot 10^{-15}$	$1,44 \cdot 10^{-15}$	$2,54 \cdot 10^{-15}$	$2,86 \cdot 10^{-15}$
2	31,40	0,1	0,5	$2,76 \cdot 10^{-15}$	$2,6 \cdot 10^{-15}$	$3,09 \cdot 10^{-15}$	$3,44 \cdot 10^{-15}$
3	15,70	0,1	1,0	$1,06 \cdot 10^{-15}$	$8,72 \cdot 10^{-15}$	$1,24 \cdot 10^{-15}$	$1,31 \cdot 10^{-15}$
4	31,40	0,1	1,0	$1,34 \cdot 10^{-15}$	$1,32 \cdot 10^{-15}$	$1,49 \cdot 10^{-15}$	$1,64 \cdot 10^{-15}$
5	15,70	0,38	0,5	$7,03 \cdot 10^{-15}$	$6,13 \cdot 10^{-15}$	$7,93 \cdot 10^{-15}$	$8,49 \cdot 10^{-15}$
6	31,40	0,38	0,5	$9,39 \cdot 10^{-15}$	$8,69 \cdot 10^{-15}$	$8,66 \cdot 10^{-15}$	$9,56 \cdot 10^{-15}$
7	15,70	0,38	1,0	$3,55 \cdot 10^{-15}$	$3,28 \cdot 10^{-15}$	$4,03 \cdot 10^{-15}$	$4,25 \cdot 10^{-15}$
8	31,40	0,38	1,0	$4,96 \cdot 10^{-15}$	$4,44 \cdot 10^{-15}$	$5,55 \cdot 10^{-15}$	$6,27 \cdot 10^{-15}$

Таблица 3.6

Результаты приближенного расчета дополнительной силы, вызванной действием электрического тока F^*

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	F^* , Н			
				BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	16,99	14,41	25,44	28,61
2	31,40	0,1	0,5	27,66	25,95	30,94	34,43
3	15,70	0,1	1,0	10,57	8,72	12,39	13,10
4	31,40	0,1	1,0	13,41	13,16	14,94	16,36
5	15,70	0,38	0,5	70,31	61,31	79,31	84,87
6	31,40	0,38	0,5	93,87	86,88	86,59	95,60
7	15,70	0,38	1,0	35,54	32,81	40,28	42,53
8	31,40	0,38	1,0	49,67	44,35	55,46	62,69

Из результатов следует, что при резании титановых сплавов электрически изолированным режущим инструментом сила резания должна быть меньше на величину порядка $8,72 \div 95,60$ Н. Таким образом, электрическая изоляция будет приводить к уменьшению силы резания, что является одной из причин повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов наряду с электродиффузионным и окислительным механизмами. Уменьшение силы резания должно приводить к уменьшению усадки стружки [1]. Данные прогнозы были проверены экспериментально.

3.4. Экспериментальное исследование силы резания при точении титановых сплавов

Пример результатов измерения ЭДС датчика силы при точении титанового сплава BT1-0 приведен на Рисунке 3.4.

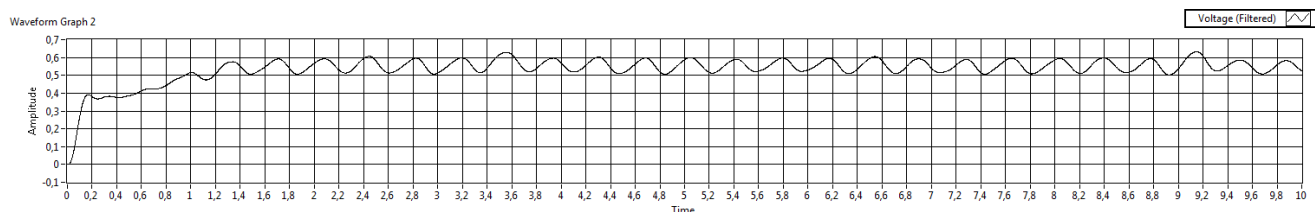


Рисунок 3.4. Результат измерения ЭДС датчика силы при точении электрически изолированным резцом сплава BT1-0 при $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об; $t = 1,0$ мм

Результаты исследования силы резания при точении приведены в Таблице 3.7. Рассчитывали коэффициент корреляции между расчетными значениями добавочной силы, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок» F^* и экспериментально полученными значениями изменения силы резания при точении титановых сплавов при использовании электрической изоляции режущего инструмента ΔF . Расчет коэффициента корреляции приведен в Таблице 3.8.

Таблица 3.7

Результаты измерения силы резания при точении

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Сила резания, Н			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	+1	162,43	221,31	126,73	198,21
2	31,40	0,1	0,5	+1	117,535	190,14	99,03	181,40
3	15,70	0,1	1,0	+1	277,423	459,42	223,28	492,19
4	31,40	0,1	1,0	+1	248,896	438,16	300,47	455,52
5	15,70	0,38	0,5	+1	362,07	494,82	295,85	649,48
6	31,40	0,38	0,5	+1	261,34	416,50	304,36	694,64
7	15,70	0,38	1,0	+1	643,725	1313,38	929,19	909,71
8	31,40	0,38	1,0	+1	560,183	1206,84	920,05	844,03
9	15,70	0,1	0,5	-1	188,99	242,10	158,03	230,65
10	31,40	0,1	0,5	-1	156,35	218,10	133,30	229,24
11	15,70	0,1	1,0	-1	297,8	474,29	230,03	513,94

Таблица 3.7 (окончание)

Результаты измерения силы резания при точении

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Сила резания, Н			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
12	31,40	0,1	1,0	-1	270,88	458,76	322,58	492,39
13	15,70	0,38	0,5	-1	399,08	555,12	357,39	791,51
14	31,40	0,38	0,5	-1	318,26	508,06	346,46	725,83
15	15,70	0,38	1,0	-1	695,32	1385,54	981,16	1008,14
16	31,40	0,38	1,0	-1	610,07	1278,74	951,33	982,09

Таблица 3.8

Расчет коэффициента корреляции между дополнительной силой, вызванной действием электрического тока F^* и изменением силы резания при точении ΔF

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	BT1-0		OT4		BT6		VST 5553	
				ΔF , Н	F^* , Н	ΔF , Н	F^* , Н	ΔF , Н	F^* , Н	ΔF , Н	F^* , Н
1	15,70	0,1	0,5	26,56	17,00	20,79	14,41	31,30	25,44	32,44	28,61
2	31,40	0,1	0,5	38,82	27,66	27,96	25,95	34,27	30,94	47,85	34,43
3	15,70	0,1	1,0	20,38	10,57	14,87	8,72	6,74	12,39	21,75	13,10
4	31,40	0,1	1,0	21,98	13,41	20,60	13,16	22,11	14,94	36,87	16,36
5	15,70	0,38	0,5	37,01	70,31	60,30	61,31	61,54	79,31	142,04	84,87
6	31,40	0,38	0,5	56,92	93,87	91,56	86,88	42,10	86,59	231,19	95,60
7	15,70	0,38	1,0	51,59	35,54	72,17	32,81	51,97	40,28	98,43	42,53
8	31,40	0,38	1,0	49,89	49,67	71,90	44,35	31,28	55,46	138,06	62,69
$\langle X \rangle, \langle Y \rangle$				37,89	39,75	42,52	35,95	35,16	43,17	93,58	47,28
$\langle X^2 \rangle, \langle Y^2 \rangle$				1608,87	2353,93	3032,15	1935,06	1490,89	2558,65	13443,5	3065,61
$\langle X \cdot Y \rangle$				1786,54		2329,28		1828,16		6307,75	
$DX = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$ $DY = \langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2$				172,95	773,48	774,10	642,76	254,37	694,90	4686,66	830,66
$R = \frac{\langle X \cdot Y \rangle - \langle X \rangle \cdot \langle Y \rangle}{\sqrt{DX \cdot DY}}$				0,76		0,88		0,74		0,85	
$Z = 0,5 \cdot \ln \left(\frac{1+R}{1-R} \right)$				1,01		1,38		0,94		1,26	
$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{n_0 - 3}}$				0,447							
$t_r = \frac{Z}{\sigma_s}$				2,26		3,08		2,11		2,81	
				$ t_r > 1,645$							

Результаты, представленные в Таблице 3.8, показывают, что существует взаимосвязь значительной силы между добавочной силой, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок», приближенный теоретический расчет которой представлен в Таблице 3.6, и

уменьшением силы резания при точении титановых сплавов с использованием электрической изоляции режущего инструмента. Полученные данные показывают, что использование электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов позволяет снизить силу резания на $3,02 \div 46,73\%$.

По результатам экспериментального исследования силы резания были построены регрессионные зависимости силы резания от параметров режима резания и условий электрической изоляции. Статистический расчет регрессионных моделей представлен в Таблице 3.9.

Таблица 3.9

Статистические расчеты моделей $F(V,s,t,k)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	3,96	0,1	0,1	10	0,047	0,063	0,056	0,056
2	15,70	0,1	0,1	10	0,014	0,072	0,051	0,074
3	31,40	0,1	0,1	10	0,064	0,054	0,074	0,041
4	3,96	0,1	0,5	10	0,017	0,012	0,091	0,094
5	15,70	0,1	0,5	10	0,063	0,065	0,041	0,067
6	31,40	0,1	0,5	10	0,027	0,075	0,056	0,041
7	3,96	0,1	1,0	10	0,061	0,094	0,091	0,064
8	15,70	0,1	1,0	10	0,081	0,01	0,094	0,093
9	31,40	0,1	1,0	1	0,029	0,014	0,061	0,037
10	3,96	0,38	0,1	1	0,072	0,015	0,041	0,098
11	15,70	0,38	0,1	1	0,051	0,061	0,065	0,061
12	31,40	0,38	0,1	1	0,066	0,064	0,067	0,01
13	3,96	0,38	0,5	1	0,025	0,062	0,076	0,095
14	15,70	0,38	0,5	1	0,038	0,075	0,089	0,036
15	31,40	0,38	0,5	1	0,065	0,081	0,093	0,063
16	3,96	0,38	1,0	1	0,076	0,091	0,041	0,041
Максимальная дисперсия $S_{i(max)}^2$					0,081	0,094	0,094	0,098
Сумма дисперсий $\sum_{i=1}^N S_i^2$					0,796	0,908	1,087	0,971
Критерий Кохрена $G = \frac{S_{i(max)}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$					0,1010	0,1035	0,0864	0,1009
G_T					0,2419			

Таблица 3.9 (окончание)

Статистические расчеты моделей $F(V,s,t,k)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
Коэффициенты при факторах $b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} \bar{y}_i}{N}$				b1	-0,2774	-0,1375	-0,0315	-0,0605
				b2	0,5966	0,6952	0,8257	0,7032
				b3	0,8716	1,2369	1,2995	0,8065
				b4	-0,0569	-0,0396	-0,0557	-0,0544
Свободный коэффициент $b_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^k b_j X_j$				2766,88	3844,98	2275,49	2737,78	
Дисперсия воспроизводимости $S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$				0,04975	0,05675	0,06793	0,06068	
Доверительный интервал для коэффициентов регрессии Δ				0,00975	0,0107	0,0117	0,0110	
Вычисление дисперсии адекватности $S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - (k + 1)}$				0,12075	0,11472	0,15222	0,15294	
Критерий Фишера $F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$				2,4271	2,2148	2,2408	2,5204	
F_T				2,76				

Таким образом, получены следующие математические зависимости силы резания от параметров режима резания и электрической изоляции режущего инструмента

$$\text{BT1-0} \quad F = 2766,88 \frac{s^{0,60} t^{0,87}}{V^{0,28} k^{0,06}}, \quad (3.14)$$

$$\text{OT4} \quad F = 3844,98 \frac{s^{0,69} t^{1,24}}{V^{0,14} k^{0,04}}, \quad (3.15)$$

$$\text{BT6} \quad F = 2275,49 \frac{s^{0,83} t^{1,29}}{V^{0,03} k^{0,06}}, \quad (3.16)$$

$$\text{VST5553} \quad F = 2737,87 \frac{s^{0,70} t^{0,81}}{V^{0,06} k^{0,05}}, \quad (3.17)$$

где k – коэффициент, показывающий влияние электрической изоляции на силу резания, равный 10 при работе электрически изолированным инструментом и 1 – при точении без использования электрической изоляции резца; V – скорость резания, м/мин; s – подача, мм/об; t – глубина резания, мм. Полученные математические модели могут быть использованы для прогнозирования силы резания при точении титановых сплавов представленных марок. Полученные модели (3.14) – (3.17) проиллюстрированы на Рисунках 3.5 – 3.7.

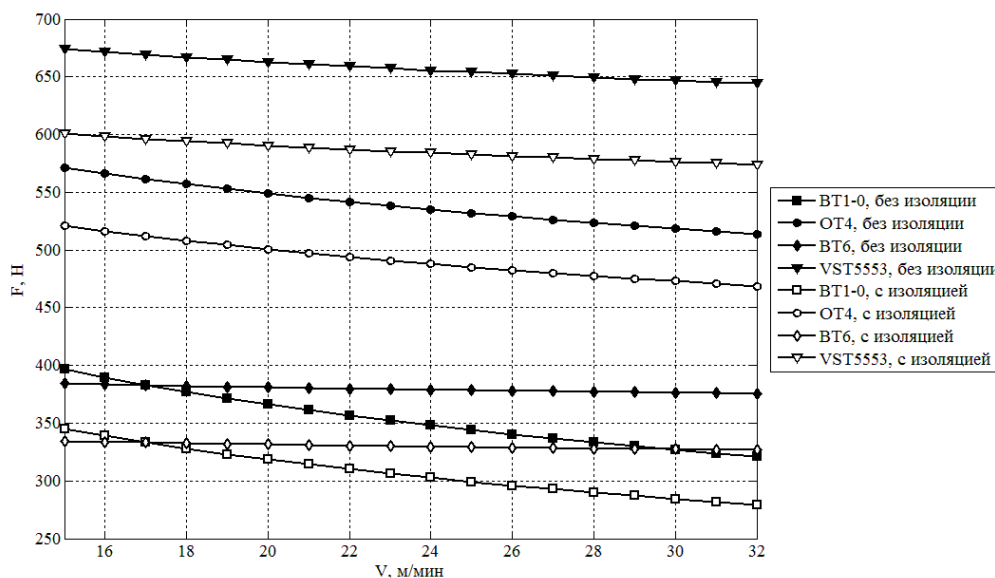


Рисунок 3.5. Влияние скорости резания V на силу резания: $s = 0,38$ мм/об; $t = 0,5$ мм.

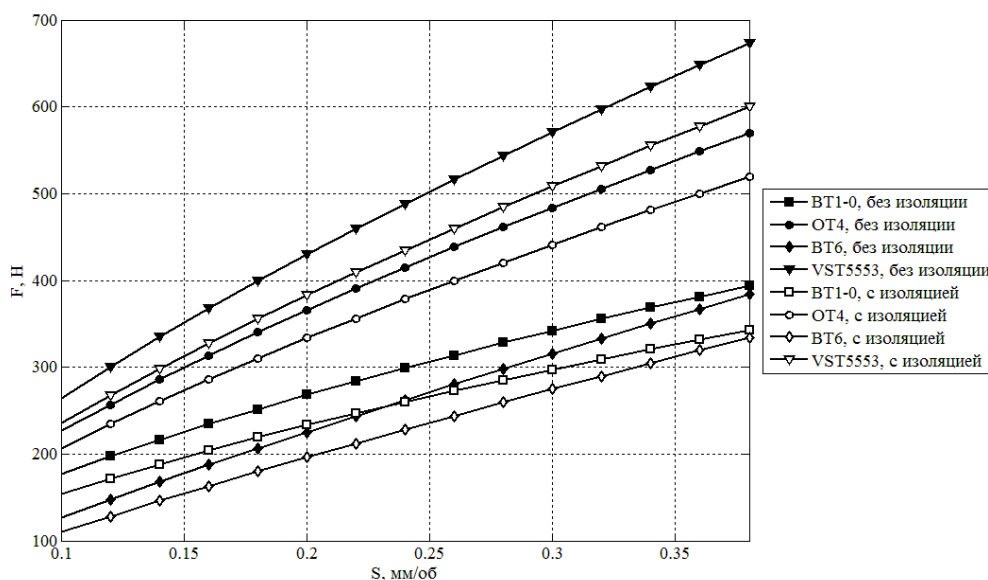


Рисунок 3.6. Влияние подачи s на силу резания: $V = 15,40$ м/мин; $t = 0,5$ мм.

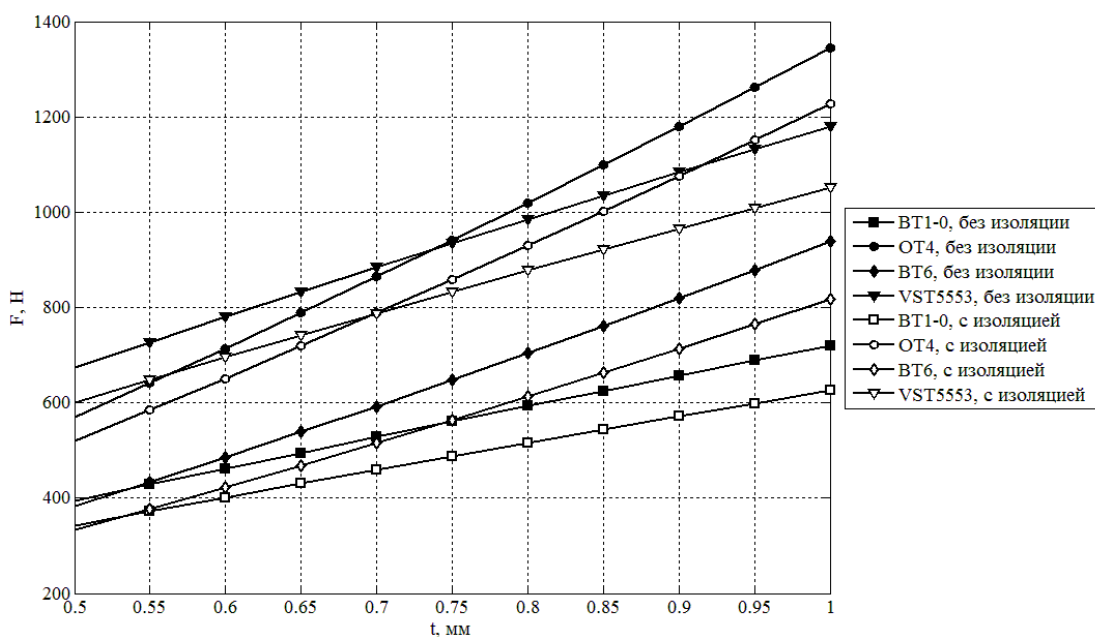


Рисунок 3.7. Влияние глубины резания t на силу резания: $V = 15,40$ м/мин; $s = 0,38$ мм/об

Сопоставление полученных регрессионных моделей с результатами, полученными в работе [104] демонстрирует качественное и количественное совпадение результатов, полученных в данной работе, с результатами, полученными независимо. Необходимо отметить, что явление уменьшения силы резания в при работе электрически изолированным режущим инструментом наблюдалось также при обработке конструкционных сталей – в работах [25, 105, 106]. Следует указать, что рассмотренное явление относится, по видимому, исключительно к случаю электрической изоляции режущего инструмента, поскольку в работе [105] не выявлено сколь либо существенного изменения силы резания при пропускании через зону резания электрического тока любой полярности, в то время как в условиях электрической изоляции сила резания понижалась.

3.5. Экспериментальное исследование усадки стружки при точении титановых сплавов

Средние значения длины и массы образцов стружки приведены в Таблице 3.10. Результаты расчета усадки стружки по формуле (2.5) приведены в Таблице 3.11. Из результатов видно, что усадка стружки уменьшается с ростом параметров режима резания, и в ряде случаев является даже отрицательной, что в целом характерно для резания титановых сплавов. В частности В.А. Кривоухов и А.Д. Чубаров [39] объясняли отрицательную усадку стружки при резании титановых сплавов тем, что ввиду низкой теплопроводности титановых сплавов, в зоне резания возникает чрезвычайно высокая температура, при которой обрабатываемые титановые сплавы активно поглощают газы из воздуха, вследствие чего стружка становится менее пластичной. Это объяснение подтверждается тем фактом, что при резании титановых сплавов в среде аргона отрицательной усадки не наблюдается. В то же время М.Ф. Полетика и А.И. Афонасов отмечали [56], что, во-первых, титановые сплавы имеют повышенную чувствительность к скорости деформирования, во-вторых, повышение скорости деформирования приводит к образованию малопластичной элементной стружки, в-третьих, повышение скорости резания способствует уменьшению силы трения на передней поверхности резца; в-четвертых, скорость резания и подача влияют на усадку стружки как температурный фактор.

Был проведен регрессионный анализ результатов эксперимента, представленный в Таблице 3.12, выявивший влияние параметров режима резания и электрической изоляции на усадку стружки при точении титановых сплавов. Показано, что увеличение скорости резания, подачи и глубины резания приводит к уменьшению усадки стружки. К тому же результату, но в меньшей степени, приводит электрическая изоляция токарного резца. Сопоставление полученных регрессионных моделей с результатами, полученными в работе [28] показывает качественное совпадение результатов.

Таблица 3.10

Результаты измерения длины и массы образцов стружки

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	BT1-0 $\rho = 4,505 \text{ г/м}^3$		OT4 $\rho = 4,55 \text{ г/м}^3$		BT6 $\rho = 4,45 \text{ г/м}^3$		VST 5553 $\rho = 4,62 \text{ г/м}^3$	
					l, мм	m, г	l, мм	m, г.	l, мм	m, г	l, мм	m, г
1	15,70	0,1	0,5	+1	30	0,0147	25	0,012	56	0,0312	45	0,026
2	31,40	0,1	0,5	+1	64	0,0164	36	0,0156	45	0,0196	64	0,029
3	15,70	0,1	1,0	+1	46	0,0386	16	0,0126	44	0,0336	64	0,057
4	31,40	0,1	1,0	+1	45	0,0226	14	0,0095	32	0,0227	32	0,024
5	15,70	0,38	0,5	+1	21	0,0284	26	0,0376	15	0,0204	21	0,035
6	31,40	0,38	0,5	+1	23	0,0194	45	0,0358	26	0,029	56	0,073
7	15,70	0,38	1,0	+1	41	0,0696	32	0,0624	19	0,0325	47	0,1
8	31,40	0,38	1,0	+1	35	0,0475	12	0,0163	21	0,0255	58	0,084
9	15,70	0,1	0,5	-1	35	0,0187	25	0,0127	25	0,0156	36	0,024
10	31,40	0,1	0,5	-1	16	0,0057	28	0,013	30	0,0145	40	0,0203
11	15,70	0,1	1,0	-1	97	0,0986	30	0,0259	30	0,0265	10	0,0096
12	31,40	0,1	1,0	-1	50	0,0306	10	0,007	30	0,0245	7	0,0059
13	15,70	0,38	0,5	-1	29	0,038	30	0,0471	45	0,0711	30	0,0538
14	31,40	0,38	0,5	-1	54	0,0495	30	0,0252	28	0,0343	28	0,0395
15	15,70	0,38	1,0	-1	135	0,2492	18	0,0382	35	0,0705	30	0,0692
16	31,40	0,38	1,0	-1	12	0,0184	16	0,0237	28	0,0402	26	0,0425

Таблица 3.11

Результаты расчета усадки стружки ξ_L

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	+1	2,18	2,11	2,50	2,50
2	31,40	0,1	0,5	+1	1,14	1,90	1,96	1,96
3	15,70	0,1	1,0	+1	1,86	1,73	1,72	1,93
4	31,40	0,1	1,0	+1	1,11	1,49	1,59	1,62
5	15,70	0,38	0,5	+1	1,53	1,67	1,61	1,90
6	31,40	0,38	0,5	+1	0,99	0,92	1,32	1,49
7	15,70	0,38	1,0	+1	0,99	1,13	1,01	1,21
8	31,40	0,38	1,0	+1	0,79	0,79	0,72	0,82
9	15,70	0,1	0,5	-1	2,37	2,23	2,80	2,89
10	31,40	0,1	0,5	-1	1,58	2,04	2,17	2,20
11	15,70	0,1	1,0	-1	2,26	1,90	1,99	2,08
12	31,40	0,1	1,0	-1	1,36	1,54	1,84	1,82
13	15,70	0,38	0,5	-1	1,58	1,82	1,87	2,04
14	31,40	0,38	0,5	-1	1,07	0,97	1,45	1,61
15	15,70	0,38	1,0	-1	1,08	1,23	1,19	1,31
16	31,40	0,38	1,0	-1	0,90	0,86	0,85	0,93

Таблица 3.12

Статистические расчеты моделей $\xi_L(V,s,t,k)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	3,96	0,1	0,1	10	0,2017	0,0895	0,0335	0,0694
2	15,70	0,1	0,1	10	0,0280	0,0447	0,0687	0,0578
3	31,40	0,1	0,1	10	0,0405	0,0145	0,0915	0,0771
4	3,96	0,1	0,5	10	0,2469	0,0471	0,0193	0,0415
5	15,70	0,1	0,5	10	0,0481	0,0549	0,0989	0,0354
6	31,40	0,1	0,5	10	0,0843	0,0164	0,0875	0,0825
7	3,96	0,1	1,0	10	0,0896	0,0714	0,0055	0,0176
8	15,70	0,1	1,0	10	0,0860	0,0026	0,0043	0,0225
9	31,40	0,1	1,0	1	0,1028	0,0599	0,0819	0,0876
10	3,96	0,38	0,1	1	0,0759	0,0107	0,0824	0,0515
11	15,70	0,38	0,1	1	0,1636	0,0451	0,0863	0,0885
12	31,40	0,38	0,1	1	0,0993	0,0398	0,0950	0,0654
13	3,96	0,38	0,5	1	0,0555	0,0799	0,0464	0,0119
14	15,70	0,38	0,5	1	0,0617	0,0561	0,0837	0,0630
15	31,40	0,38	0,5	1	0,0329	0,0166	0,0197	0,0226
16	3,96	0,38	1,0	1	0,0984	0,0562	0,0949	0,0247
Максимальная дисперсия $S_{i(max)}^2$					0,2470	0,0890	0,099	0,088
Сумма дисперсий $\sum_{i=1}^N S_i^2$					1,515	0,7050	0,999	0,819
Критерий Кохрена $G = \frac{S_{i(max)}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$					0,1630	0,1268	0,0989	0,1080
G_T					0,2419			
Коэффициенты при факторах $b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} \bar{y}_i}{N}$				b1	-0,5974	-0,4499	-0,3224	-0,3665
				b2	-0,3199	-0,3744	-0,3984	-0,3262
				b3	-0,2867	-0,3531	-0,5688	-0,5389
				b4	-0,0445	-0,0302	-0,0586	-0,0435
Свободный коэффициент $b_0 = \bar{y} - \sum_{j=1}^k b_j X_j$					4,8412	2,8897	1,9430	2,6843
Дисперсия воспроизводимости $S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$					0,0947	0,0440	0,0624	0,0511
Доверительный интервал для коэффициентов регрессии Δ					0,0138	0,0194	0,0111	0,0101

Таблица 3.12 (окончание)

Статистические расчеты моделей $\xi_L(V,s,t,k)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
Вычисление дисперсии адекватности $S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - (k + 1)}$					0,1682	0,0754	0,0909	0,0902
$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$ Критерий Фишера					1,7761	1,7097	1,4554	1,7625
F_T					2,76			

Таким образом, получены следующие математические зависимости усадки стружки от параметров режима резания и электрической изоляции режущего инструмента

$$\text{BT1-0} \quad \xi_L = \frac{4,84}{V^{0,60} \cdot s^{0,32} \cdot t^{0,29} \cdot k^{0,04}}, \quad (3.18)$$

$$\text{OT4} \quad \xi_L = \frac{2,88}{V^{0,45} \cdot s^{0,37} \cdot t^{0,35} \cdot k^{0,03}}, \quad (3.19)$$

$$\text{BT6} \quad \xi_L = \frac{1,94}{V^{0,32} \cdot s^{0,40} \cdot t^{0,57} \cdot k^{0,06}}, \quad (3.20)$$

$$\text{VST5553} \quad \xi_L = \frac{2,68}{V^{0,37} \cdot s^{0,33} \cdot t^{0,54} \cdot k^{0,04}}, \quad (3.21)$$

где k – коэффициент, показывающий влияние электрической изоляции на силу резания, равный 10 при работе электрически изолированным инструментом и 1 – при точении без использования электрической изоляции резца; V – скорость резания, м/мин; s – подача, мм/об; t – глубина резания, мм. Полученные математические модели могут быть использованы для прогнозирования усадки стружки при точении титановых сплавов представленных марок. Полученные регрессионные модели проиллюстрированы на Рисунках 3.8 – 3.10.

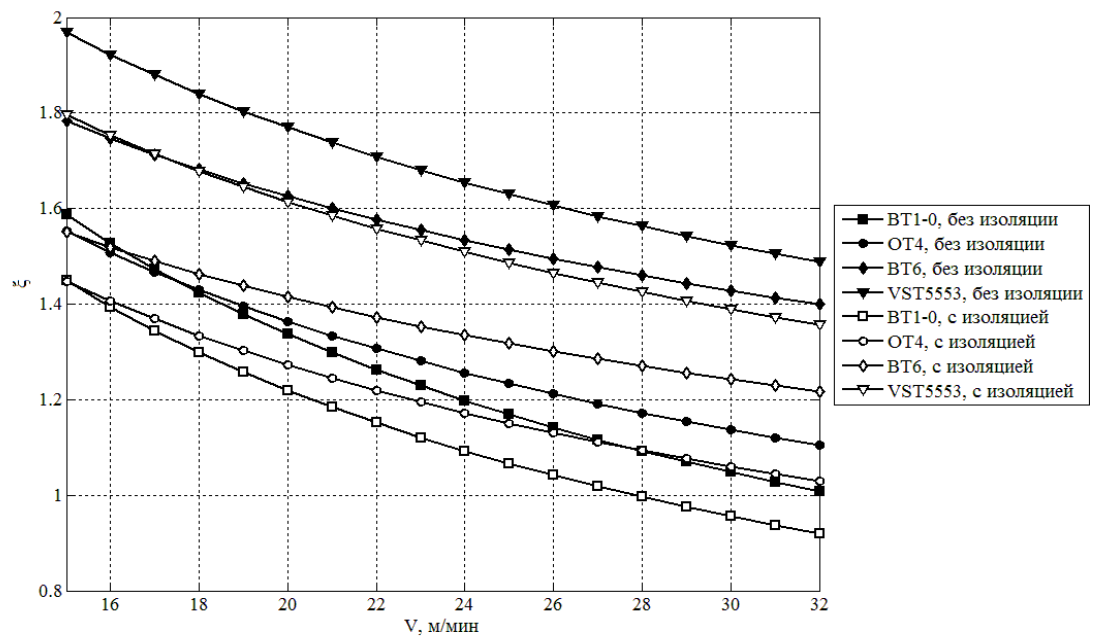


Рисунок 3.8. Влияние скорости резания V на усадку стружки: $s = 0,38$ мм/об; $t = 0,5$ мм.

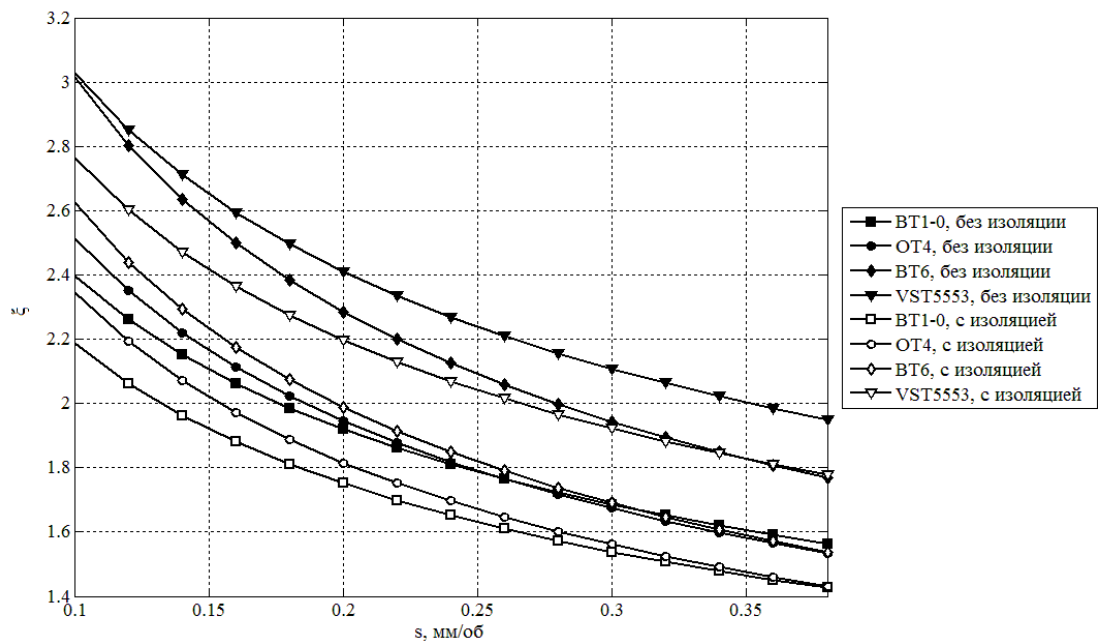


Рисунок 3.9. Влияние подачи s на усадку стружки: $V = 15,40$ м/мин; $t = 0,5$ мм.

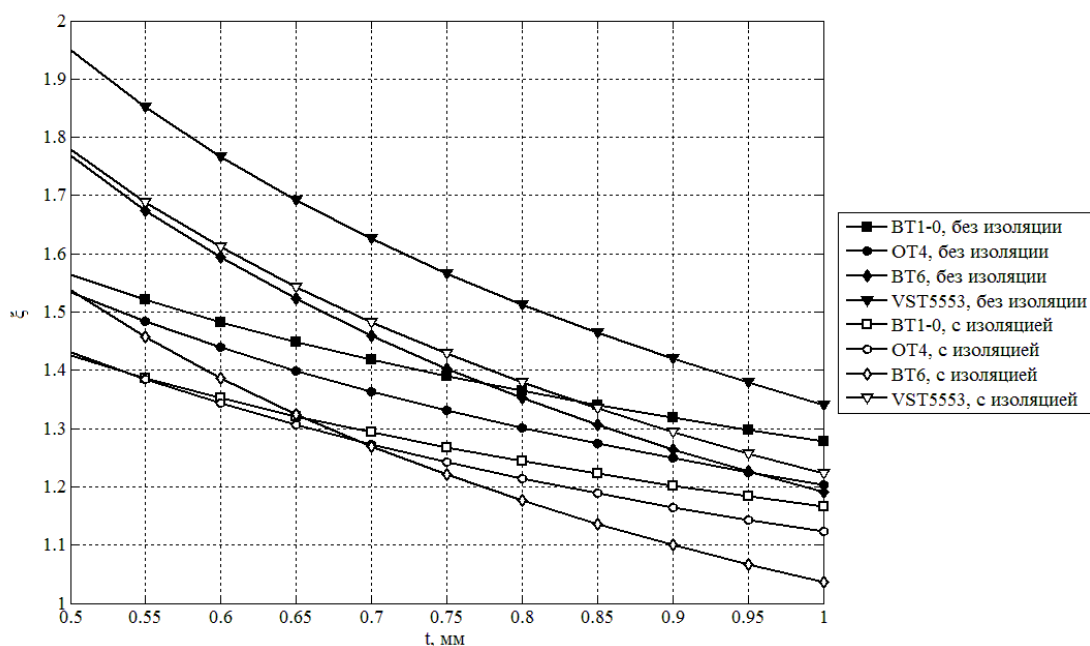


Рисунок 3.10. Влияние глубины резания t на усадку стружки: $V = 15,40$ м/мин;
 $s = 0,38$ мм/об

В Таблице 3.13 представлены результаты расчета коэффициента корреляции между силой резания F и усадкой стружки ξ_L при точении титановых сплавов. Результаты в Таблице 3.13 показывают существование значительной обратной корреляционной связи между величинами силы резания и усадки стружки при точении титановых сплавов. Коэффициент корреляции при этом варьируется в пределах от $(-0,57)$ до $(-0,88)$.

Таблица 3.13

Расчет коэффициента корреляции между силой резания F и усадкой стружки ξ_L

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	BT1-0		OT4		BT6		VST 5553	
					ξ_L	F , Н	ξ_L	F , Н	ξ_L	F , Н	ξ_L	F , Н
1	15,70	0,1	0,5	+1	2,18	162,43	2,11	221,31	2,50	126,73	2,50	198,21
2	31,40	0,1	0,5	+1	1,14	117,54	1,90	190,14	1,96	99,03	1,96	181,40
3	15,70	0,1	1,0	+1	1,86	277,42	1,73	459,42	1,72	223,28	1,93	492,19
4	31,40	0,1	1,0	+1	1,11	248,90	1,49	438,16	1,59	300,47	1,62	455,52
5	15,70	0,38	0,5	+1	1,53	362,07	1,67	494,82	1,61	295,85	1,90	649,48
6	31,40	0,38	0,5	+1	0,99	261,34	0,92	416,50	1,32	304,36	1,49	694,64
7	15,70	0,38	1,0	+1	0,99	643,73	1,13	1 313,4	1,01	929,19	1,21	909,71
8	31,40	0,38	1,0	+1	0,79	560,18	0,79	1 206,8	0,72	920,05	0,82	844,03

Таблица 3.13 (окончание)

Расчет коэффициента корреляции между силой резания F и усадкой стружки ξ_L

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	BT1-0		OT4		BT6		VST 5553	
					ξ_L	F, Н	ξ_L	F, Н	ξ_L	F, Н	ξ_L	F, Н
9	15,70	0,1	0,5	-1	2,37	188,99	2,23	242,10	2,80	158,03	2,89	230,65
10	31,40	0,1	0,5	-1	1,58	156,35	2,04	218,10	2,17	133,30	2,20	229,24
11	15,70	0,1	1,0	-1	2,26	297,80	1,90	474,29	1,99	230,03	2,08	513,94
12	31,40	0,1	1,0	-1	1,36	270,88	1,54	458,76	1,84	322,58	1,82	492,39
13	15,70	0,38	0,5	-1	1,58	399,08	1,82	555,12	1,87	357,39	2,04	791,51
14	31,40	0,38	0,5	-1	1,07	318,26	0,97	508,06	1,45	346,46	1,61	725,83
15	15,70	0,38	1,0	-1	1,08	695,32	1,23	1 385,5	1,19	981,16	1,31	1 008,1
16	31,40	0,38	1,0	-1	0,90	610,07	0,86	1 278,7	0,85	951,33	0,93	982,09
$\langle X \rangle, \langle Y \rangle$					1,42	348,15	1,52	616,33	1,66	417,45	1,77	574,94
$\langle X^2 \rangle, \langle Y^2 \rangle$					2,27	152820	2,53	546919	3,07	273202	3,41	404681
$\langle X \cdot Y \rangle$					448,23		800,47		548,69		904,03	
$DX = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$ $DY = \langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2$					0,24	31614	0,22	167056	0,31	98935	0,28	74130
$R = \frac{\langle X \cdot Y \rangle - \langle X \rangle \cdot \langle Y \rangle}{\sqrt{DX \cdot DY}}$					-0,5422		-0,7190		-0,8317		-0,7892	
$Z = 0,5 \cdot \ln \left(\frac{1+R}{1-R} \right)$					-0,6072		-0,9056		-1,1937		-1,0692	
$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{n_0 - 3}}$					0,2774							
$t_r = \frac{z}{\sigma_s}$					-2,1894		-3,2653		-4,3039		-3,8552	
					$ t_r > 1,645$							

3.6. Выводы к главе 3

На основе данных, полученных в главе 3, можно сделать следующие основные выводы:

1. Предсказано, что электрическая изоляция режущего инструмента способствует устранению силы электронного увлечения, действующей на дислокации в зоне резания, что в свою очередь способствует устранению дополнительной силы F^* , вызванной действием электрического тока, равной по результатам расчета $8,72 \div 95,60$ Н;
2. Измерение силы резания F при тчении титановых сплавов показало, что электрическая изоляция способствует уменьшению силы резания на

3,02 ÷ 46,73%, что было ранее предсказано на основе теории электропластической деформации металлов. Коэффициент корреляции между изменением силы резания ΔF и дополнительной силой, вызванной действием электрического тока F^* показывает существование сильной прямой корреляционной связи, и равен $R = 0,74 \div 0,88$;

3. Исследование усадки стружки ξ_L по методу взвешивания (методу А.М. Розенберга) показывает, что усадка стружки в условиях электрической изоляции снижается на величину порядка 3,24 ÷ 27,85%. Коэффициент корреляции между силой резания F и усадкой стружки ξ_L показывает существование достаточно сильной отрицательной корреляционной связи, и равен $R = (-0,54) \div (-0,83)$;
4. Методом регрессионного анализа получены зависимости силы тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок», силы резания и усадки стружки от параметров режима резания и электрической изоляции режущего инструмента.

4. Разработка способа электрической изоляции режущего инструмента

4.1. Термическое оксидирование титановых сплавов как метод получения покрытия с высоким электрическим сопротивлением

В главе 1 показано, что одним из вариантов решения поставленной задачи разработки нового способа электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов, могло бы быть использование вспомогательного инструмента, оснастки и приспособлений, изготовленных из титановых сплавов, на поверхности которых методом термического оксидирования создан диффузионный слой, обладающий электроизоляционными свойствами. Такая возможность появляется вследствие того, что оксид титана TiO_2 обладает повышенным электрическим сопротивлением. Повышенным электрическим сопротивлением обладают оксиды и других химических элементов, которые часто входят в состав титановых сплавов, таких как алюминий, марганец, кремний и цирконий, что наглядно показано в Таблице 4.1 [67].

Таблица 4.1

Свойства оксидов некоторых металлов

Формула оксида	Микро- твердость, МПа	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Удельное электро- сопротивление, Ом·м	Диэлектри- ческая проницаемость
MgO	7 453,30	1372,00	10^{12} - 10^{13}	3,20
Al_2O_3	20 153,40	2940,00	$1 \cdot 10^{14}$	10,5
SiO_2	11 033,56	176,00	$1 \cdot 10^{12}$	3,50
TiO	19 614,00	-	$2,6 \cdot 10^2$	-
TiO_2	7 845,66	245,00	$3 \cdot 10^5$	40,0 – 80,0
V_2O_5	1 380,00	-	$4,1 \cdot 10^{-1}$	13,84
MnO	1 961,40	-	$1 \cdot 10^8$	13,80
ZrO_2	1 153,00	2058,00	$3 \cdot 10^4$	-

Термическое оксидирование титана и его сплавов осуществляется в открытых электрических печах в температурном интервале от 600 °C до температуры на 20÷30 °C ниже температуры полиморфного превращения при

свободном доступе воздуха к поверхности металла. Выбор этого температурного интервала объясняется тем, что при температуре ниже 600 °C процессы диффузии кислорода в титан замедлены, а при температурах существования β -фазы (выше 900 °C) наблюдается катастрофический рост зерна, ухудшается структура, что приводит к хрупкости и ухудшению механических свойств основного металла [2], при этом как правило наблюдается отслаивание оксидной пленки.

После термического оксидирования поверхность технически чистого титана состоит из трех основных слоев. Наружный слой представляет собой рутил TiO_2 , средний слой состоит из переходных оксидов, в основном TiO , под которым расположена зона твердого раствора кислорода (диффузионный слой) в титане.

При температуре до 800 °C и сравнительно небольших выдержках оксидный слой имеет плотное строение и прочно связан со слоем монооксида и с основным металлом. Повышение температуры выше 850 °C и увеличение времени выдержки до 6÷8 ч ослабляют связь оксидов с основным металлом, при трении оксиды легко отслаиваются, поэтому при высокотемпературном оксидировании оксидный слой удаляют. На строение, фазовый состав и прочность сцепления оксидов с основным металлом большое влияние оказывает легирование титана. Некоторые легирующие элементы заметно снижают качество поверхностного упрочнения за счет оксидирования, в частности сплавы, легированные ванадием, имеют ровный однородный поверхностный слой только после специального режима оксидирования (в графите), а сплавы с оловом вообще не рекомендуется оксидировать [20]. Исходя из этого, можно заключить, что суммарное электрическое сопротивление поверхности титанового сплава после термического оксидирования будет зависеть от режима оксидирования (температуры и времени выдержки), химического состава сплава и химического состава оксидной пленки.

В настоящее время в литературе практически отсутствуют сведения об электрических свойствах титановых сплавов после термического оксидирования.

Одна из работ на эту тематику представлена И.И. Корниловым с соавторами, которые в работе [35] поставили эксперимент по выявлению влияния длительного оксидирования титановых сплавов на электрические свойства их поверхности. Некоторые результаты этой работы приведены в Таблице 4.2. Из Таблицы 4.2 можно заключить, что величина электрического сопротивления образцов из титанового сплава BT1-0, после термического оксидирования, зависит от толщины оксидной пленки, которая, в свою очередь зависит от принятого режима термического оксидирования. При этом с точки зрения технологичности предлагаемого способа целесообразно использовать такие титановые сплавы, оксидная пленка на поверхности которых будет иметь небольшую толщину, что позволит избежать существенного изменения геометрических размеров вспомогательного инструмента и приспособлений, которое приводит к биению режущего инструмента и, как следствие, снижению стойкости инструмента и качества обработанной поверхности.

Таблица 4.2

Влияние термической обработки на электрическую прочность оксидной пленки
титанового сплава BT1-0

Температура нагрева, °C	Время нагрева, ч	Толщина пленки, мм·10 ⁻³	Напряжение пробоя, В
600	25	4	60
	100	7	130
	500	19	400
	1000	22	460
700	25	10	200
	100	25	500
	250	30	600

Одним из преимуществ термического оксидирования является то, что данный метод благотворно влияет на механические свойства титановых сплавов. Хорошо известно, что оксидирование титановых сплавов приводит к существенному повышению микротвердости поверхности на глубину до нескольких десятков микрон в зависимости от использованного режима

термической обработки и марки титанового сплава [6, 49, 54, 79]. На Рисунке 4.1 приведены результаты исследования микротвердости сплавов ВТ6 и ВТ14 [49].

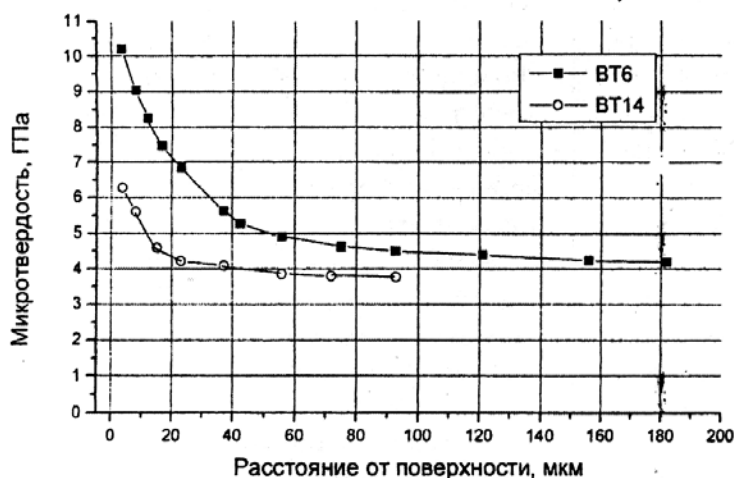


Рисунок 4.1. Распределение по глубине микротвердости для листов толщиной 2 мм. из сплавов ВТ6 и ВТ14

В работах [85, 93, 101] авторы, независимо друг от друга, пришли к выводу о благотворном влиянии оксидных пленок на усталостную долговечность и износостойкость титановых сплавов. В работе [62] указывается на то, что термическое оксидирование приводит к увеличению коэффициента трения титановых сплавов при одновременном снижении шероховатости поверхности. И. И. Корнилов с соавторами исследовали [34] влияние термического оксидирования на механические свойства титанового сплава ВТ1-0, и пришли к выводу, что термическое оксидирование при выдержке до 10 часов не приводит к снижению пластических свойств титанового сплава, в то время как прочностные свойства, вследствие старения, даже незначительно повысились.

Тем не менее, известно, что твердость титановых сплавов после термического оксидирования при высоких температурах снижается вследствие перестаривания, что может оказаться причиной неудовлетворительной работы вспомогательного инструмента в условиях динамической нагрузки при резании. Поэтому твердость сплава, из которого изготавливается вспомогательный

инструмент, должна быть близка к твердости конструкционной стали типа стали 45 или стали 40Х.

4.2. Исследование термически оксидированных титановых сплавов

4.2.1. Исследование электрического сопротивления

Исходные значения электрического сопротивления образцов, измеренные на приборе *Sonel MIC-1000*, не превышают $0,5 \div 1$ Ом. Это свидетельствует о том, что изначально все образцы являлись проводниками.

После термического оксидирования, однако, ситуация коренным образом изменилась. Результаты измерения электросопротивления после термического оксидирования приведены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты измерения электросопротивления, Ом.

Режим терм. оксид.	BT1-0	OT4	BT20	BT6	BT3-1	BT14	BT23	VST 5553
Исх. сост.	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1
650°C, 8 ч	50	2	1	100	1	1	$2,4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$
700°C, 7 ч	200	$15 \cdot 10^3$	700	$5 \cdot 10^3$	1,5	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$
750°C, 6 ч	$200 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^9$	$250 \cdot 10^6$	$40 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^9$	$50 \cdot 10^6$	$30 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
800°C, 5 ч	$50 \cdot 10^9$	$110 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$	$65 \cdot 10^6$	$30 \cdot 10^9$	$250 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^6$	$25 \cdot 10^6$

Как легко заметить из Таблицы 4.3, термическое оксидирование приводит к повышению электрического сопротивления титанового сплава по сравнению с исходным состоянием. При этом максимальная величина электрического сопротивления оксидной пленки зависит от химического состава сплава, а также от условий оксидирования.

Наибольшей величиной электрического сопротивления обладают оксидные пленки, образующиеся на поверхности сплавов BT1-0, OT4, BT20 и BT3-1. Следует отметить, что по данным проведенных наблюдений, оксидная пленка на поверхности сплава BT20 после оксидирования при 800 °C в течение 5 часов легко отслаивается, поэтому данный сплав нельзя рекомендовать в качестве инструментального материала.

Следует отметить, что ни один из сплавов, на поверхности которых удалось получить оксидную пленку с достаточным электрическим сопротивлением, кроме сплава BT20, не содержит ванадий. При этом, у сплавов, имеющих в составе ванадий, таких как BT6, BT14, BT23 и VST 5553, оксидная пленка имеет относительно низкое электрическое сопротивление. Это связано, вероятно, с тем, что при температурах свыше 700 °C ванадий реагирует с кислородом воздуха с образованием летучих оксидов, которые при выходе с поверхности формирующейся оксидной пленки, повреждают ее, что приводит к снижению электрического сопротивления. Наличие в составе сплава ванадия объясняет отслаивание оксидной пленки на поверхности сплава BT20.

Напротив, оксид алюминия Al_2O_3 , во-первых, способствует формированию более плотной оксидной пленки, что также ранее отмечалось в работе [49], а во-вторых, способствует повышению электрического сопротивления оксидной пленки, ввиду того, что оксид алюминия обладает большим удельным электрическим сопротивлением, нежели TiO_2 и другие оксиды титана.

В случае со сплавом OT4 определенную роль может играть также оксид марганца MnO , также имеющий большее, чем у TiO_2 удельное электрическое сопротивление.

Представленные в данном разделе гипотезы, объясняющие различную величину электрического сопротивления титановых сплавов после термического оксидирования различным химическим составом оксидного слоя, были подтверждены методом рентгеноструктурного фазового анализа оксидных пленок, результаты которого приведены в Приложении 2.

4.2.3. Исследование прироста массы

Оксидная пленка, полученная на поверхности титановых сплавов, приводит к увеличению массы образцов и изменению их геометрических размеров. Поскольку напрямую измерить изменение геометрических размеров образцов при толщине оксидной пленки порядка $10\div 50$ мкм затруднительно, то об этом изменении можно косвенно судить по привесу.

Для обеспечения должной точности изделия необходимо, чтобы привес, а следовательно и изменение геометрических размеров, при термическом оксидировании был минимален, а электрическое сопротивление поверхности и твердость, по возможности, максимальны. Результаты измерения относительного прироста массы образцов приведены на Рисунке 4.2. Из Рисунка 4.2 видно, что наименьший относительный привес наблюдается у образцов из $(\alpha+\beta)$ титановых сплавов марок VT20, VT3-1, VT14. Наибольший привес наблюдается у образцов из сплава VST 5553, и сплавов OT4 и VT1-0.

На Рисунках 4.3 – 4.7 представлены микрофотографии оксидированного слоя на поверхности некоторых сплавов после термического оксидирования при температуре $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 часов, полученные при помощи оптического микроскопа *Zeiss Observer D1*, оснащенного системой управления *Thixomet*. Толщина слоя при данном режиме оксидирования лежит в пределах от $10\div 25$ мкм у сплавов VT20, VT6 и VT3-1 до $50\div 70$ мкм у сплавов OT4 и VST 5553. Следовательно, толщина оксидного слоя в целом соответствует величине относительного прироста массы образцов.

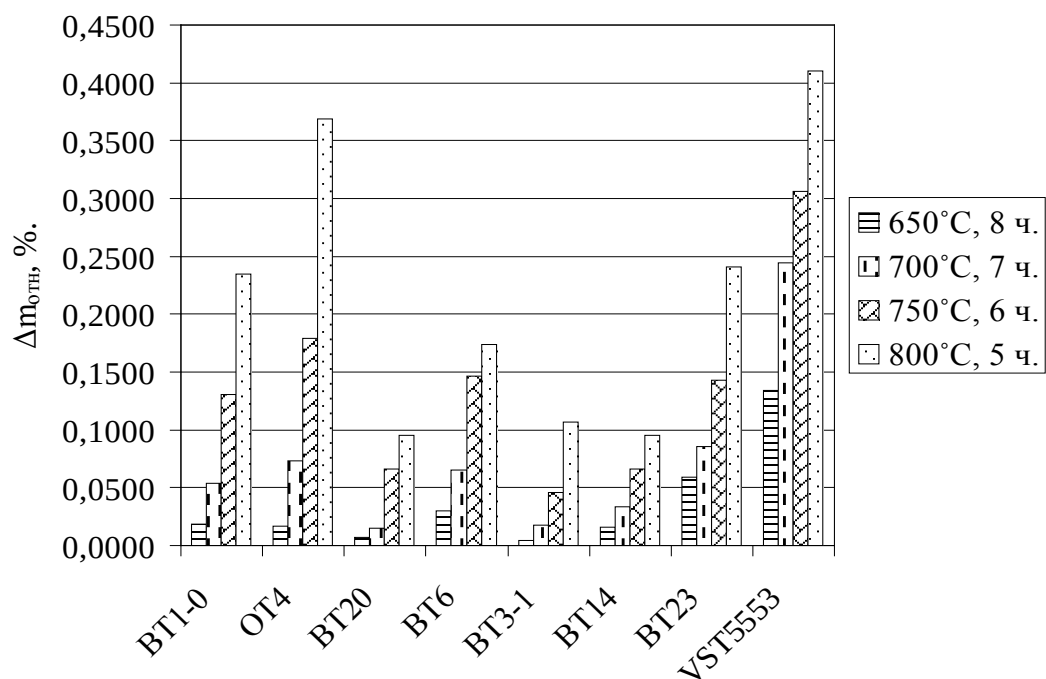


Рисунок 4.2. Гистограммы относительного привеса образцов

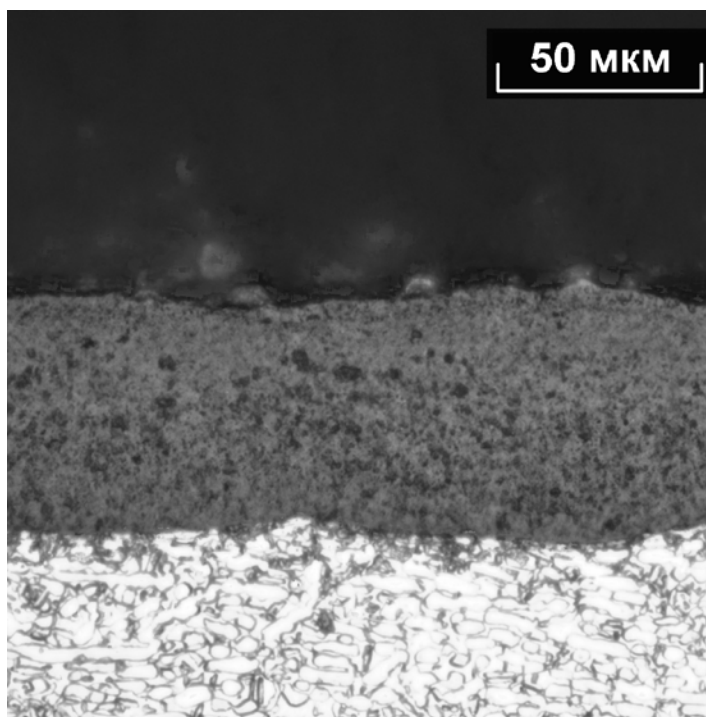


Рисунок 4.3. Микроструктура поверхностного слоя образца из сплава OT4 после термического оксидирования при температуре 750 °C в течение 6 часов

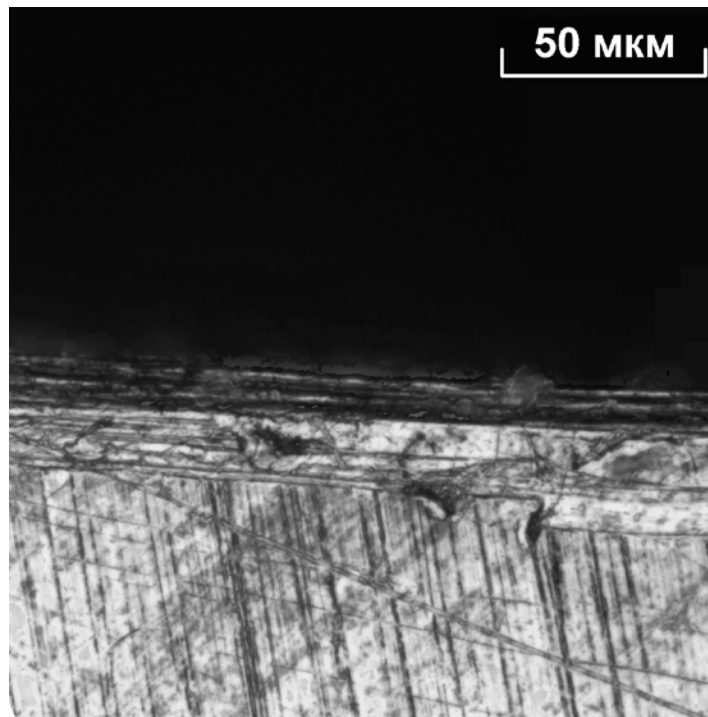


Рисунок 4.4. Микроструктура поверхностного слоя образца из сплава ВТ20 после термического оксидирования при температуре 750 °С в течение 6 часов

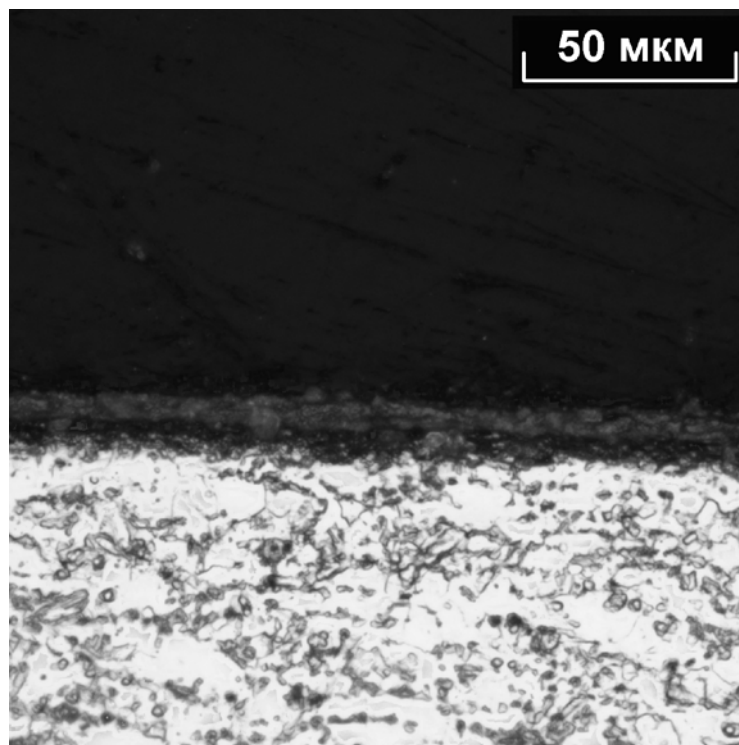


Рисунок 4.5. Микроструктура поверхностного слоя образца из сплава ВТ6 после термического оксидирования при температуре 750 °С в течение 6 часов

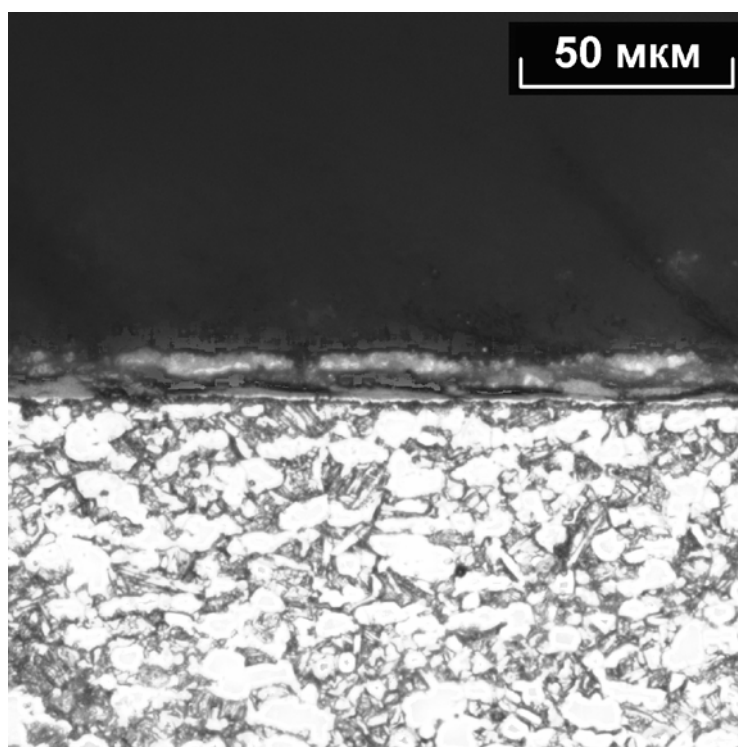


Рисунок 4.6. Микроструктура поверхностного слоя образца из сплава ВТЗ-1 после термического оксидирования при температуре 750 °С в течение 6 часов

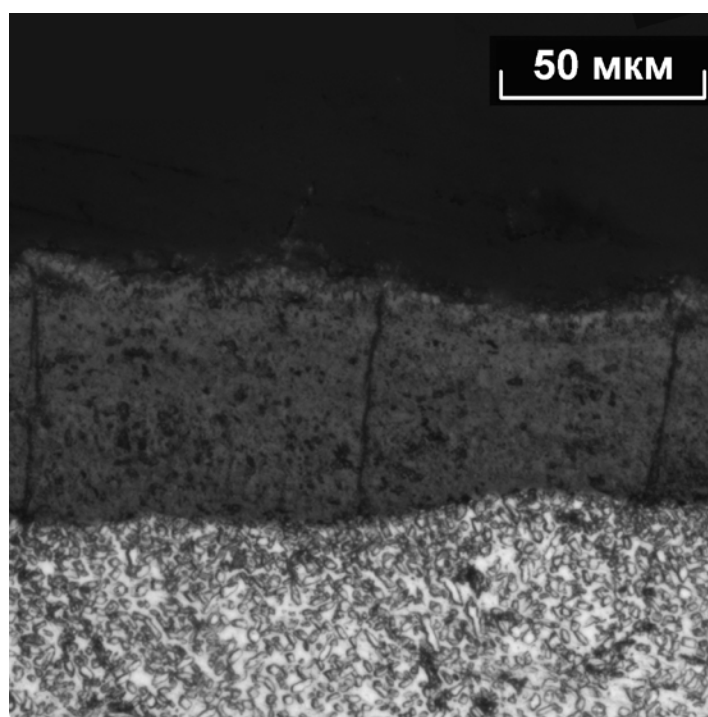


Рисунок 4.7. Микроструктура поверхностного слоя образца из сплава VST 5553 после термического оксидирования при температуре 750 °С в течение 6 часов

Среди перечисленных сплавов ранее озвученным условиям максимального электрического сопротивления удовлетворяют сплавы ВТ1-0, ОТ4 и ВТ3-1. Наименьший привес среди них наблюдается у сплава ВТ3-1, поэтому его можно рекомендовать для изготовления вспомогательного инструмента. Сплав ВТ1-0 обладает слишком низкой прочностью, поэтому в данном исследовании рассматривается скорее как модельный, изготавливать из него вспомогательный инструмент, работающий при высоких нагрузках, нецелесообразно. Сплав ОТ4 демонстрирует довольно большой привес, однако, его всё же можно рекомендовать для изготовления вспомогательного инструмента с большими допусками размеров, формы и расположения поверхностей, например изолирующих прокладок для токарных резцов.

4.2.4. Исследование твердости

Твердость играет важную роль при выборе материала для вспомогательного инструмента. ГОСТ 13598-85 [22] определяет материал переходной втулки для крепления инструмента с коническим хвостовиком – сталь 40Х по ГОСТ 4543-71 или сталь другой марки с механическими свойствами близкими к свойствам стали 40Х. Микротвердость поверхности вспомогательного инструмента стандартом не определена, поэтому ее дополнительное измерение не требуется.

Поскольку прочность титановых сплавов зачастую превышает прочность конструкционных сталей, основным параметром оказывается их твердость, которую измеряли при помощи твердомера Бринелля марки ТБ5004. Перед измерением твердости титановых сплавов после термического оксидирования с них удаляли оксидную пленку путем фрезерования образцов на глубину 1 мм, и последующего шлифования и полирования образцов. Результаты измерения приведены в Таблице 4.4.

Прослеживается отчетливая тенденция увеличения твердости сплава при термическом оксидировании с ростом количества β -стабилизаторов в его составе.

Следует учесть, что температурный режим, примененный для оксидирования характеризуется мягким перестариванием, поэтому твердость образцов после выдержки в печи при 800 °С как правило ниже твердости после закалки.

Таблица 4.4

Результаты исследования твердости образцов

Марка сплава	НВ, 10 ⁻¹ МПа				
	После закалки	После старения			
		650°С, 8 ч.	700°С, 7 ч.	750°С, 6 ч.	800°С, 5 ч.
BT1-0	201	201	207	201	201
OT4	207	207	217	207	201
BT20	285	293	277	255	255
BT6	321	341	331	321	302
BT3-1	302	352	321	321	293
BT14	285	293	311	277	255
BT23	285	331	321	285	277
VST 5553	262	352	331	302	262

Согласно ГОСТ 13598-85 материалов, из которых будет изготавливаться вспомогательный инструмент не должна быть ниже 296 НВ. Таковой обладают практически все сплавы после оксидирования при температуре 650 и 700 °С, однако в данных условиях оксидирования ни один сплав не обладает достаточной величиной электросопротивления поверхности.

Из сплавов с наивысшей твердостью после оксидирования при высоких температурах, достаточной величиной электрического сопротивления обладает только сплав BT3-1, что делает его единственным сплавом, удовлетворяющим всем требованиям, поставленным в предыдущих параграфах, то есть обладающим высокой твердостью, высоким поверхностным электрическим сопротивлением после оксидирования, и малым привесом при оксидировании. В качестве альтернативного материала допустимо применение сплава OT4 в тех случаях, когда не требуется высокая прочность и твердость электроизолирующего приспособления.

4.3. Предлагаемый способ электрической изоляции металлорежущего инструмента

Техническим результатом, достигаемым при осуществлении способа, является повышение стойкости режущего инструмента при одновременном сохранении технических и эксплуатационных характеристик технологической системы деталь – инструмент – приспособление – станок.

Указанный технический результат достигается за счет того, что режущий инструмент крепится к поверхностям деталей, выполненных из титанового сплава, на контактирующих поверхностях которых создают оксидную пленку с поверхностным сопротивлением ≥ 200 МОм.

Приспособления и детали, предназначенные для крепления режущего инструмента, выполняют из титанового сплава марки ВТЗ-1 или ОТ4, после чего оксидируют их в открытой электрической печи при температуре $750 \div 800$ °С в течение $4 \div 6$ часов. При этом на поверхности изделий возникает прочная, плотная, пассивная оксидная пленка, состоящая преимущественно из TiO_2 . Толщина такой пленки достигает $10 \div 60$ мкм, под ней находится диффузионная зона (альфированный слой) на основе твердого раствора кислорода в α -титане. Электросопротивление такой пленки превышает $200 \div 500$ МОм. Оксидная пленка имеет микротвердость порядка 10 ГПа [6], сравнимую с микротвердостью закаленной стали. Высокая твердость способствует высокой износостойкости, что подтверждается исследованием термически оксидированных слоев при трении титановых сплавов с другими металлами и сплавами [93]. Такие свойства оксидной пленки на поверхности титановых сплавов обеспечивают, во-первых, разрыв замкнутого контура электрического тока «станок – инструмент – изделие – станок», во-вторых, высокую прочность и твердость используемой технологической оснастки, в-третьих, малые изменения геометрических размеров технологической оснастки после термического оксидирования.

На Рисунках 4.8 и 4.9 приведены примеры реализации предлагаемого способа при точении. На Рисунке 4.8а проходной резец с державкой из конструкционной стали закрепляют между двумя пластинами из титанового сплава, на поверхности которых создан оксидный слой с диэлектрическими свойствами. Пластины не прикреплены к резцу, но прижимаются к нему крепежными винтами суппорта токарного станка. Схема на Рисунке 4.8б аналогична, за исключением того, что пластины из титанового сплава с оксидным покрытием прикрепляются к резцу при помощи винтов из титанового сплава, также подвергнутых термическому оксидированию.

На Рисунке 4.9 отрезной резец, предназначенный для отрезания «короны» у слитков из титановых сплавов, крепится в приспособлении, изготовленном из листового титана путём гибки. На поверхности приспособления методом термического оксидирования создан оксидный слой с повышенными диэлектрическими свойствами. Приспособление крепится к резцу при помощи болтового или винтового соединения, при этом детали крепежа также изготавливаются из титановых сплавов и подвергаются термическому оксидированию.

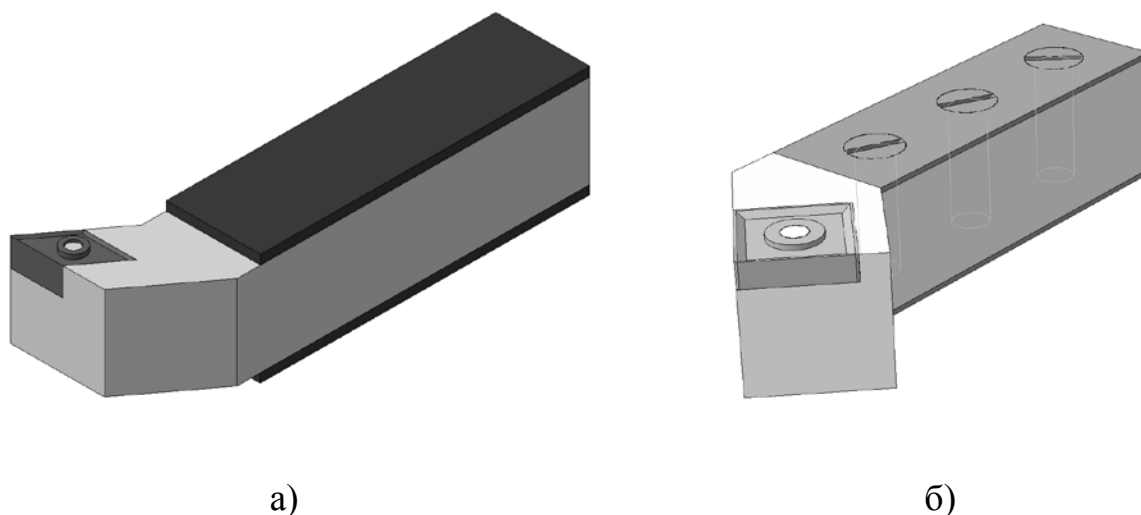


Рисунок 4.8. Пример реализации предлагаемого способа при работе проходным резцом

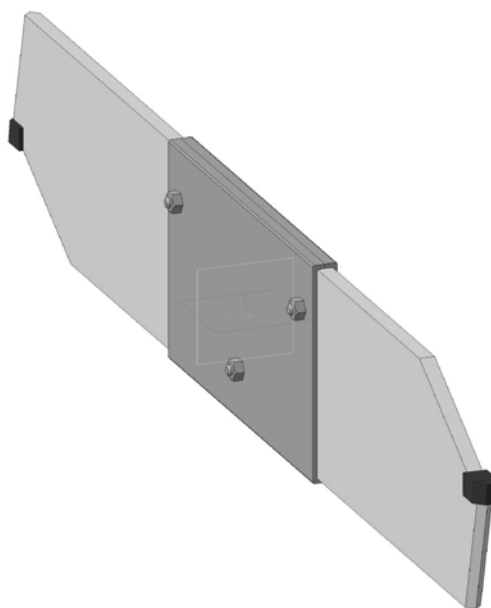


Рисунок 4.9. Пример реализации предлагаемого способа при работе отрезным резцом

На Рисунке 4.10 показана схема для осуществления предлагаемого способа повышения стойкости при сверлении. Сверло 1 устанавливают в шпинделе 2 сверлильного станка, в который установлена переходная втулка 3, изготовленная из титанового сплава. На поверхности переходной втулки 3 путем термического оксидирования создана оксидная пленка 4, благодаря чему достигается электрическая изоляция сверла.

Одним из потенциальных возражений против предлагаемой схемы является предположение, что термическое оксидирование может приводить к существенному ухудшению качества наружной поверхности втулок, и, как следствие, биению сверла. Для проверки этого предположения втулка из сплава ВТЗ-1, подвергнутая термическому оксидированию в печи при температуре 750 °С в течение 6 часов, измерялась на координатно-измерительной машине *Zeiss Accura* в инструментальном цехе ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Результаты измерения, сопоставленные с требованиями ГОСТ, представлены в Таблице 4.5.

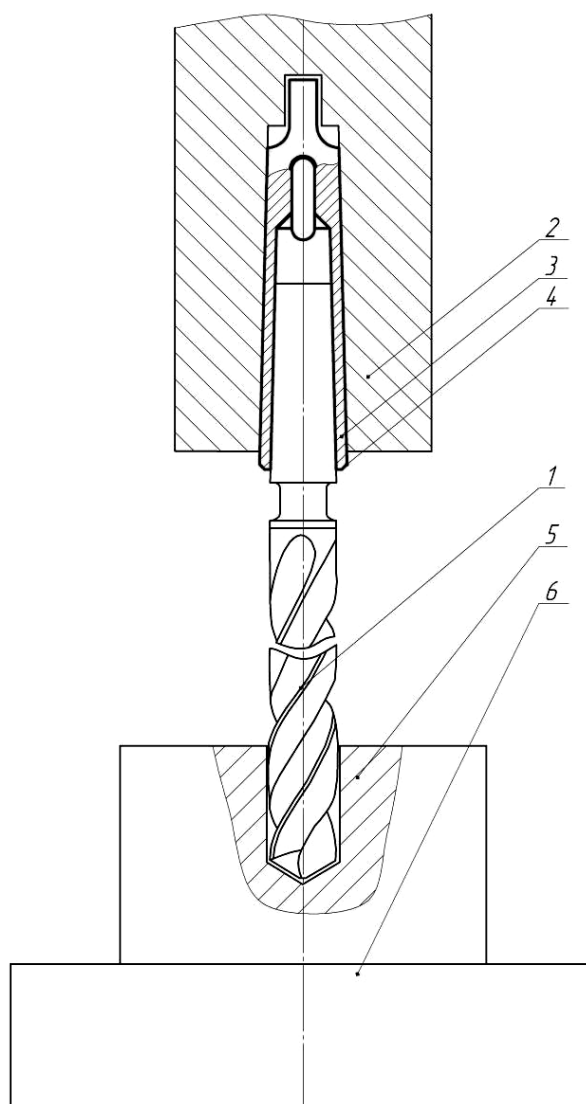


Рисунок 4.10. Пример реализации способа при сверлении:

1 – сверло, 2 – шпиндель, 3 – переходная втулка, 4 – оксидный слой, 5 – деталь, 6 – стол станка

Таблица 4.5

Результаты измерения переходной втулки

№	Наименование измерений	Результаты измерений	По ГОСТ 13598-85, 25557-82
1	Угол наружного конуса	1°29'10"	1°29'13"
2	Угол внутреннего конуса	1°26'20"	1°26'16"
3	Максимальный диаметр наружного конуса	Ø 31,237 мм	Ø 31,267 мм
4	Максимальный диаметр внутреннего конуса	Ø 23,801 мм	Ø 23,825 мм
5	Несоосность наружного и внутреннего конуса	0,025 мм	0,033 мм
6	Биение внутреннего конуса на глубине 10 мм.	0,008 мм	0,012 мм

Как видно из Таблицы 4.5 экспериментальные втулки удовлетворяют требованиям ГОСТ 13598-85 и ГОСТ 25557-82. При этом благодаря высоким механическим свойствам титановых сплавов не нарушается жесткость системы ДИПС, что благоприятно влияет на точность обработки изделия.

На Рисунке 4.11 приведен пример реализации способа при фрезеровании. Здесь концевую фрезу с цилиндрическим хвостовиком 1 помещают в сменную цангу 2 (*DIN 6499 A*), изготовленную из титанового сплава марки ВТЗ-1, и подвергнутую термическому оксидированию в печи при температуре 800°С в течение 5 часов. Сменную цангу в свою очередь устанавливают в цанговый патрон 3 (*DIN 2080*) и поджимают гайкой 4. При закручивании гайки 4 цанга 2 вдавливается в патрон и за счет своей формы упруго деформируется, обжимая фрезу. Устройство, представленное на Рисунке 4.11, может быть применено не только для зажима фрез, но и для зажима любых инструментов с цилиндрическим хвостовиком (сверл, зенкеров, разверток, метчиков), диаметр которых не превышает 26 мм.

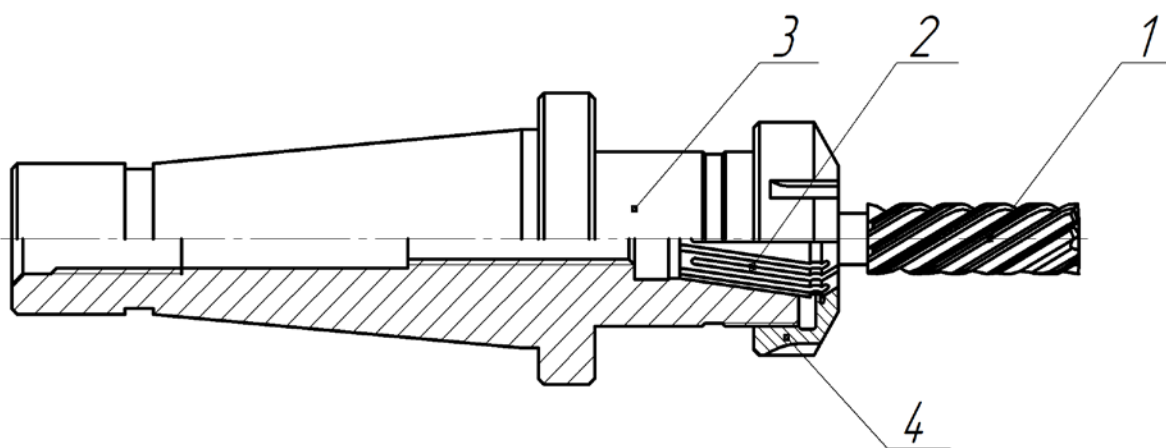


Рисунок 4.11. Пример реализации способа при фрезеровании:

1 – концевая фреза; 2 – сменная цанга; 3 – цанговый патрон; 4 – гайка

Как видно из Рисунков 4.8 – 4.11, практическая реализация предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента является относительно простой конструкторской задачей, решение которой возможно практически для

любых операций механической обработки токопроводящих материалов лезвийным режущим инструментом. Таким образом, предлагаемый способ является достаточно универсальным, и отвечает предъявляемым к нему технологическим требованиям.

4.4. Выводы к главе 4

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. В процессе термического оксидирования на поверхности титановых сплавов образуется плотная, прочная оксидная пленка, состоящая в основном из TiO_2 , переходных оксидов, а также оксидов легирующих элементов, входящих в сплав, которая обладает электрическим сопротивлением порядка $200 \div 1000$ МОм.
2. Наибольшей величиной электрического сопротивления после термического оксидирования обладают сплавы ВТ1-0, ОТ4, ВТ3-1 и ВТ20. Основное влияние на формирование диэлектрических свойств оксидной пленки оказывает оксид титана TiO_2 , а также переходные оксиды (TiO , Ti_6O) и оксид алюминия Al_2O_3 . Наличие в составе сплава ванадия, напротив, ухудшает диэлектрические свойства пленки;
3. Наименьшим приростом массы, а, следовательно, и наименьшим изменением геометрических размеров при оксидировании обладают сплавы с ($\alpha+\beta$)-структурой, в частности сплавы ВТ20, ВТ3-1, ВТ14;
4. Наибольшей твердостью обладают сплавы марок ВТ6, ВТ3-1, ВТ23 и VST 5553. Прослеживается отчетливая зависимость увеличения твердости сплава при оксидировании с ростом содержания в нем β -стабилизаторов;
5. Показана возможность использования титановых сплавов в качестве материала для изготовления вспомогательного инструмента с диэлектрическим оксидным покрытием, который будет обеспечивать одновременно достаточную жесткость инструментальной системы, а также

электрическую изоляцию инструмента. Наилучшим сплавом для изготовления вспомогательного инструмента является сплав марки ВТЗ-1;

6. Предложен новый способ электрической изоляции режущего инструмента при обработке титановых сплавов, состоящий в использовании вспомогательного инструмента изготовленного из титановых сплавов, на поверхности которых создан диэлектрический оксидный слой. Приведены примеры его практической реализации. На способ был получен патент РФ №2456125.

5. Исследование эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов

5.1. Исследование термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5»

В работе [60] С.Н. Постников показал, что измеряя термоЭДС при нагреве термопар «инструментальный материал – обрабатываемый материал» можно прогнозировать влияние электрического тока при резании на износ. Это обуславливается тем, что основной составляющей термоЭДС при нагреве являются контактная разность потенциалов материалов термопары и различие концентраций свободных электронов. Этот тезис, однако, не был экспериментально проверен применительно к титановым сплавам.

В данном разделе проведено экспериментальное исследование величины термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5». Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами стойкостных испытаний сверл из стали Р6М5 при обработке титановых сплавов.

Первые градуировочные кривые «ТермоЭДС – T , °С» сварных экспериментальных термопар «титановый сплав – сталь Р6М5» строились без предварительного отжига. Для всех термопар они выражаются кривой типа 1 на Рисунке 5.1. Кривая 1 на Рисунке 5.1 наглядно демонстрирует структурную чувствительность термоЭДС. На кривой 1 видны четыре изотермических участка, где наблюдается стабилизация термоЭДС, говорящих о структурных превращениях в титановом или стальном электроде термопары. Анализ подготовки электродов показал, что при резке листов, из которых изготовлены электроды возникает наклеп, а после сварки в стали Р6М5 вблизи сварочного контакта наблюдаются закаленные участки с мартенситной и неравновесной структурой. Вблизи шва структура литая.

Наблюдаемые на Рисунке 5.1 изотермические участки в зависимости от температуры связаны:

1. до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – со снятием упругих напряжений в обоих электродах;
2. $350\div 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с процессами отдыха и полигонизации в титановых сплавах и продолжающим снятием напряжений в стали;
3. $500\div 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с распадом остаточного аустенита в стали, рекристаллизации титана, началом распада мартенсита;
4. выше $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с распадом мартенсита;

Отжиг термопар при $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ снимает неравновесную структуру в стали, мартенсит полностью распадается в равновесную феррито-карбидную структуру. В титановых сплавах полностью проходит рекристаллизация. Отсюда следует, что для устранения неравновесной структуры и получения качественных градуировочных кривых совершенно необходим предварительный отжиг термопар.

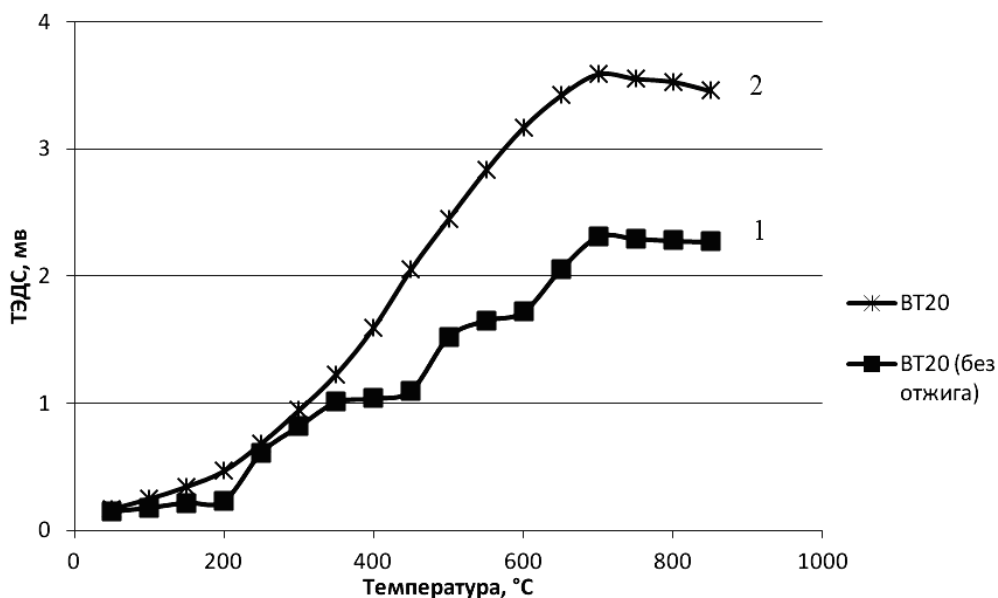


Рисунок 5.1. Зависимость термоЭДС от температуры термопары (Р6М5 – ВТ20):

1 – до отжига 2 – после отжига

В Таблице 5.1 приведены экспериментальные данные, полученные при изучении влияния температуры на термоЭДС спая «титановый сплав – сталь Р6М5». Также представлены термоЭДС спаев «сталь 45 – сталь Р6М5» и «сталь 12Х18Н10Т – сталь Р6М5».

Таблица 5.1

Зависимость термоЭДС термопар от температуры нагрева

Температура нагрева, °C	ТермоЭДС, мВ						
	BT1-0	OT4	BT20	BT6	BT3-1	Сталь 45	12X18H10T
50	0,295	0,332	0,171	0,341	1,204	0,043	0,073
100	0,687	0,521	0,251	0,440	1,299	0,116	0,543
150	0,891	0,673	0,347	0,689	1,399	0,216	0,995
200	0,963	0,792	0,470	0,866	1,583	0,358	1,366
250	1,169	0,935	0,688	1,084	1,692	0,426	1,687
300	1,390	1,043	0,947	1,368	1,789	0,576	1,896
350	1,657	1,087	1,231	1,652	1,961	0,669	1,956
400	2,037	1,091	1,598	2,082	2,253	0,827	2,010
450	2,319	1,056	2,057	2,484	2,509	0,964	1,985
500	2,522	1,009	2,452	2,889	2,833	1,065	1,920
550	2,733	0,925	2,835	3,178	3,073	1,173	1,813
600	2,932	0,851	3,171	3,551	3,346	1,255	1,741
650	3,092	0,871	3,423	3,791	3,560	1,297	1,673
700	3,295	0,760	3,592	3,956	3,676	1,289	1,601
750	3,232	0,760	3,556	4,044	3,737	1,262	1,579
800	3,398	0,613	3,531	4,089	3,766	1,275	1,344
850	4,406	0,370	3,459	4,109	3,781	1,202	1,037

По результатам обработки экспериментальных данных в пакете MATLAB были получены следующие зависимости термоЭДС от температуры нагрева

$$\text{BT1-0} \quad U = 0,006 \cdot T + 0,046 \quad R=0,79 \quad (5.1)$$

$$\text{OT4} \quad U = -8,29 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,005 \cdot T + 0,075 \quad R=0,70 \quad (5.2)$$

$$\text{BT20} \quad U = -2,37 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 3,04 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,005 \cdot T + 0,448 \quad R=0,91 \quad (5.3)$$

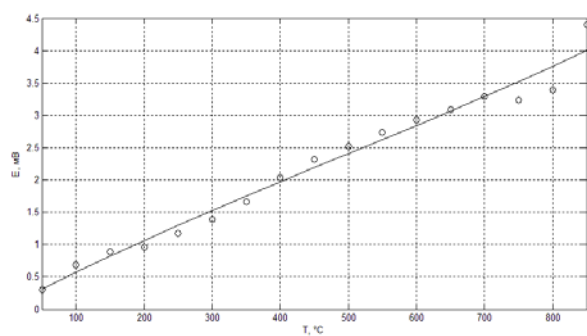
$$\text{BT6} \quad U = -1,72 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 2,17 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,002 \cdot T + 0,420 \quad R=0,91 \quad (5.4)$$

$$\text{BT3-1} \quad U = -1,27 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 1,70 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,002 \cdot T + 1,365 \quad R=0,78 \quad (5.5)$$

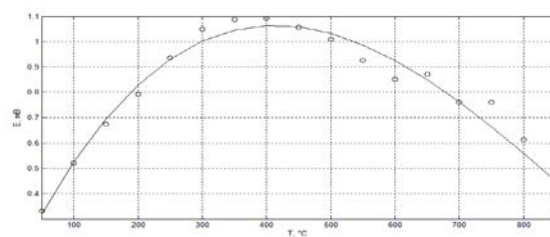
$$\text{Сталь 45} \quad U = -5,56 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5,40 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,0008 \cdot T - 0,012 \quad R=0,96 \quad (5.6)$$

$$\text{12X18H10T} \quad U = -2,28 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,014 \cdot T - 0,586 \quad R=0,97 \quad (5.7)$$

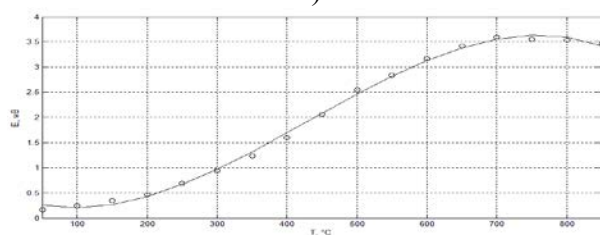
Результаты моделирования термоЭДС с использованием формул (5.1) – (5.7) представлены на Рисунке 5.2.



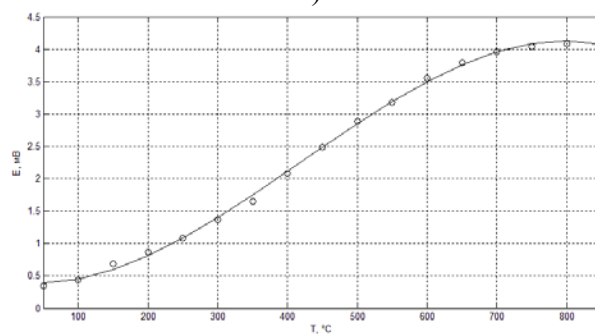
а)



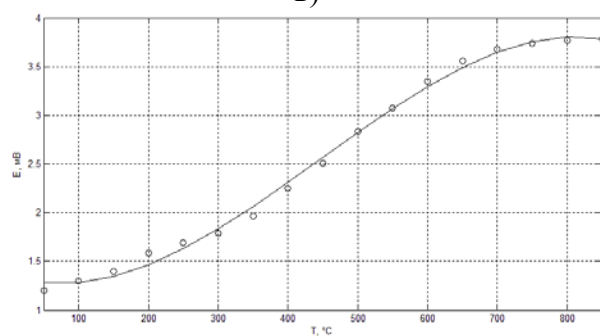
б)



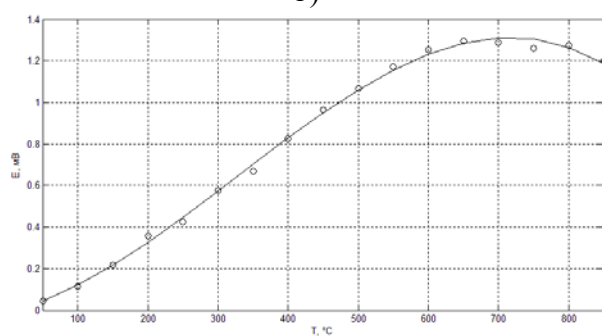
в)



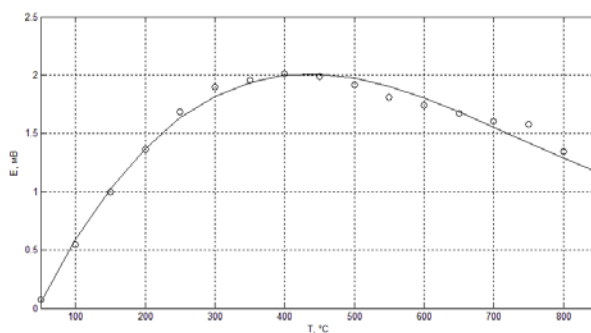
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 5.2. Зависимость от температуры нагрева спая сталь Р6М5:

а) VT1-0; б) OT4; в) VT20; г) VT6; д) VT3-1; е) сталь 45; ж) сталь 12X18H10T

Для удобства анализа и сопоставления представленные графики приведены на одном Рисунке 5.3. Из Рисунка 5.3 следует, что наибольшая термоЭДС при нагреве термопар наблюдается у сплавов $(\alpha+\beta)$ -группы VT6 и VT3-1, а также у

сплава ВТ1-0. Среди титановых сплавов наименьшая термоЭДС при нагреве в паре со сталью Р6М5 наблюдалась у сплава ОТ4. В соответствии с гипотезой С.Н. Постникова [60], это означает, что электрическая изоляция режущего инструмента будет приводить к лучшим результатам при обработке сплавов ВТ1-0, ВТ6 и ВТ3-1, и к меньшим результатам при обработке титанового сплава ОТ4, а также сталей 45 и 12Х18Н10Т, продемонстрировавших при нагреве в паре со сталью Р6М5 относительно низкие значения термоЭДС. Отметим, однако, что при нагреве термопары «сталь Р6М5 – сталь 12Х18Н10Т» термоЭДС оказалась существенно выше, чем при нагреве термопары «сталь Р6М5 – сталь 45».

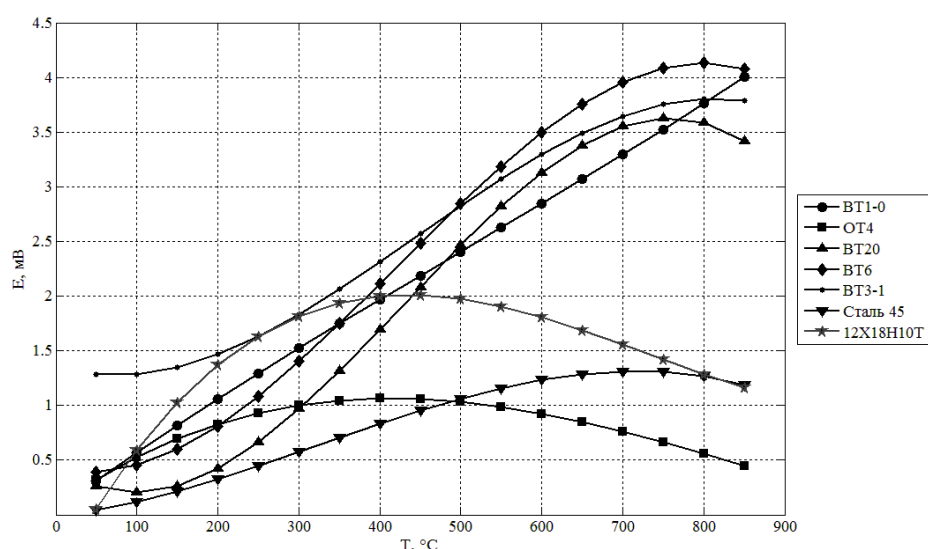


Рисунок 5.3. Зависимости термоЭДС спаев от температуры нагрева

5.2. Исследование стойкости резцов при обработке титановых сплавов

Режимы работы резца и результаты измерения стойкости приведены в Таблице 5.2. Электрическую изоляцию осуществляли при помощи двух прокладок из титанового сплава ОТ4, подвергнутого термическому оксидированию при 800°С в течение 5 часов, между которыми зажимался резец, в соответствии со схемой, приведенной на рис 4.14а. Охлаждение при обработке не использовалось. Из результатов исследования видно, что разрыв цепи

электрического тока приводит к повышению стойкости проходных резцов при обработке титановых сплавов в $1,23 \div 2,03$ раза.

Таблица 5.2

Результаты исследования стойкости резцов

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Средний период стойкости T, мин.			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	+1	33,25	34,67	23,29	12,86
2	31,40	0,1	0,5	+1	29,97	29,59	16,00	8,52
3	15,70	0,1	1,0	+1	29,97	32,40	19,58	9,56
4	31,40	0,1	1,0	+1	27,01	27,30	14,61	7,60
5	15,70	0,38	0,5	+1	23,82	25,61	15,26	8,16
6	31,40	0,38	0,5	+1	21,46	21,45	9,94	6,56
7	15,70	0,38	1,0	+1	21,46	24,62	12,91	5,85
8	31,40	0,38	1,0	+1	19,34	19,16	9,88	5,57
9	15,70	0,1	0,5	-1	20,18	23,18	12,01	7,39
10	31,40	0,1	0,5	-1	17,81	19,09	9,10	5,84
11	15,70	0,1	1,0	-1	18,57	21,33	10,68	6,66
12	31,40	0,1	1,0	-1	16,39	17,57	8,09	5,26
13	15,70	0,38	0,5	-1	15,87	17,99	7,53	5,29
14	31,40	0,38	0,5	-1	14,01	14,82	5,71	4,18
15	15,70	0,38	1,0	-1	14,60	16,55	6,69	4,77
16	31,40	0,38	1,0	-1	12,89	13,63	5,07	3,77

В Таблице 5.3 приведены данные по расчету коэффициента корреляции между силой резания и стойкостью токарных резцов, оснащенных неперетачиваемыми твердосплавными пластинами при использовании электрической изоляции. В Таблице 5.4 приведены данные по расчету коэффициента корреляции между усадкой стружки и стойкостью токарных резцов.

Существование корреляционной связи между силой резания, усадкой стружки и стойкостью режущего инструмента можно качественно продемонстрировать с помощью графиков, представленных на Рисунках 5.4 – 5.7.

Таблица 5.3

Расчет коэффициента корреляции между стойкостью резцов и силой резания при
точении титановых сплавов

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	BT1-0		OT4		BT6		VST 5553	
					F, Н	T, мин	F, Н	T, мин	F, Н	T, мин	F, Н	T, мин
1	15,70	0,1	0,5	+1	162,43	33,25	221,31	34,67	126,73	23,29	198,21	12,86
2	31,40	0,1	0,5	+1	117,54	29,97	190,14	29,59	99,03	16,00	181,40	8,52
3	15,70	0,1	1,0	+1	277,42	29,97	459,42	32,40	223,28	19,58	492,19	9,56
4	31,40	0,1	1,0	+1	248,90	27,01	438,16	27,30	300,47	14,61	455,52	7,60
5	15,70	0,38	0,5	+1	362,07	23,82	494,82	25,61	295,85	15,26	649,48	8,16
6	31,40	0,38	0,5	+1	261,34	21,46	416,50	21,45	304,36	9,94	694,64	6,56
7	15,70	0,38	1,0	+1	643,73	21,46	1 313,4	24,62	929,19	12,91	909,71	5,85
8	31,40	0,38	1,0	+1	560,18	19,34	1 206,8	19,16	920,05	9,88	844,03	5,57
9	15,70	0,1	0,5	-1	188,99	20,18	242,10	23,18	158,03	12,01	230,65	7,39
10	31,40	0,1	0,5	-1	156,35	17,81	218,10	19,09	133,30	9,10	229,24	5,84
11	15,70	0,1	1,0	-1	297,80	18,57	474,29	21,33	230,03	10,68	513,94	6,66
12	31,40	0,1	1,0	-1	270,88	16,39	458,76	17,57	322,58	8,09	492,39	5,26
13	15,70	0,38	0,5	-1	399,08	15,87	555,12	17,99	357,39	7,53	791,51	5,29
14	31,40	0,38	0,5	-1	318,26	14,01	508,06	14,82	346,46	5,71	725,83	4,18
15	15,70	0,38	1,0	-1	695,32	14,60	1 385,5	16,55	981,16	6,69	1 008,1	4,77
16	31,40	0,38	1,0	-1	610,07	12,89	1 278,7	13,63	951,33	5,07	982,09	3,77
$\langle X \rangle, \langle Y \rangle$					348,15	21,04	616,32	22,44	417,45	11,65	574,93	6,74
$\langle X^2 \rangle, \langle Y^2 \rangle$					152821	478,71	546903	539,39	273202	159,85	404676	50,32
$\langle X \cdot Y \rangle$					6763,61		12689,86		4134,85		3476,11	
$DX = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$ $DY = \langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2$					31613	36,13	167048	36,06	98935	24,20	74128	4,89
$R = \frac{\langle X \cdot Y \rangle - \langle X \rangle \cdot \langle Y \rangle}{\sqrt{DX \cdot DY}}$					-0,5245		-0,5634		-0,5700		-0,6623	
$Z = 0,5 \cdot \ln \left(\frac{1+R}{1-R} \right)$					-0,5825		-0,6378		-0,6475		-0,7969	
$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{n_0 - 3}}$					0,2774							
$t_r = \frac{z}{\sigma_s}$					-2,1002		-2,2997		-2,3346		-2,8734	
					$ t_r > 1,645$							

Таблица 5.4

Расчет коэффициента корреляции между стойкостью резцов и усадкой стружки при
точении титановых сплавов

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	BT1-0		OT4		BT6		VST 5553	
					ξ _L	T, мин	ξ _L	T, мин	ξ _L	T, мин	ξ _L	T, мин
1	15,70	0,1	0,5	+1	2,18	33,25	2,11	34,67	2,50	23,29	2,50	12,86
2	31,40	0,1	0,5	+1	1,14	29,97	1,90	29,59	1,96	16,00	1,96	8,52
3	15,70	0,1	1,0	+1	1,86	29,97	1,73	32,40	1,72	19,58	1,93	9,56
4	31,40	0,1	1,0	+1	1,11	27,01	1,49	27,30	1,59	14,61	1,62	7,60
5	15,70	0,38	0,5	+1	1,53	23,82	1,67	25,61	1,61	15,26	1,90	8,16
6	31,40	0,38	0,5	+1	0,99	21,46	0,92	21,45	1,32	9,94	1,49	6,56
7	15,70	0,38	1,0	+1	0,99	21,46	1,13	24,62	1,01	12,91	1,21	5,85
8	31,40	0,38	1,0	+1	0,79	19,34	0,79	19,16	0,72	9,88	0,82	5,57
9	15,70	0,1	0,5	-1	2,37	20,18	2,23	23,18	2,80	12,01	2,89	7,39
10	31,40	0,1	0,5	-1	1,58	17,81	2,04	19,09	2,17	9,10	2,20	5,84
11	15,70	0,1	1,0	-1	2,26	18,57	1,90	21,33	1,99	10,68	2,08	6,66
12	31,40	0,1	1,0	-1	1,36	16,39	1,54	17,57	1,84	8,09	1,82	5,26
13	15,70	0,38	0,5	-1	1,58	15,87	1,82	17,99	1,87	7,53	2,04	5,29
14	31,40	0,38	0,5	-1	1,07	14,01	0,97	14,82	1,45	5,71	1,61	4,18
15	15,70	0,38	1,0	-1	1,08	14,60	1,23	16,55	1,19	6,69	1,31	4,77
16	31,40	0,38	1,0	-1	0,90	12,89	0,86	13,63	0,85	5,07	0,93	3,77
$\langle X \rangle, \langle Y \rangle$					1,42	21,04	1,52	22,44	1,66	11,65	1,77	6,74
$\langle X^2 \rangle, \langle Y^2 \rangle$					2,27	478,71	2,53	539,39	3,07	159,85	3,41	50,32
$\langle X \cdot Y \rangle$					30,96		35,56		20,53		12,59	
$DX = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2$ $DY = \langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2$					0,24	36,13	0,21	36,06	0,31	24,20	0,28	4,89
$R = \frac{\langle X \cdot Y \rangle - \langle X \rangle \cdot \langle Y \rangle}{\sqrt{DX \cdot DY}}$					0,5353		0,5196		0,5316		0,5676	
$Z = 0,5 \cdot \ln \left(\frac{1 + R}{1 - R} \right)$					0,5975		0,5758		0,5924		0,6440	
$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{n_0 - 3}}$					0,2774							
$t_r = \frac{z}{\sigma_s}$					2,1544		2,0759		2,1360		2,3219	
					$ t_r > 1,645$							

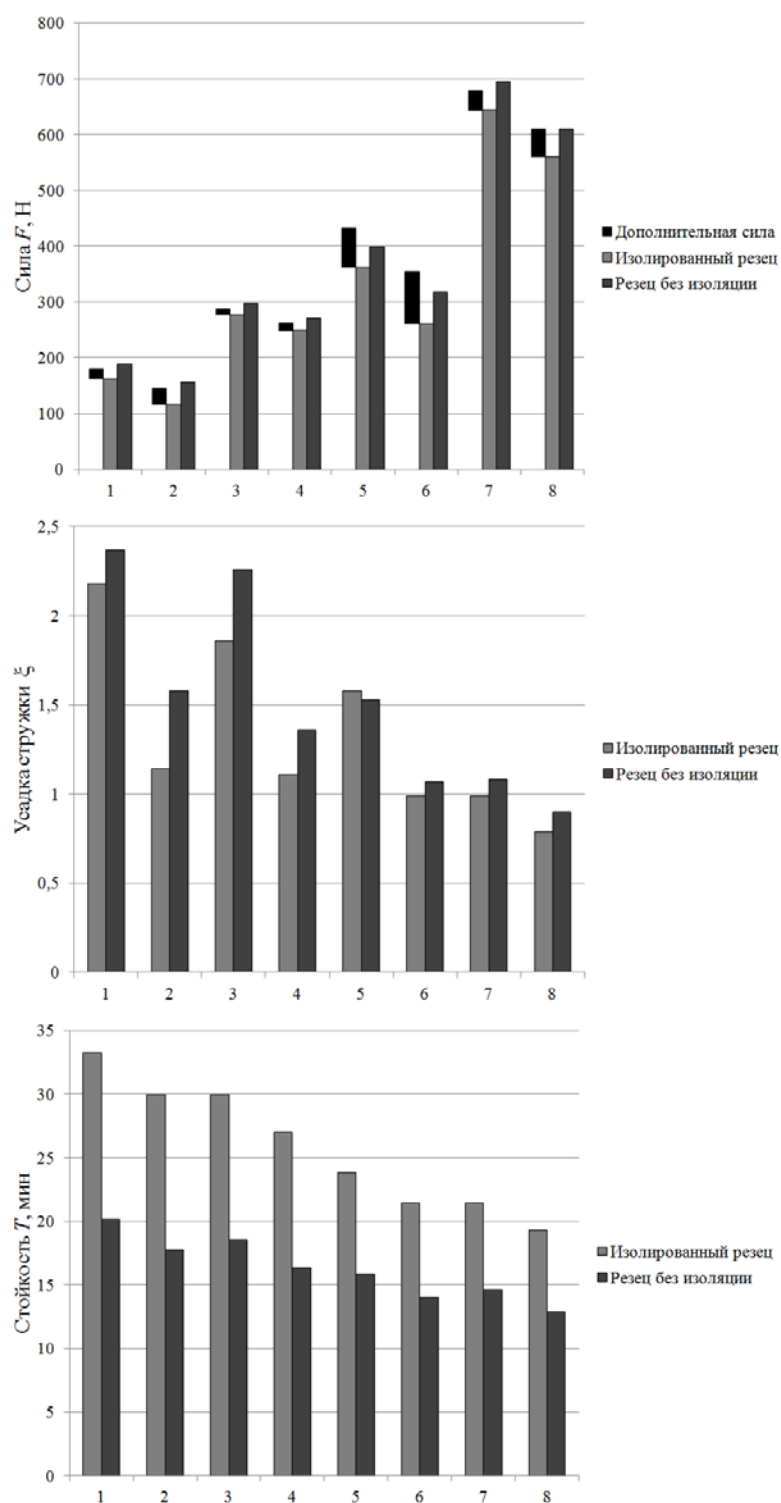


Рисунок 5.4. Изменение силы резания, усадки стружки, стойкости резцов при точении титанового сплава ВТ1-0 на следующих режимах резания:

1. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 2. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
3. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 4. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм;
5. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 6. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
7. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 8. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм

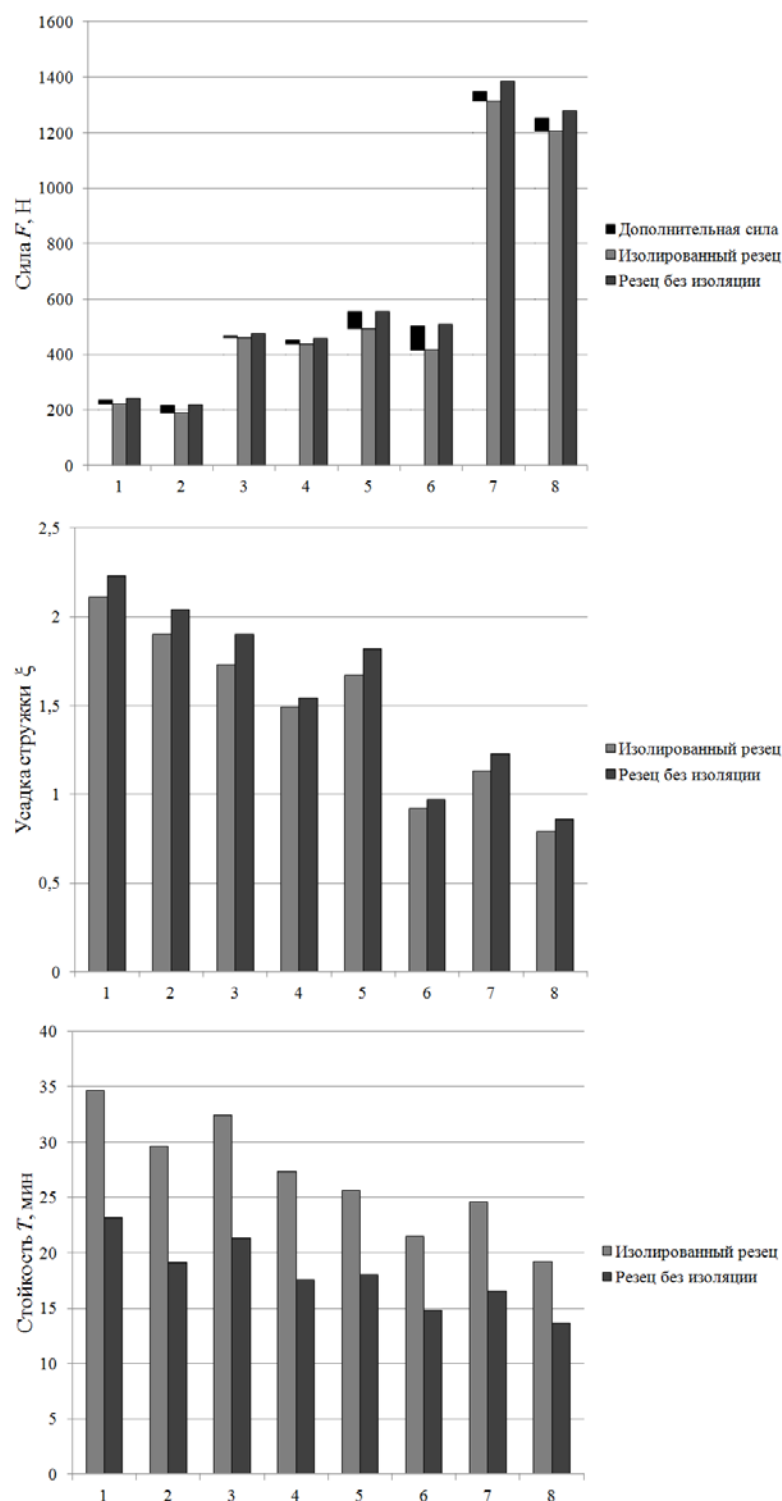


Рисунок 5.5. Изменение силы резания, усадки стружки, стойкости резцов при точении титанового сплава ОТ4 на следующих режимах резания:

1. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 2. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
3. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 4. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм;
5. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 6. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
7. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 8. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм

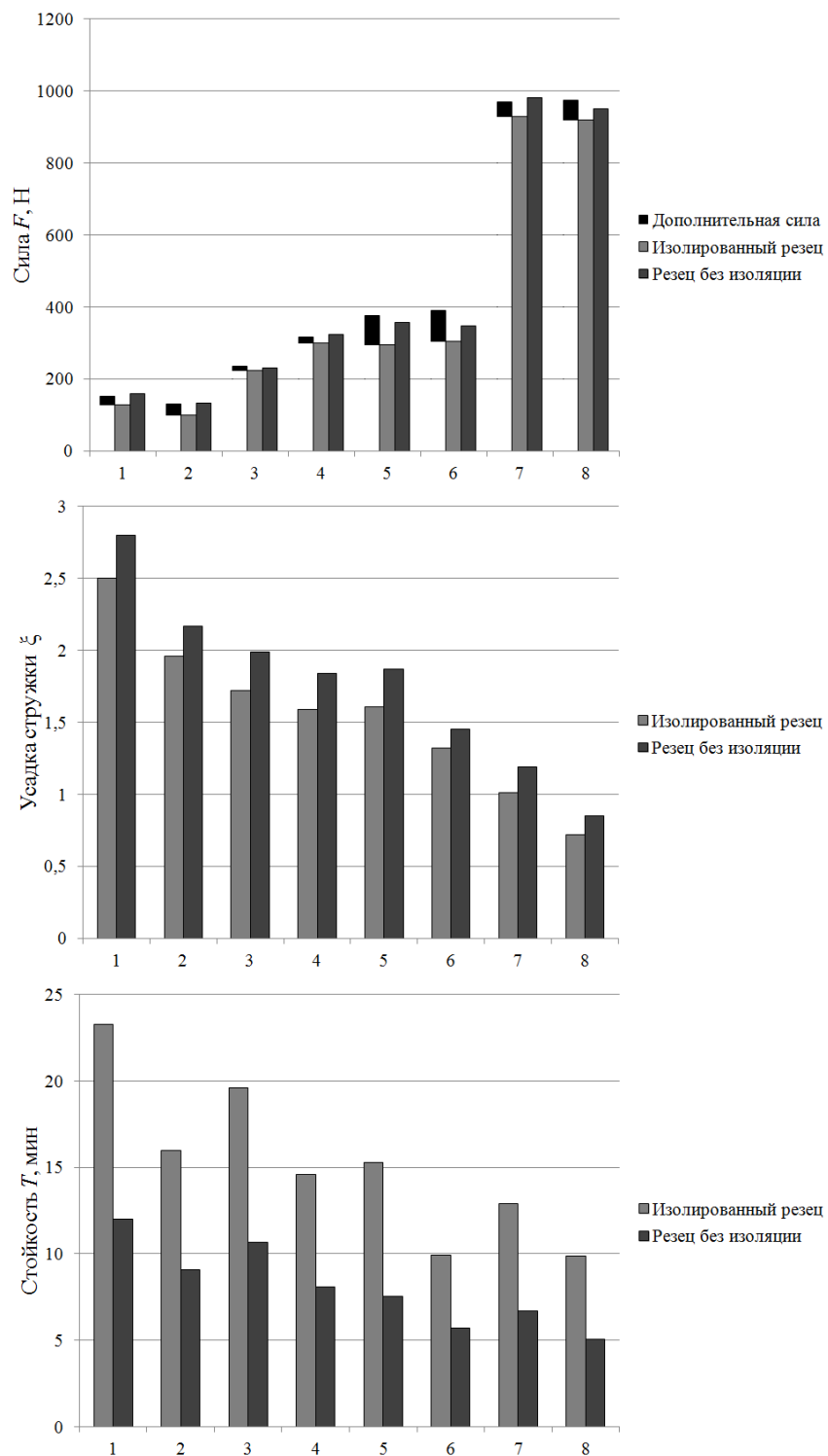


Рисунок 5.6. Изменение силы резания, усадки стружки, стойкости резцов при точении титанового сплава ВТ6 на следующих режимах резания:

1. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 2. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
3. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 4. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм;
5. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 6. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
7. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 8. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм

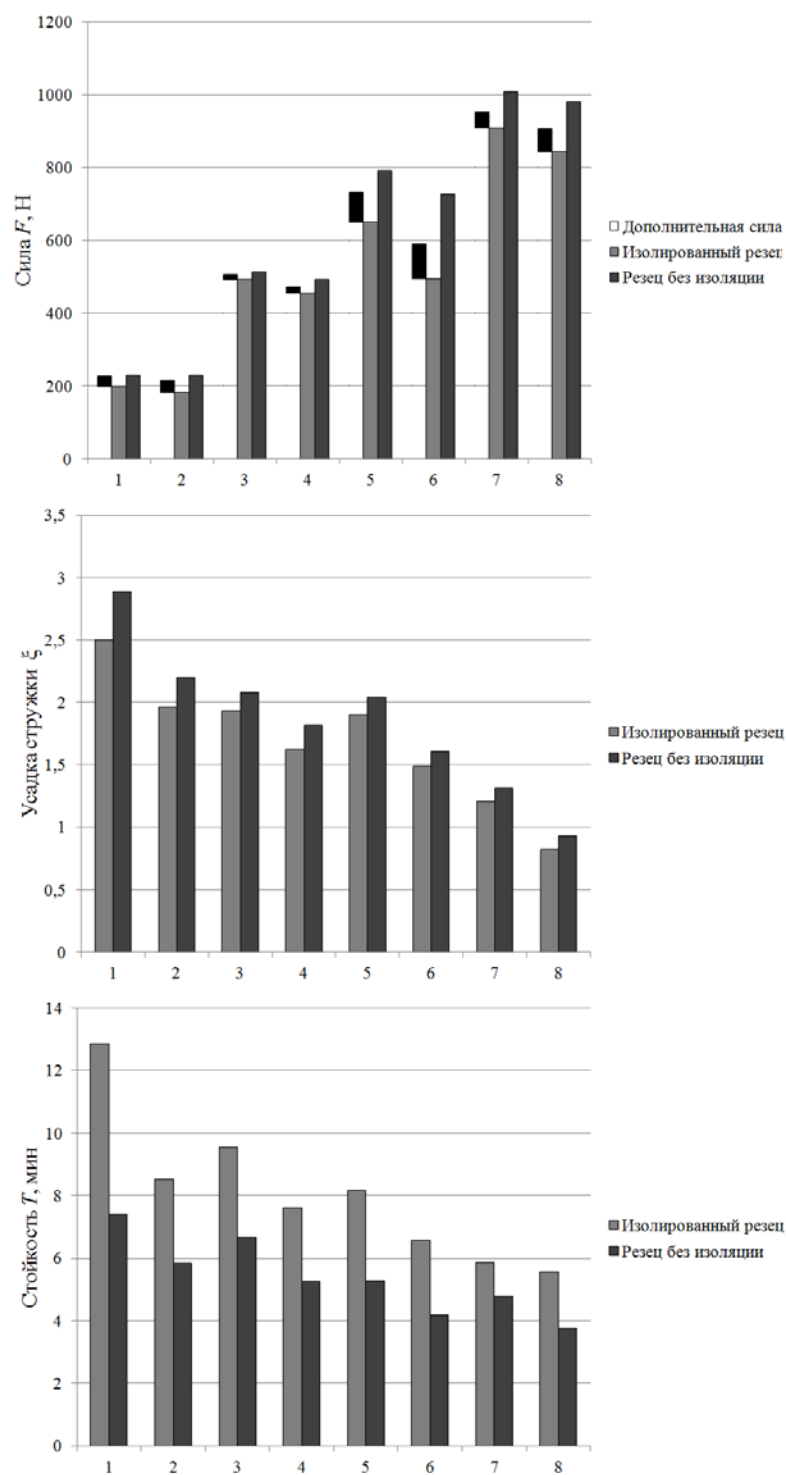


Рисунок 5.7. Изменение силы резания, усадки стружки, стойкости резцов при точении титанового сплава VST 5553 на следующих режимах резания:

1. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 2. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
3. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 4. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,10$ мм/об, $t = 1,0$ мм;
5. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм; 6. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
7. $V = 15,70$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм; 8. $V = 31,40$ м/мин, $s = 0,38$ мм/об, $t = 1,0$ мм

Из полученных результатов видно, что существует обратная корреляционная связь между величиной силы резания и стойкостью токарных резцов. Также существует обратная корреляционная связь между силой резания и усадкой стружки, и прямая корреляционная связь между усадкой стружки и стойкостью токарных резцов. При этом необходимо отметить, что существует корреляционная связь между изменением силы резания под действием электрической изоляции и величиной расчетной дополнительной силы, вызванной действием электрического тока в цепи «станок – инструмент – изделие – станок».

Расчет коэффициента множественной корреляции, показывающего влияние силы электронного увлечения и силы резания на стойкость токарных резцов, а также частных коэффициентов корреляции проводили по формулам

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{yx_1x_2} = \sqrt{\frac{r_{yx_1}^2 + r_{yx_2}^2 - 2r_{yx_1} r_{yx_2} r_{x_1x_2}}{1 - r_{x_1x_2}^2}}, \\ r_{yx_1(x_2)} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx_2} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{(1 - r_{x_1x_2}^2)(1 - r_{yx_2}^2)}}, \\ r_{yx_2(x_1)} = \frac{r_{yx_2} - r_{yx_1} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{(1 - r_{x_1x_2}^2)(1 - r_{yx_1}^2)}}. \end{array} \right. \quad (5.8)$$

Таблица 5.5

Расчет коэффициентов множественной корреляции

	$R_{yx_1x_2}$	$r_{yx_1(x_2)}$	$r_{yx_2(x_1)}$	F	F_T
BT1-0	0,6040	-0,3312	0,3518	3,7329	2,76
OT4	0,5870	-0,3196	0,1994	3,4171	
BT6	0,5793	-0,2719	0,1261	3,2838	
VST5553	0,6663	-0,4239	0,0976	5,1904	

Поскольку выполнены условия

$$|R_{yx_1x_2}| > |r_{yx_1(x_2)}|, \quad (5.9)$$

$$|R_{yx_1x_2}| > |r_{yx_2(x_1)}|, \quad (5.10)$$

коэффициент множественной корреляции вычислен верно.

Значимость коэффициентов множественной корреляции проверяется по критерию Фишера

$$F = \frac{n_0 - 3}{2} \cdot \frac{R_{yx_1x_2}^2}{1 - R_{yx_1x_2}^2}, \quad (5.11)$$

Из полученных результатов следует, что доказано существование сильной множественной корреляционной связи между силой резания, силой электронного увлечения и стойкостью токарных резцов.

По результатам регрессионного анализа были получены математические зависимости стойкости токарных резцов при обработке титановых сплавов от параметров режима резания и электрической изоляции. Статистические расчеты моделей приведены в Таблице 5.6.

Таблица 5.6

Статистические расчеты моделей $T(V,s,t)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
					BT1-0	OT4	BT6	VST 5553
1	15,70	0,1	0,5	-	1,5379	0,3160	0,7498	0,4431
2	31,40	0,1	0,5	-	1,2536	0,5481	0,7647	0,7357
3	15,70	0,1	1,0	-	0,1234	0,8666	0,0638	1,9267
4	31,40	0,1	1,0	-	0,0175	0,9657	2,4924	0,1148
5	15,70	0,38	0,5	-	0,2991	0,7984	2,1746	0,0579
6	31,40	0,38	0,5	-	0,8923	0,4181	1,9015	1,4951
7	15,70	0,38	1,0	-	1,4392	0,5205	2,5313	0,8676
8	31,40	0,38	1,0	-	1,6099	0,7294	0,1990	0,1041
9	15,70	0,1	0,5	+	0,2077	0,4124	0,2024	0,4029
10	31,40	0,1	0,5	+	0,5235	0,3152	0,1378	0,0463
11	15,70	0,1	1,0	+	0,0345	0,0751	1,7478	0,6789
12	31,40	0,1	1,0	+	0,4207	0,8815	1,5933	0,1185
13	15,70	0,38	0,5	+	0,2656	0,8045	0,1665	0,0464
14	31,40	0,38	0,5	+	0,0189	0,0658	0,1148	0,3586
15	15,70	0,38	1,0	+	0,8754	0,2160	0,3841	2,3913
16	31,40	0,38	1,0	+	0,6097	0,0082	0,2847	0,4331
Максимальная дисперсия $S_{i(max)}^2$					1,6100	0,9660	2,5310	2,3910
Сумма дисперсий $\sum_{i=1}^N S_i^2$					10,1290	7,9420	15,5090	10,2210

Таблица 5.6 (окончание)

Статистические расчеты моделей $T(V,s,t)$

№	V, м/мин	s, мм/об	t, мм	Изоляция	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2			
					BT1-0	OT4	BT6	VST5553
$G = \frac{S_{i(max)}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$ Критерий Кохрена					0,1589	0,1216	0,1632	0,2339
G_T					0,2419			
Коэффициенты при факторах $b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} \bar{y}_i}{N}$				b1	-0,1651	-0,2766	-0,4461	-0,3337
				b2	-0,2150	-0,2123	-0,3347	-0,2672
				b3	-0,1351	-0,1143	-0,1641	-0,2385
				b4	0,1966	0,1716	0,2719	0,1704
Свободный коэффициент $b_0 = \bar{y} - \sum_{j=1}^k b_j X_j$					18,0621	24,4628	17,0063	8,8324
Дисперсия воспроизводимости $S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$					0,6331	0,4963	0,9693	0,6388
Доверительный интервал для коэффициентов регрессии Δ					0,0356	0,0315	0,0440	0,0357
Вычисление дисперсии адекватности $S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - (k + 1)}$					1,0191	1,0124	1,0303	1,1062
$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$ Критерий Фишера					1,6099	2,0397	1,0629	1,7316
F_T					2,76			

Таким образом, получены следующие математические зависимости стойкости токарных резцов, оснащенных твердосплавной неперетачиваемой пластиной, при обработке титановых сплавов

$$\text{BT1-0} \quad T = 18,06 \frac{k^{0,20}}{V^{0,17} s^{0,22} t^{0,14}}, \quad (5.12)$$

$$\text{OT4} \quad T = 24,46 \frac{k^{0,17}}{V^{0,28} s^{0,21} t^{0,11}}, \quad (5.13)$$

BT6

$$T = 17,01 \frac{k^{0,27}}{V^{0,45} s^{0,33} t^{0,16}}, \quad (5.14)$$

VST 5553

$$T = 8,83 \frac{k^{0,17}}{V^{0,33} s^{0,27} t^{0,24}}, \quad (5.15)$$

где k – коэффициент, показывающий влияние электрической изоляции на силу резания, равный 10 при работе электрически изолированным инструментом и 1 – при точении без использования электрической изоляции резца. Полученные математические модели могут быть использованы для оценки периода стойкости инструмента при точении титановых сплавов представленных марок в указанном диапазоне варьирования параметров режима резания.

Представленные математические модели (5.12) – (5.15) проиллюстрированы на Рисунках 5.8 – 5.10.

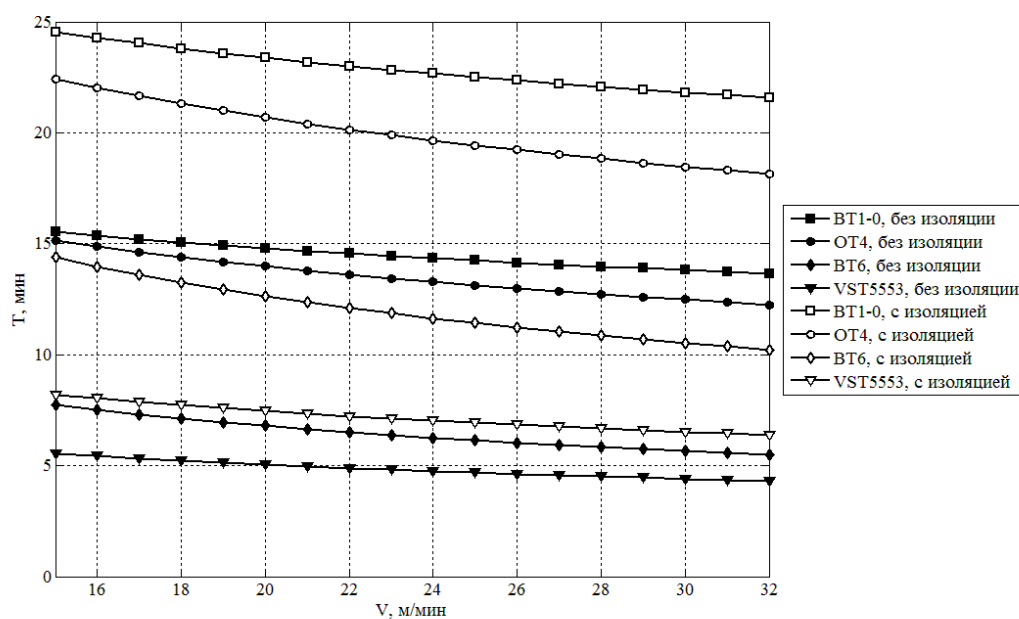


Рисунок 5.8. Влияние скорости резания V на стойкость: $s = 0,38$ мм/об; $t = 0,5$ мм.

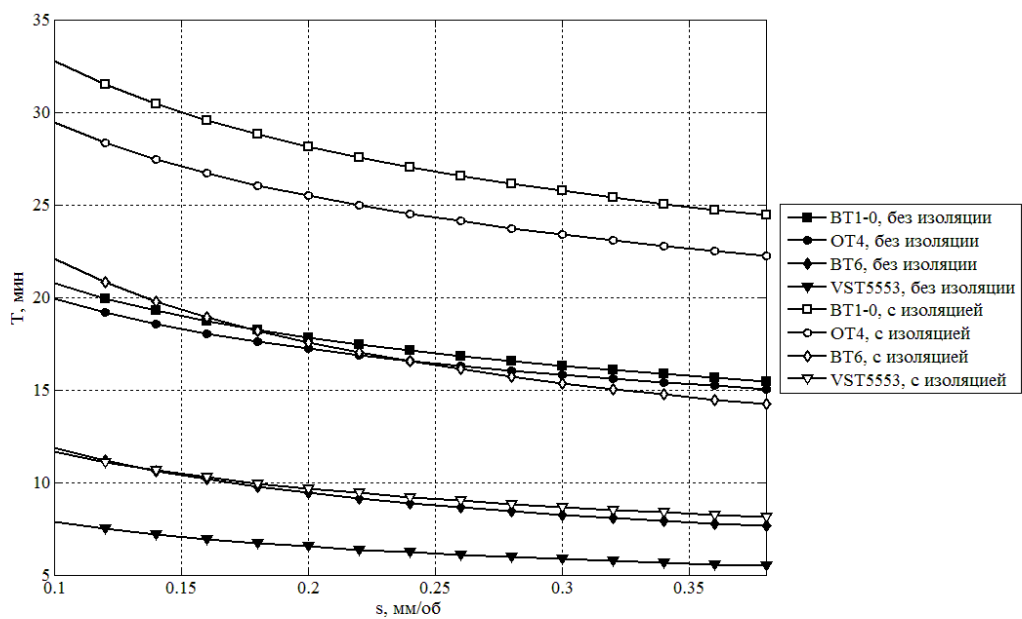


Рисунок 5.9. Влияние подачи s на стойкость: $V = 15,40$ м/мин; $t = 0,5$ мм.

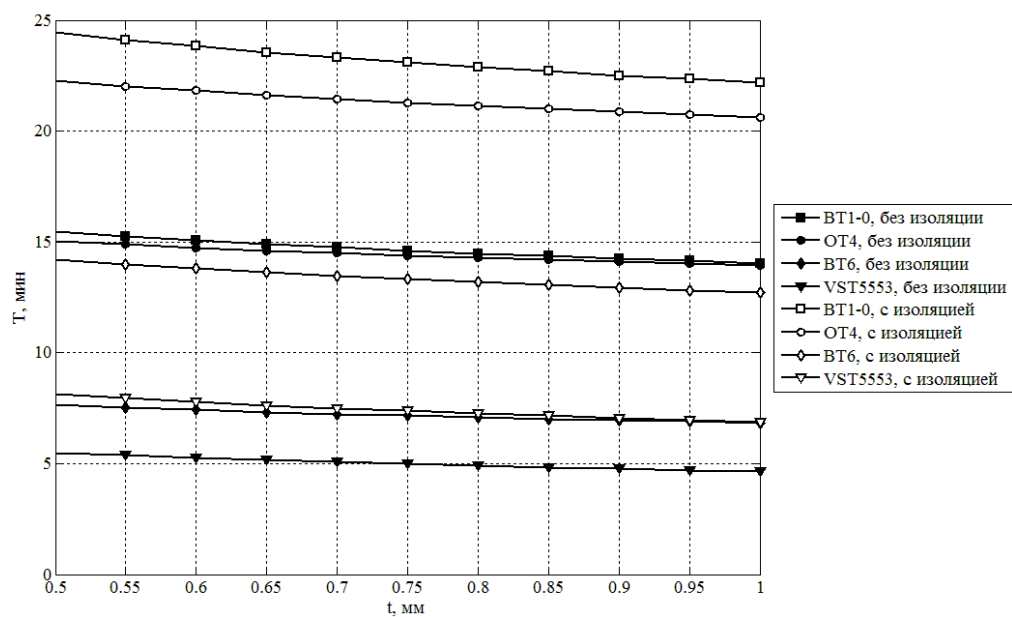


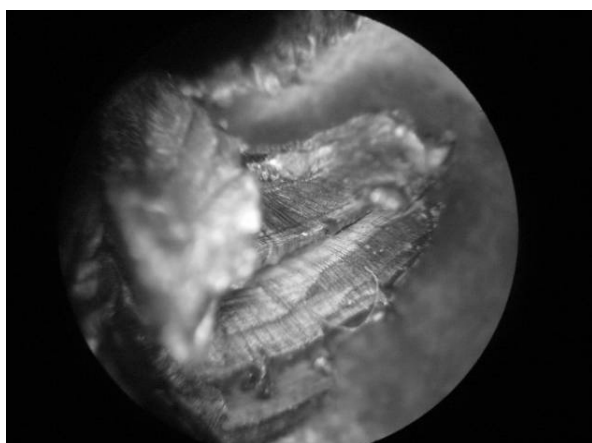
Рисунок 5.10. Влияние глубины резания t на стойкость: $V = 15,40$ м/мин; $s = 0,38$ мм/об

Исследовали вид износа режущих пластин с использованием микроскопа МЕТАМ РВ-21 при увеличении в 80 раз. При обработке сплава ВТ1-0 в обычных условиях характерным износом является адгезия обрабатываемого сплава на

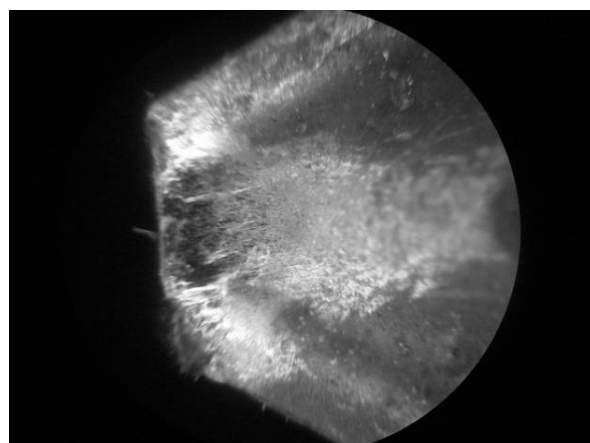
переднюю поверхность резца. При работе электрически изолированным резцом, адгезия существенно уменьшается, и наблюдается радиальный износ режущей пластины.

При обработке сплава ОТ4 в обоих случаях наблюдается радиальный износ режущей пластины и адгезия обрабатываемого материала на переднюю поверхность резца. Однако у резцов, работавших в изолированном состоянии площадь разрушения передней поверхности ниже, чем у резцов, работавших в обычных условиях.

Основным режимом изнашивания резцов при обработке сплава ВТ6 оказалось хрупкое разрушение передней поверхности (о чем свидетельствуют сколы и выкрашивание), как показано на Рисунке 5.13. На полученных фотографиях заметны следы адгезии элементов стружки и обрабатываемого материала на передней поверхности резца. Износ инструмента, работавшего в условиях электрической изоляции существенно меньше износа инструмента, работавшего в обычных условиях.

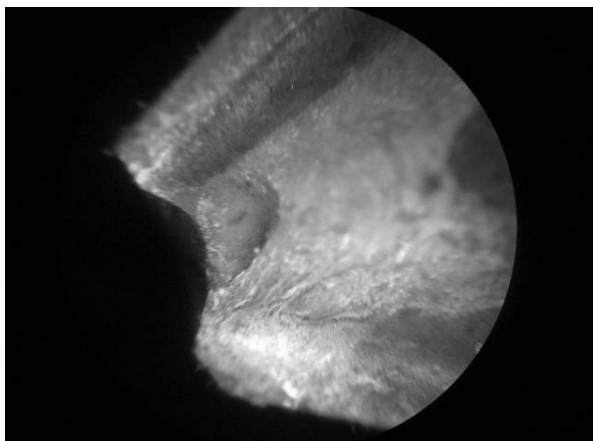


а)

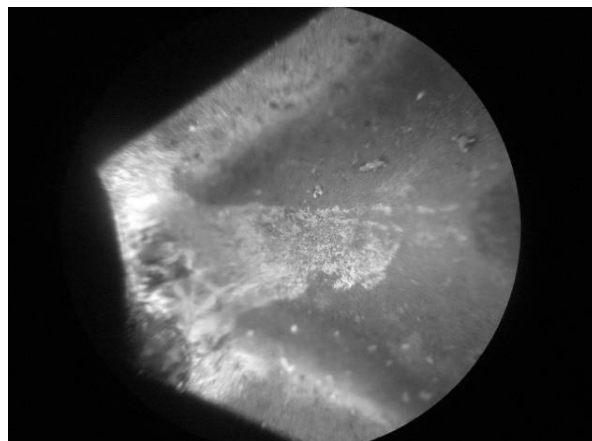


б)

Рисунок 5.11. Износ по передней поверхности режущей пластинки при обработке сплава ВТ1-0: а) без электрической изоляции; б) в условиях электрической изоляции

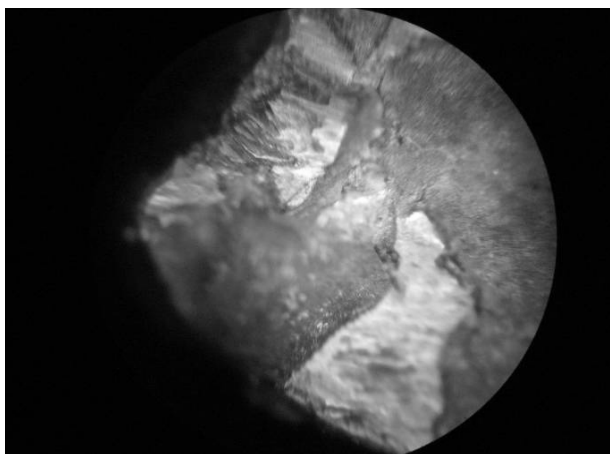


а)

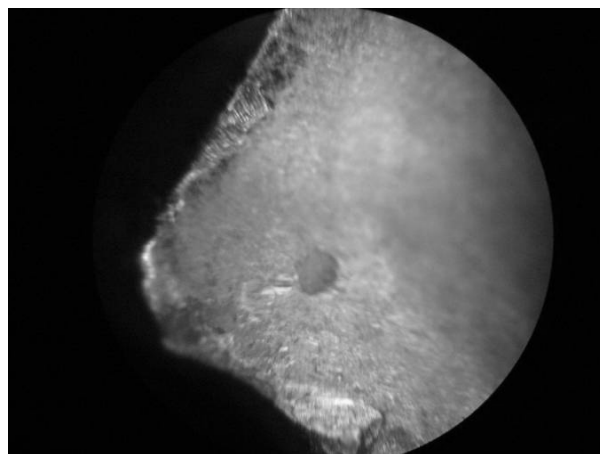


б)

Рисунок 5.12. Износ по передней поверхности режущей пластинки при обработке сплава ОТ4: а) без электрической изоляции; б) в условиях электрической изоляции



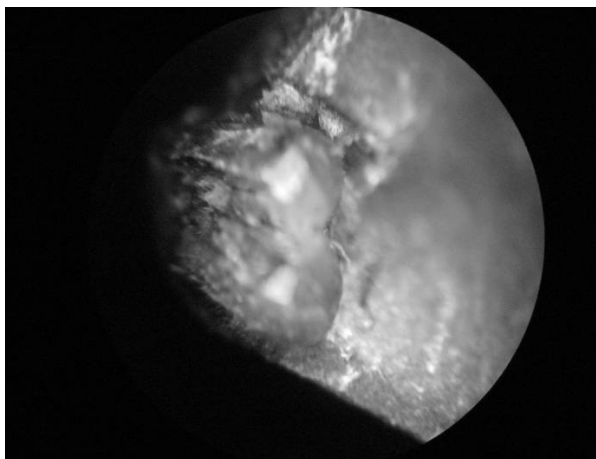
а)



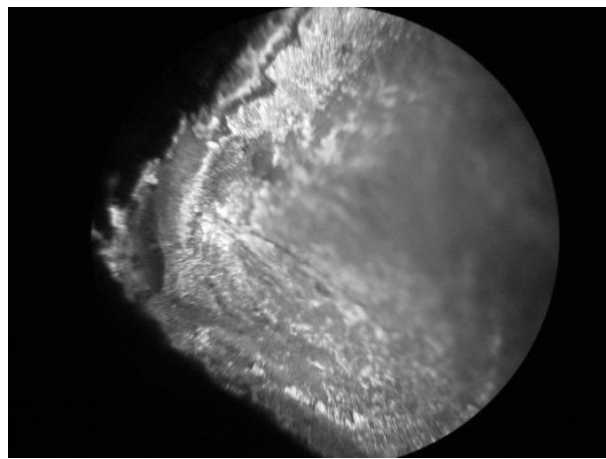
б)

Рисунок 5.13. Износ по передней поверхности режущей пластинки при обработке сплава ВТ6: а) без электрической изоляции; б) в условиях электрической изоляции

Интенсивность налипания стружки на поверхность режущей пластинки при обработке сплава VST5553 существенно выше, чем при обработке сплава ВТ6 вследствие большей силы резания. В то же время, электрическая изоляция приводит к уменьшению налипания, но не его полному исчезновению, что показано на Рисунке 5.14.



а)



б)

Рисунок 5.14. Износ по передней поверхности режущей пластинки при обработке сплава VST5553: а) без электрической изоляции; б) в условиях электрической изоляции

Таким образом, показана эффективность предлагаемого способа повышения стойкости при точении титановых сплавов резцами, оснащенными неперетачиваемыми режущими пластинами из твердого сплава GC 1105. Анализ приведенных фотографий износа режущих пластин показывает, что при обработке титановых сплавов качественно изменяется вид износа, при этом уменьшается интенсивность как адгезионного изнашивания, так и механического разрушения. Полученные результаты качественно совпадают с результатами, полученными в работе [59]. Отсюда следует, что, помимо уменьшения силы резания и усадки стружки при точении титановых сплавов, электрическая изоляция приводит к уменьшению адгезии, таким образом, подтверждается, что положительный эффект от электрической изоляции режущего инструмента является следствием комплекса явлений, включающих в себя уменьшение адгезионного, диффузионного и окислительного износа, исследованных в работах [11, 60, 64, 65, 66, 73, 74].

5.3. Исследование стойкости электрически изолированных спиральных сверл при обработке титановых сплавов

Основные результаты эксперимента, а также условия проведения испытаний суммированы в Таблицах 5.7 – 5.9. Как видно из результатов, электрическая изоляция спиральных сверл приводит к повышению стойкости в $1,66 \div 2,76$ раз в зависимости от условий проведения испытания.

Таблица 5.7

Результаты исследования стойкости спиральных сверл при обработке сплава ВТ1-0

№	Изоляция	d, мм	n, об/мин	V, м/мин	T ₁ , мин	T ₂ , мин	T ₃ , мин	T _{ср} , мин	T _{из} /T
1	+	2,5	180	1,413	9,25	9,71	10,17	9,71	2,16
2	–	2,5			4,0	5,0	4,50	4,50	
3	+	2,5	500	3,925	6,00	6,17	6,09	6,09	2,36
4	–	2,5			2,83	2,25	2,67	2,58	
5	+	2,5	1000	7,850	6,45	5,25	6,20	5,97	1,97
6	–	2,5			3,15	2,95	3,00	3,03	
7	+	3,7	125	1,413	18,65	19,15	18,92	18,91	2,39
8	–	3,7			8,05	7,85	7,80	7,90	
9	+	3,7	355	3,925	12,10	12,15	12,25	12,17	2,09
10	–	3,7			5,65	6,00	5,85	5,83	
11	+	3,7	710	7,850	13,15	13,05	12,95	13,05	1,79
12	–	3,7			7,25	7,35	7,25	7,28	
13	+	5,0	90	1,413	40,50	38,50	39,50	39,50	2,41
14	–	5,0			16,50	16,42	16,34	16,42	
15	+	5,0	250	3,925	21,42	20,34	22,50	21,42	2,76
16	–	5,0			7,75	8,00	7,50	7,75	
17	+	5,0	500	7,850	24,34	23,25	23,75	23,78	2,54
18	–	5,0			9,75	9,15	9,15	9,35	

Таблица 5.8

Результаты исследования стойкости спиральных сверл при обработке сплава ОТ4

№	Изоляция	d, мм	n, об/мин	V, м/мин	T ₁ , мин	T ₂ , мин	T ₃ , мин	T _{ср} , мин	T _{из} /T
1	+	2,5	180	1,413	11,25	11,38	11,50	11,38	1,77
2	–	2,5			6,50	6,42	6,34	6,42	
3	+	2,5	500	3,925	5,75	5,34	5,55	5,55	1,66
4	–	2,5			3,50	3,17	3,34	3,34	
5	+	2,5	1000	7,850	6,15	6,25	6,00	6,13	1,54
6	–	2,5			4,05	3,95	3,95	3,98	
7	+	3,7	125	1,413	16,05	16,10	16,12	16,09	1,83
8	–	3,7			8,60	9,05	8,73	8,79	

Таблица 5.8 (окончание)

Результаты исследования стойкости спиральных сверл при обработке сплава ОТ4

№	Изоляция	d , мм	n , об/мин	V , м/мин	T_1 , мин	T_2 , мин	T_3 , мин	$T_{ср}$, мин	$T_{из}/T$
9	+	3,7	355	3,925	10,15	10,05	10,18	10,13	2,37
10	–	3,7			4,45	4,20	4,18	4,28	
11	+	3,7	710	7,850	12,32	12,51	12,05	12,29	2,31
12	–	3,7			5,25	5,40	5,32	5,32	
13	+	5,0	90	1,413	29,92	29,34	30,50	29,92	2,28
14	–	5,0			13,13	13,00	13,25	13,13	
15	+	5,0	250	3,925	14,00	15,17	14,59	14,59	1,99
16	–	5,0			7,17	7,34	7,50	7,34	
17	+	5,0	500	7,850	15,17	15,25	15,29	15,24	1,88
18	–	5,0			8,10	8,15	8,05	8,10	

Таблица 5.9

Результаты исследования стойкости спиральных сверл при обработке сплава ВТ6

№	Изоляция	d , мм	n , об/мин	V , м/мин	T_1 , мин	T_2 , мин	T_3 , мин	$T_{ср}$, мин	$T_{из}/T$
1	+	2,5	180	1,413	3,96	3,75	4,17	3,96	2,02
2	–	2,5			1,96	2,17	1,75	1,96	
3	+	2,5	500	3,925	2,00	2,09	2,17	2,09	2,27
4	–	2,5			1,00	0,83	0,92	0,92	
5	+	2,5	1000	7,850	2,15	2,12	2,21	2,16	1,93
6	–	2,5			1,25	1,00	1,10	1,12	
7	+	3,7	125	1,413	10,15	9,85	9,92	9,97	2,38
8	–	3,7			4,15	4,25	4,18	4,19	
9	+	3,7	355	3,925	4,18	4,29	4,34	4,27	1,62
10	–	3,7			2,56	2,74	2,62	2,64	
11	+	3,7	710	7,850	4,90	4,85	4,90	4,88	1,70
12	–	3,7			2,85	2,90	2,85	2,87	
13	+	5,0	90	1,413	18,17	18,34	18,00	18,17	1,77
14	–	5,0			9,25	9,71	10,17	9,71	
15	+	5,0	250	3,925	6,17	6,34	6,50	6,34	2,00
16	–	5,0			3,38	3,50	3,25	3,38	
17	+	5,0	500	7,850	6,50	6,65	6,50	6,55	1,74
18	–	5,0			3,75	3,85	3,70	3,77	

Здесь: d – диаметр сверла, мм.; n – частота вращения шпинделя, об/мин.; V – скорость резания, м/мин.; T_1, T_2, T_3 – результаты измерения стойкости сверл, мин.; $T_{ср}$ – средняя стойкость сверл, мин.; $T_{из}/T$ – отношение стойкости изолированного сверла к стойкости сверла в обычных условиях.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных, полученных при сверлении титановых сплавов, приведены в Таблице 5.10. В результате регрессионного анализа получены следующие математические зависимости стойкости сверл от параметров режима резания

$$\begin{array}{ll} \text{без изоляции} & T = 0,94 \cdot \frac{D^{1,70}}{V^{0,22}} \quad (5.16) \\ \text{BT1-0} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{с изоляцией} & T = 1,68 \cdot \frac{D^{1,93}}{V^{0,28}} \quad (5.17) \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{без изоляции} & T = 2,41 \cdot \frac{D^{1,04}}{V^{0,31}} \quad (5.18) \\ \text{OT4} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{с изоляцией} & T = 3,15 \cdot \frac{D^{1,37}}{V^{0,33}} \quad (5.19) \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{без изоляции} & T = 0,35 \cdot \frac{D^{1,99}}{V^{0,39}} \quad (5.20) \\ \text{BT6} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{с изоляцией} & T = 0,94 \cdot \frac{D^{1,81}}{V^{0,48}} \quad (5.21) \end{array}$$

где T – стойкость сверл, мин., D – диаметр сверла, мм., V – скорость резания, м/мин.

Из полученных регрессионных моделей видно, что электрическая изоляция способствует повышению стойкости режущего инструмента при сверлении сплавов BT1-0, OT4 и BT6 в 1,60, 1,30 и 3,08 раз соответственно. Отсюда следует, что гипотеза С.Н. Постникова [60] была верной, поскольку термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5» действительно была выше для термопар со сплавом BT6, и ниже для термопар со сплавом OT4. Таким образом, показано, что существует возможность прогнозирования эффективности метода электрической изоляции режущего инструмента при резании титановых сплавов на основе изучения термоЭДС при нагреве термопар.

Повышению стойкости режущего инструмента способствует увеличение диаметра сверла, что связано с более эффективным отводом тепла из зоны резания при увеличении диаметра сверла, а также с ростом механической прочности и жесткости режущего инструмента. Напротив, рост скорости приводит к снижению стойкости режущего инструмента, причем чем более легирован обрабатываемый титановый сплав, и чем больше в его составе β -стабилизаторов, тем ниже будет стойкость. Это связано с повышенным пределом прочности у таких материалов и, как следствие, большей энергией, которую необходимо затратить на их разрушение.

Таблица 5.10

Статистические расчеты моделей $T(V,d)$

№	Изоляция	d , мм	V , м/мин	Дисперсии исследуемого параметра S_i^2		
				BT1-0	OT4	BT6
1	+	2,5	1,413	0,2116	0,0157	0,0441
2	–	2,5	3,925	0,2500	0,0064	0,0441
3	+	2,5	7,850	0,0073	0,0421	0,0072
4	–	2,5	1,413	0,0898	0,0273	0,0073
5	+	2,5	3,925	0,4009	0,0159	0,0021
6	–	2,5	7,850	0,0109	0,0033	0,0159
7	+	3,7	1,413	0,0627	0,0013	0,0247
8	–	3,7	3,925	0,0175	0,0537	0,0026
9	+	3,7	7,850	0,0059	0,0046	0,0067
10	–	3,7	1,413	0,0309	0,0227	0,0084
11	+	3,7	3,925	0,0100	0,0534	0,0009
12	–	3,7	7,850	0,0034	0,0057	0,0008
13	+	5,0	1,413	1,0000	0,2864	0,0289
14	–	5,0	3,925	0,0064	0,0157	0,1216
15	+	5,0	7,850	1,1664	0,2923	0,0273
16	–	5,0	1,413	0,0625	0,0273	0,0157
17	+	5,0	3,925	0,2977	0,0037	0,0075
18	–	5,0	7,850	0,1200	0,0025	0,0058
Максимальная дисперсия $S_{i(max)}^2$				1,1644	0,2923	0,1216
Сумма дисперсий $\sum_{i=1}^N S_i^2$				3,7535	0,8797	0,3715
Критерий Кохрена $G = \frac{S_{i(max)}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$				0,3175	0,3322	0,3273

Таблица 5.10 (окончание)

Статистические расчеты моделей $T(V,d)$

№	Изоляция	d, мм	V, м/мин	Дисперсии исследуемого параметра		
				S_i^2		
				BT1-0	OT4	BT6
G_T				0,3346		
Коэффициенты при факторах $b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} \bar{y}_i}{N}$	С изоляцией	1,93	1,37	1,81		
	Без изоляции	1,70	1,04	1,99		
	С изоляцией	-0,28	-0,33	-0,48		
	Без изоляции	-0,22	-0,31	-0,39		
	С изоляцией	1,68	3,15	0,94		
	Без изоляции	0,94	2,41	0,35		
Дисперсия воспроизводимости $S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$				0,2085	0,0162	0,0068
Доверительный интервал для коэффициентов регрессии $\Delta = 2 \cdot t \sqrt{\frac{S_y^2}{Nn}}$				0,2410	0,0700	0,0452
Вычисление дисперсии адекватности $S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - (k + 1)}$				0,3298	0,0240	0,0127
Критерий Фишера $F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$				1,5816	1,4827	1,8676
F_T				1,99		

Результаты регрессионного анализа представлены в графическом виде на Рисунках 5.15 – 5.16. Они подтверждают, что с увеличением диаметра сверла при постоянной скорости, стойкость инструмента возрастает, а с увеличением скорости резания при постоянном диаметре сверла, стойкость снижается.

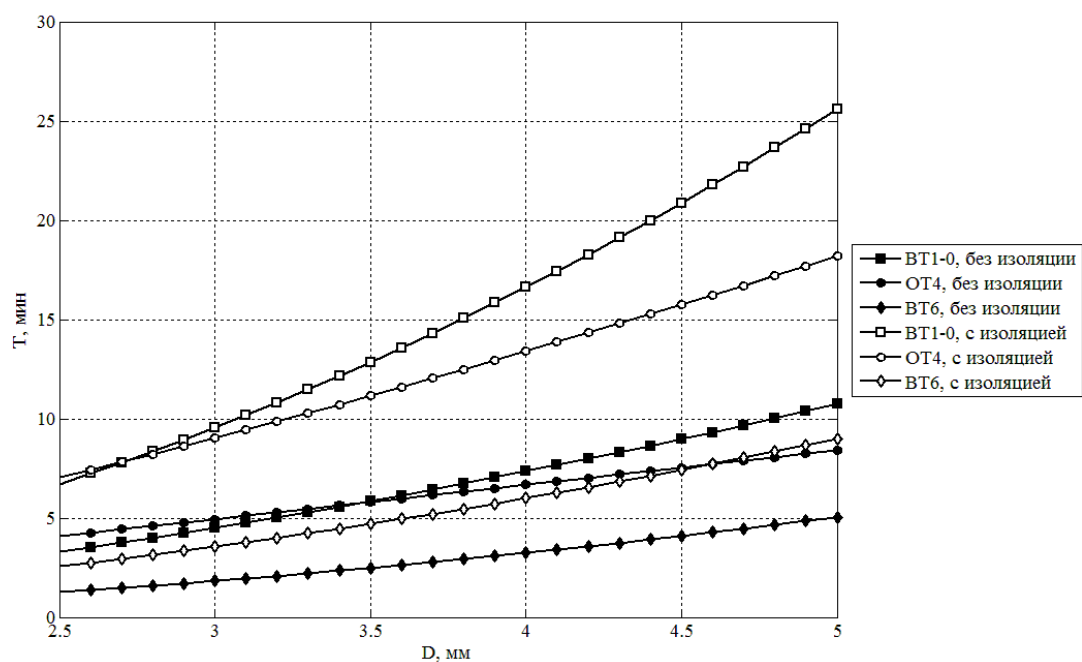


Рисунок 5.15. Зависимость стойкости от диаметра сверла: $V = 3,925$ м/мин

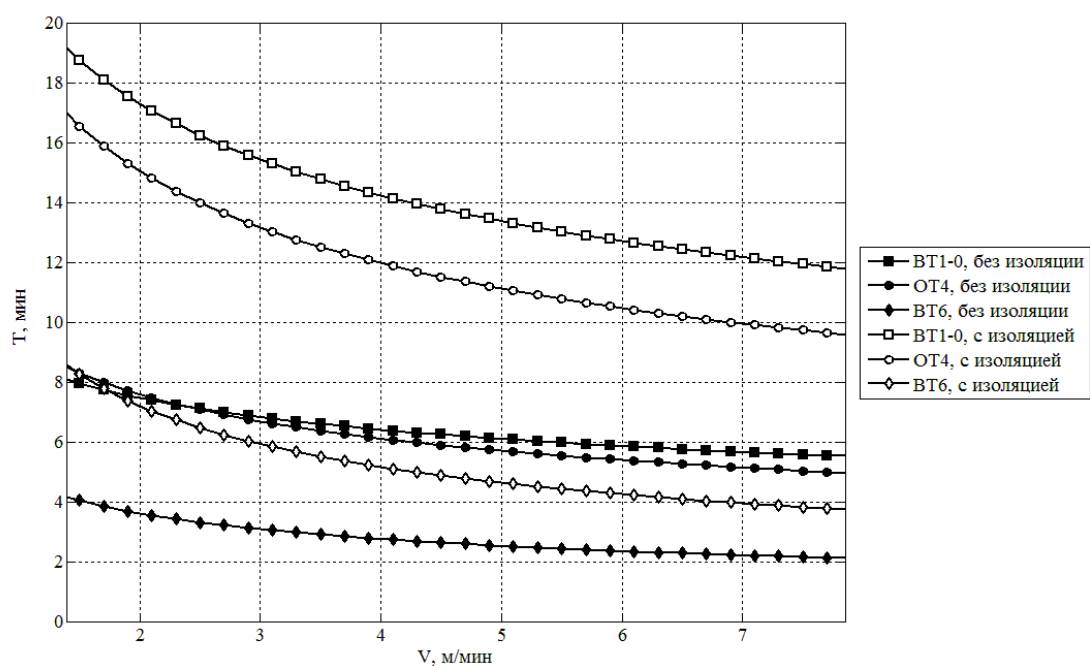


Рисунок 5.16. Зависимость стойкости от скорости резания: $d = 3,7$ мм.

Немного подробнее остановимся на износе сверл. В ходе экспериментов обнаружилось четыре вида износа спиральных свёрл. Разрушение сверла по задней поверхности характерно для сверл, работающих на скорости 3,93 м/мин

при обработке сплава ВТ6. Фотография износа сверла представлена на Рисунке 5.17. Причиной такого износа является разупрочнение материала сверла вследствие высокой температуры и силы резания.

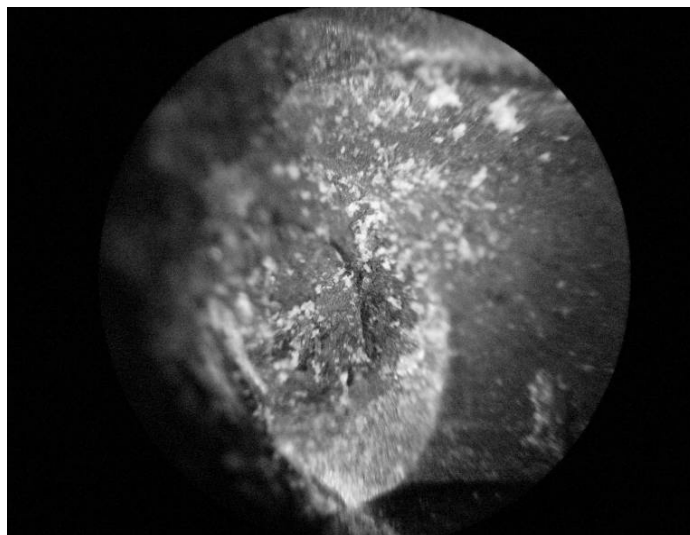
Налипание титанового сплава на сверло. Обнаруживается при обработке титановых сплавов всех марок на скорости 3,93 м/мин. Фотография износа сверла представлена на Рисунке 5.18. Причиной такого вида износа является приваривание частиц стружки титанового сплава к задней поверхности сверла, что приводит к изменению углов инструмента и невозможности дальнейшего резания.

Разрушение сверла, как по передней, так и по задней поверхности характерно для обработки всех исследованных титановых сплавов на скорости 1,41 м/мин. Фотография износа сверла представлена на Рисунке 5.19. Причиной разрушения сверла по передней поверхности является налипание и последующий отрыв частиц стружки на переднюю поверхность сверла, в то время как разрушение по задней поверхности следует связывать, во-первых, со значительными силами трения между сверлом и обработанной поверхностью, а во-вторых, с налипанием и последующим отрывом частиц стружки на заднюю поверхность сверла. Следует отметить, что износ такого вида наблюдается при обработке сплава ВТ6 также и по ленточкам, и его величина, измеренная при помощи микроскопа МПБ-3М составляет порядка $0,5 \div 1,2$ мм.

Разрушение направляющей части сверла. Этот вид выхода из строя характерен для сверл диаметром 2,5 мм. при обработке всех исследованных титановых сплавов. Причиной такого износа является налипание частиц титанового сплава на режущие кромки, что приводит к заеданию сверла в отверстии, что приводит к деформациям кручения, которые, в свою очередь, приводят к хрупкому разрушению сверла. Фотография такого износа представлена на Рисунке 5.20.



а)

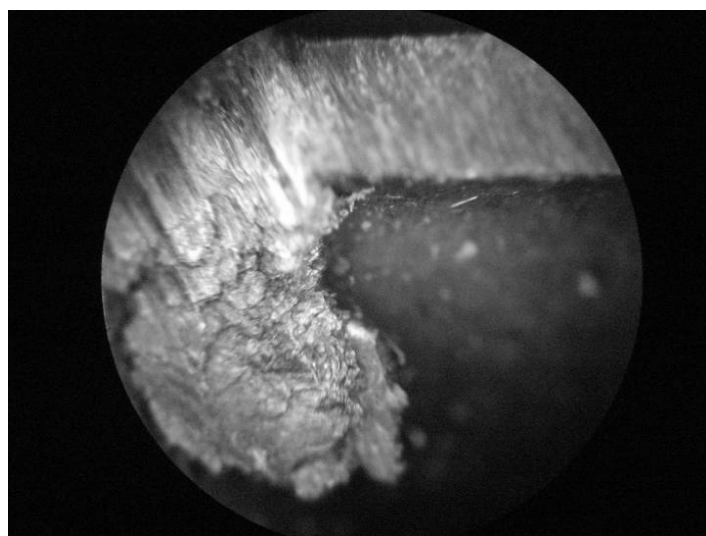


б)

Рисунок 5.17. Износ сверла диаметром 5 мм на скорости резания 3,93 м/мин при обработке сплава ВТ6: а) общий вид сверла; б) элемент износа режущего конуса при увеличении $\times 80$ на микроскопе МЕТАМ РВ-21

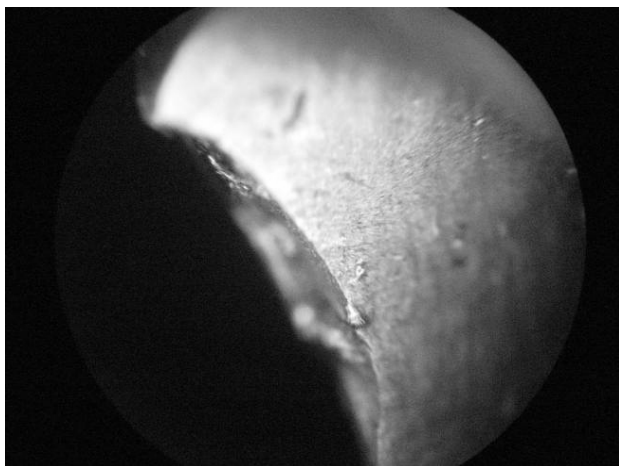


а)

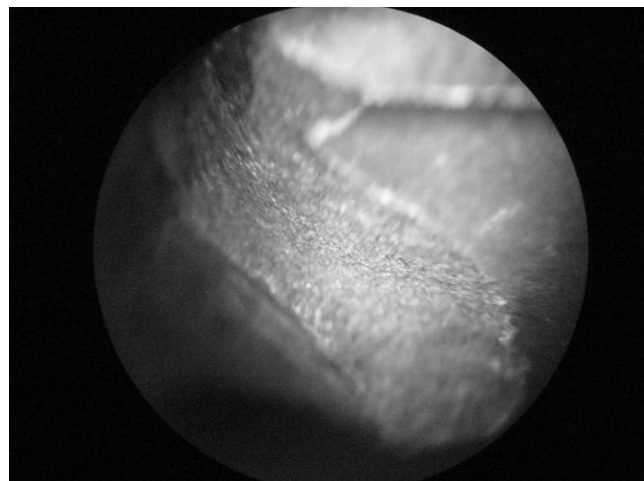


б)

Рисунок 5.18. Адгезия стружки на поверхность сверла диаметром 5 мм на скорости резания 3,93 м/мин. при обработке сплава ОТ4: а) общий вид сверла; б) адгезия стружки при увеличении $\times 80$ на микроскопе МЕТАМ РВ-21

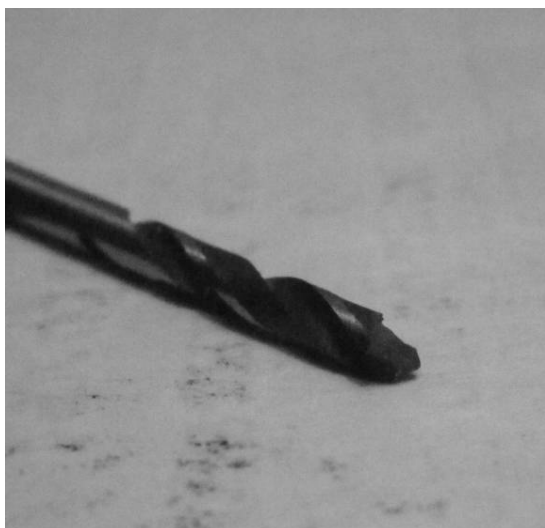


а)

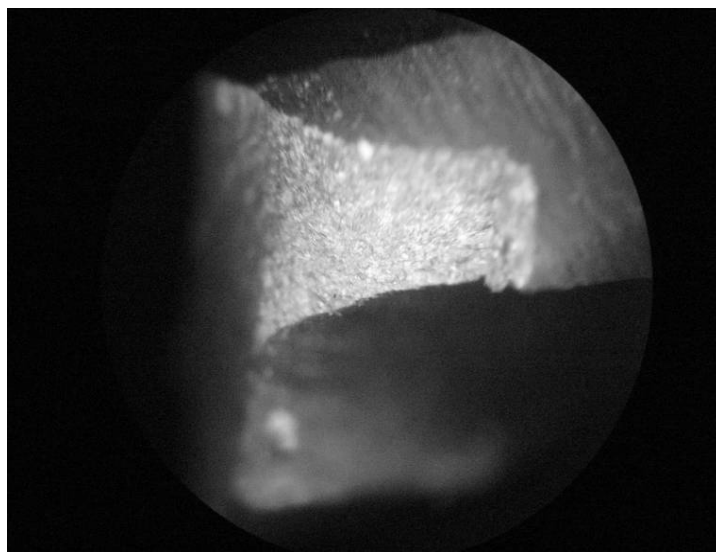


б)

Рисунок 5.19. Хрупкое разрушение сверла диаметром 5 мм на скорости 1,41 м/мин при обработке сплава ВТ6: а) износ по передней поверхности; б) износ по задней поверхности и по ленточкам



а)



б)

Рисунок 5.20. Хрупкое разрушение направляющей сверла диаметром 2,5 мм на скорости резания 3,93 м/мин при обработке сплава ВТ1-0: а) общий вид сверла; б) поверхность разрушения при увеличении $\times 80$ на микроскопе МЕТАМ РВ-21

Таким образом, в данном разделе показано, что электрическая изоляция спиральных сверл из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке титановых сплавов приводит к повышению их стойкости в $1,66 \div 2,76$ раз. Также показано,

что существует возможность прогнозирования эффективности метода электрической изоляции при обработке титановых сплавов на основе исследования термоЭДС в термопарах «титановый сплав – инструментальный материал». Кроме того проведено исследование характерного износа спиральных сверл и выявлены его основные причины.

5.4. Исследование стойкости электрически изолированных спиральных сверл при обработке титановых сплавов в промышленных условиях

Сверление производили на радиально-сверлильном станке модели 25500С1000МФ4, оснащенной стойкой с ЧПУ NC-210. Режимы резания: скорость резания 320 м/мин, минутная подача 87,5 мм/мин. Каждым сверлом выполнялось по 40 отверстий, после чего сверление прекращалось, после чего исследовали износ сверла при помощи микроскопа МПБ-3. Затем сверление возобновляли, и доводили сверло до полной потери режущих свойств в результате износа. Стойкость сверл по данным промышленных испытаний возрастала в $1,25 \div 2,15$ раз.

Полученные результаты измерения износа после сверления 40 отверстий приведены на Рисунке 5.21. Как видно из Рисунка 5.21 износ сверл в условиях электрической изоляции практически в два раза меньше износа сверл в обычных условиях. При работе в условиях электрической изоляции сверло изнашивается в основном по передней поверхности, где образуется лунка, постепенно разрастающаяся и захватывающая в итоге режущую кромку. Образование износа по передней поверхности следует связывать с налипанием частиц титанового сплава на переднюю поверхность сверла и их последующим отрывом с поверхности сверла, что приводит к образованию лунки. При работе в обычных условиях наблюдается также износ по задней поверхности. Следует отметить, что на главной режущей кромке сверл обнаруживается прижег, что свидетельствует о

высоких температурах в зоне резания и высоком коэффициенте трения в зоне контакта главной режущей кромки и обрабатываемого изделия.

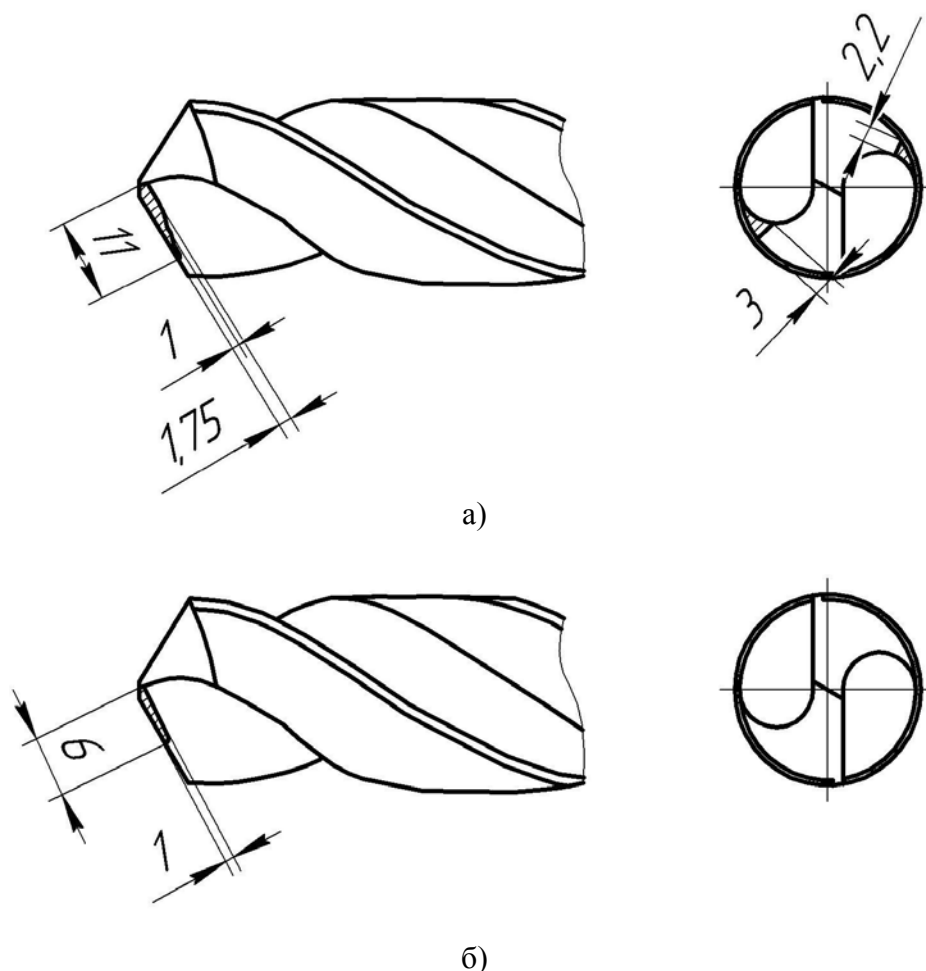
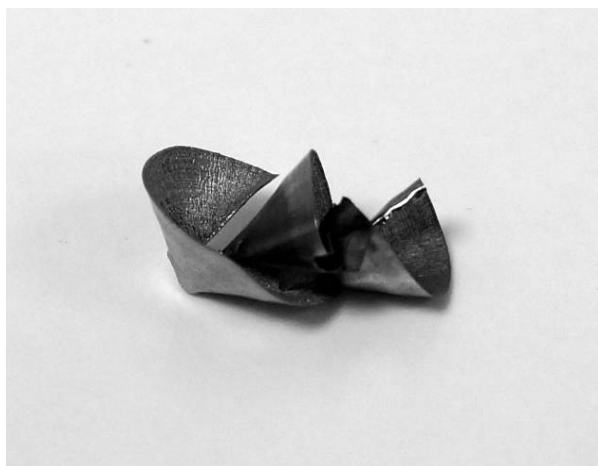


Рисунок 5.21. Площадки износа спиральных сверл:
а) в обычных условиях; б) в условиях электрической изоляции

Необходимо отдельно остановиться на форме стружки, образующейся в обычных условиях и в условиях электрической изоляции. Фотографии стружки приведены на Рисунке 5.22. В соответствии с классификацией, принятой в работе [41] в обычных условиях образуется сливная стружка, а в условиях электрической изоляции – ступенчатая стружка. Это свидетельствует о том, что в условиях электрической изоляции изменяется силовая схема в зоне резания, что приводит к изменению степени пластической деформации срезаемого слоя.



а)



б)

Рисунок 5.22. Стружка при сверлении:

а) в обычных условиях; б) в условиях электрической изоляции

В рамках производственных испытаний, исследовали химический состав стружки в лаборатории аналитических испытаний ОАО «Корпорации ВСМПО-АВИСМА» с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии. Метод атомно-эмиссионной спектроскопии заключается в испарении частиц стружки под действием высокотемпературной плазмы, возбуждении излучения атомов элементов стружки внешним источником света, разложении возбужденного излучения в спектр, регистрации спектра, идентификации и измерении интенсивности спектральных линий. Результаты испытаний приведены в Таблице 5.11. Как видно из Таблицы 5.11 электрическая изоляция практически не влияет на диффузию атомов инструментального материала в стружку. Наблюдаемое небольшое снижение содержания ванадия в стружке находится в пределах погрешности прибора. Результаты показывают, что в рассматриваемых условиях электродиффузионный износ оказывается незначительным, в то же время, изменение формы стружки явно свидетельствует об изменении силы резания и степени пластической деформации срезаемого слоя.

Таблица 5.11

Химический состав стружки ВТ1-0, полученной при сверлении инструментом из стали Р6М5 в условиях электрической изоляции и без таковой

		Химический элемент						
		<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
Масс. доля хим. элем. в стружке, %	В обычных условиях	0,028	0,007	0,013	0,0042	0,001	0,001	0,156
	В условиях электро-изоляции	0,028	0,007	0,013	0,0040	0,001	0,001	0,168

Таким образом, электрическая изоляция сверл приводит к уменьшению их износа, и использование предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов рекомендовано для повышения стойкости сверл в промышленных условиях. Показано, что при обработке электрически изолированным режущим инструментом изменяется форма стружки. Исследования химического состава стружки не выявили существенного изменения диффузии компонентов инструментального материала в стружку при электрической изоляции сверла. По результатам проведенных работ на ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» представлена справка об использовании результатов диссертационной работы в производственной практике, представленная в Приложении 1.

5.5. Расчет экономической эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента

Расчет экономической эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента выполнялся при черновом точении слитков из титанового сплава марки ВТ6 режущим инструментом, оснащенным четырехгранной неперетачиваемой твердосплавной пластиной из сплава марки ВК8 и полуставом сверлении отверстий в трубных досках, изготовленных из титанового сплава марки ВТ1-0 сверлами из быстрорежущей стали Р6М5.

Данные, необходимые для расчета экономической эффективности предлагаемого способа при точении и сверлении, и результаты расчета, представлены соответственно в Таблицах 5.12 и 5.13.

Таблица 5.12

Расчет экономической эффективности способа повышения стойкости режущего инструмента при точении слитков из титанового сплава ВТ6

	Без использования электроизоляции	С использованием электроизоляции
Исходные данные		
Стоимость станко-часа, руб.	800	
Количество деталей в год, шт.	4500	4500
Общее время на обработку детали на данной операции, мин.	105	105
Стоимость пластины, руб.	450	450
Стойкость пластины, мин.	11,97	23,62
Кромки на пластину, шт.	4	4
Пластин на инструмент, шт.	1	1
Количество смен кромок	4	4
Стоимость державки, руб.	3500	4000
Результаты расчета		
Стоимость станко-часа/деталь, руб.	1400	1400
Стоимость пластины/деталь, руб.	9,40	4,77
Снижение затрат на режущий инструмент	49,26%	
Стоимость державки/деталь, руб.	73,10	42,34
Общие затраты/деталь, руб.	1482,50	1447,10
Общие затраты в год, руб.	6671240,61	6511949,62
Снижение затрат	2,39%	

Из данных, представленных в Таблицах 5.12 и 5.13 следует, что внедрение предлагаемого способа повышения стойкости металлорежущего инструмента при обработке титановых сплавов позволяет достичь снижения затрат на инструмент в $1,59 \div 1,97$ раз, при этом снижение затрат на производство составляет $2,39 \div 7,98\%$ или, для рассматриваемых случаев точения и сверления, 159291,00 руб и 432300,00 руб соответственно.

Таблица 5.13

Расчет экономической эффективности способа повышения стойкости режущего инструмента при сверлении отверстий в трубных досках из титанового сплава BT1-0

	Без использования электроизоляции	С использованием электроизоляции
Исходные данные		
Стоимость станко-часа, руб.	800	
Количество деталей в год, шт.	200	200
Общее время на обработку детали на данной операции, мин.	143,08	143,08
Стоимость сверла, руб.	550,00	550,00
Стойкость сверла, мин.	16,80	26,88
Количество переточек, шт.	10	10
Стоимость вспомогательного инструмента, руб.	450	650
Результаты расчета		
Стоимость станко-часа/деталь, руб.	23466,67	23466,67
Стоимость сверл/деталь, руб.	5758,5	3597,00
Снижение затрат на режущий инструмент	60,09%	
Стоимость вспомогательного инструмента/деталь, руб.	2,25	3,25
Общие затраты/деталь, руб.	29225,17	27063,67
Общие затраты в год, руб.	5845034,00	5412734,00
Общее снижение затрат, %	7,98%	

К преимуществам предлагаемого способа следует отнести его дешевизну, так как при его внедрении повышаются только расходы на вспомогательный инструмент, в то время как расходы на режущий инструмент существенно снижаются. Кроме того, способ оказывается универсальным, поскольку его практическая реализация возможна почти на любых операциях обработки титановых сплавов лезвийным режущим инструментом.

5.6. Выводы к главе 5

По результатам работы, представленным в данной главе, можно сделать следующие основные выводы:

1. Исследования термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – сталь Р6М5» выявили, что наибольшая термоЭДС наблюдается у сплавов $(\alpha+\beta)$ -группы типа ВТ6 и ВТЗ-1. В соответствии с гипотезой С.Н. Постникова [60] метод электрической изоляции режущего инструмента при обработке данных сплавов будет более эффективен. Последующие исследования стойкости спиральных сверл подтвердили данную гипотезу;
2. Исследования стойкости токарных резцов, оснащенных неперетачиваемыми твердосплавными пластинами из GC 1105, показали, что стойкость резцов в условиях электрической изоляции при обработке титановых сплавов возрастает в $1,23 \div 2,03$ раз;
3. Показано, что существует обратная корреляционная связь между силой резания и стойкостью токарных резцов, при этом $R = (-0,52) \div (-0,66)$. Доказано существование прямой корреляционной связи между усадкой стружки и стойкостью токарных резцов $R = 0,51 \div 0,57$. Расчет коэффициента множественной корреляции между силой резания, усадкой стружки и стойкостью резцов показал, что существует множественная корреляция между этими тремя параметрами, и коэффициент корреляции составляет $R = 0,58 \div 0,67$;
4. Исследования стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке титановых сплавов показали, что использование метода электрической изоляции приводит к повышению стойкости сверл в $1,66 \div 2,76$ раз;
5. Исследования стойкости спиральных сверл при обработке сплава ВТ1-0 в промышленных условиях показали, что износ сверл, работавших в условиях электрической изоляции меньше, чем у сверл, работавших в обычных условиях. Стойкость при этом возрастает в $1,25 \div 2,15$ раз;
6. Расчет экономического эффекта показал, что внедрение предлагаемого способа повышения стойкости металлорежущего инструмента при обработке титановых сплавов позволяет достичь снижения затрат на

инструмент на 49,29÷60,09 %, при этом снижение затрат на производство составляет 2,39÷7,98% или, для рассматриваемых случаев точения и сверления, 159291,00 руб и 432300,00 руб соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе достигнута цель повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов методом его электрической изоляции. Достижение данной цели представлено в виде решения комплекса задач, связанных с исследованием явлений, происходящих при резании титановых сплавов электрически изолированным режущим инструментом, разработкой способа повышения стойкости режущего инструмента, а также экспериментальной проверкой эффективности предложенного способа.

Литературный анализ, проведенный в Главе 1, показал, что успех в области исследования метода повышения стойкости режущего инструмента, практически не коснулся такой важной области, как обработка резанием титановых сплавов. Так, не была выявлена связь между электрической изоляцией режущего инструмента при обработке титановых сплавов, и силой резания, не была доказана возможность прогнозирования эффективности электрической изоляции режущего инструмента за счет изучения термоЭДС при нагреве термопар «титановый сплав – инструментальный материал». Заполнение данных теоретических пробелов являлось одной из задач, решенных в представленной научно-квалификационной работе.

Кроме того, в Главе 1 были выявлены существенные недостатки, имеющиеся у разработанных к настоящему времени способов электрической изоляции режущего инструмента. Разработка нового способа электрической изоляции режущего инструмента являлась второй задачей, решаемой в представленной работе. Третьей задачей являлось экспериментальное исследование эффективности предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов.

По результатам представленной научно-квалификационной работы, таким образом, можно сделать следующие **общие выводы**:

1. На основе теории электропластической деформации металлов предсказано уменьшение силы резания и усадки стружки при работе электрически изолированным режущим инструментом, благодаря устранению дополнительной силы от протекания электрического тока по цепи «станок – инструмент – изделие – станок», на величину которой влияет сила электронного увлечения, действующая на единицу длины дислокации. Расчет дополнительной силы для случая точения титановых сплавов показал, что она варьируется в пределах от 8,72 до 95,60 Н;
2. Экспериментально показано, что при работе электрически изолированным режущим инструментом со сменными твердосплавными неперетачиваемыми пластинами из GC 1105 заготовок из титановых сплавов сила резания уменьшается на $3,02 \div 46,73$ %, а усадка стружки – на $3,24 \div 27,85$ %, что подтверждает теоретические прогнозы;
3. Доказано, что существует множественная корреляция (коэффициент множественной корреляции $R = 0,58 \div 0,67$) между силой резания, усадкой стружки и стойкостью электрически изолированного режущего инструмента при обработке заготовок из титановых сплавов;
4. Разработан новый способ электрической изоляции режущего инструмента (патент РФ №2456125), состоящий в использовании вспомогательного инструмента и приспособлений, изготовленных из титановых сплавов, на поверхности которых методом термического оксидирования создан диэлектрический оксидный слой;
5. Экспериментальное исследование нового способа повышения стойкости режущего инструмента показало, что электрическая изоляция приводит к уменьшению износа и повышению стойкости:
 - в $1,23 \div 2,03$ раз при точении титановых сплавов марок BT1-0, OT4, BT6 и VST5553 резцами с твердосплавными неперетачиваемыми пластинками из сплава GC 1105;

- в $1,66 \div 2,76$ раз при сверлении титановых сплавов марок BT1-0, OT4, BT6 и VST 5553 сверлами из стали P6M5;
- в $1,25 \div 2,15$ раз при сверлении трубных досок для теплообменников в промышленных условиях ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Указанные результаты приняты к использованию в производственной практике ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (Приложение 1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Архипов, В. В.** Технология металлов / В. В. Архипов, М.А. Касенков, М. Н. Ларин и др. – М. : Машгиз, 1959. – 768 с.
2. **Бай, А. С.** Окисление титана и его сплавов / А. С. Бай, Д. И. Лайнер, Е. Н. Слесарева – М. : Металлургия, 1970. – 320 с.
3. **Батаронов, И. Л.** Механизмы влияния электрического поля и электрического тока на пластическую деформацию металлов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук – Воронеж : Воронежский Государственный Технический Университет, 2000. – 280 с.
4. **Батаронов, И. Л.** Механизмы электропластичности / И. Л. Батаронов // Соросовский образовательный журнал, 1999. №10, С. 93 – 99
5. **Белевцев, А. В.** Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория практика развитие / Под. Общ. Ред. А. В. Каржавина / А. В. Белевцев, В. В. Богатов, А. В. Каржавин, Д. В. Петров, А. А. Улановский – Обнинск : ПК «Тесей», 2003. – 56 с.
6. **Бецофен, С. Я.** Структура, свойства и методы контроля газонасыщенных слоев в титановых полуфабрикатах / С. Я. Бецофен, В. В. Плихунов, Н. А. Ночовная, Д. В. Сиваков // Авиационная промышленность, 2008. №2, С. 44 – 48
7. **Бобровский, В. А.** Авторское свидетельство 206972 СССР, МПК В23b, Н01b. Способ повышения стойкости инструмента / В. А. Бобровский – №845683/25-8 ; заявл. 05.07.1963 ; опубл. 08.12.1967, Бюл. №1 – 3 с.
8. **Бобровский, В. А.** Влияние термоэлектрических токов на износ инструмента при резании материалов // Электрические явления при трении и резании металлов – М. : Наука, 1969. С.7 – 25
9. **Бобровский, В. А.** Повышение стойкости инструмента / В. А. Бобровский – М. : Машиностроение, 1976. – 48 с.

10. **Бобровский, В. А.** Термотоки при сверлении / В. А. Бобровский, В. С. Писарев // Электрические явления при трении и резании металлов – М. : Наука, 1969. С.83 – 96
11. **Бобровский, В. А.** Электродиффузионный износ инструмента / В. А. Бобровский – М. : Машиностроение, 1970 – 202 с.
12. **Бойко, В.М.** Патент 975209 СССР, МПК В 23 В 1/00. Способ повышения стойкости режущего инструмента / В.М. Бойко – №3321381/25-08 ; заявл. 23.07.81 ; опубл. 23.11.82, Бюл. №43 – 2 с.
13. **Бойко, В.М.** Патент 2212992 Российская Федерация, МПК В23Р15/28, С21D10/00. Установка для магнитной обработки режущего инструмента / В.М. Бойко, В.И. Муравьев, Н.А. Семашко – № 2001124153/02 ; заявл. 30.08.2011 ; опубл. 27.09.2003
14. **Братухин, А. Г.** Применение сплавов титана в конструкциях магистральных пассажирских и тяжелых транспортных самолетов / А. Г. Братухин, Г. В. Новожилов, В. И. Мишин, Ф. Р. Куликов // Титан, 1996. №1. С. 52 – 59
15. **Васильев, С. В.** Измерение силы резания без динамометрических преобразователей // Станки и инструмент, 1987. №6, С. 23 – 24
16. **Васильев, С. В.** Электрические свойства контакта резец – деталь и тарирование естественной термопары / С.В. Васильев // Станки и инструмент, 1985, №7, С. 23 – 25
17. **Галей, М. Т.** Износостойкость инструмента и электрические явления в цепи станок – изделие – инструмент // Технология приборостроения, 1965. №8, С.16 – 19
18. **Гармата, В. А.** Титан. / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий, Ю. Г. Олесов, Р. А. Сандлер – М. : Металлургия, 1983. – 559 с.
19. **Гордиенко, П. Л.** О влиянии электрического тока на износ при трении металлических тел / П. Л. Гордиенко, С. Л. Гордиенко // Вестник машиностроения, 1952. №7, С.38

20. **Горынин, И. В.** Титан в машиностроении. / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
21. **ГОСТ 10902-77.** Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Средняя серия. Основные размеры. – М. : Издательство стандартов, 2003. – 13 с.
22. **ГОСТ 13598-85.** Втулки переходные для крепления инструмента с коническим хвостовиком. Конструкция и размеры. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 17 с.
23. **Грачев, С. В.** Физическое металловедение: учебник для вузов / С. В. Грачев, В. Р. Бараз, А. А. Богатов, В. П. Швейкин – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001. – 534 с.
24. **Дроздов, Н. Г.** Электроматериаловедение. Изд 3-е, перераб. / Н. Г. Дроздов, Н. В. Никулин – М. : Высшая школа, 1968. – 310 с.
25. **Дубров, Ю. С.** К вопросу о физической сущности влияния термоэлектрических явлений на процесс трения и резания металлов / Ю. С. Дубров, Г. С. Николаева, В. С. Филоненко // Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел – М. : Наука, 1973. С.70 – 80
26. **Дубров, Ю. С.** Электроэрозионный износ режущих инструментов и влияние электрических явлений на чистоту обработанной поверхности / Ю. С. Дубров, Г. С. Николаева // Электрические явления при трении и резании металлов – М. : Наука, 1969. С.56 – 69
27. **Еременко, В. Н.** Титан и его сплавы. – Киев : Издательство академии наук Украинской ССР, 1960. – 500 с.
28. **Жиляев С.В.** Влияние режимов резания на усадку стружки при точении титанового сплава ВТ6 / С.В. Жиляев, Д.С. Кугультинов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. №3, 2011. С. 48 – 50
29. **Зубков, Л. Б.** Космический металл. / Л. Б. Зубков. – М. : Наука, 1987. – 127 с.

30. **Илларионов, А. Г.** Технологические свойства титановых сплавов: конспект лекций. / А. Г. Илларионов. – Екатеринбург : Издательство ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 56 с.
31. **Ильин, А. А.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин – М. : ВИС – МАТИ, 2009. – 520 с.
32. **Карпинский, Д. Н.** Влияние электрического тока на эволюцию пластической деформации у вершины трещины / Д. Н. Карпинский, С. В. Санников // Прикладная механика и техническая физика, 2001. Т. 42, №5, С. 176 – 182
33. **Колачев, Б. А.** Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. / Б. А. Колачев, Ю. С. Елисеев, А. Г. Братухин, В. Д. Талалаев. – М. : Издательство МАИ, 2001. – 412 с.
34. **Корнилов, И. И.** Влияние длительного окисления на механические свойства титана / И. И. Корнилов, Н. Г. Борискина, М. Н. Забродская, А. П. Брынза // Металловедение и Термическая Обработка металлов, 1977. №5, С. 5 – 6
35. **Корнилов, И. И.** Кинетика длительного окисления титана / И. И. Корнилов, М. Н. Забродская, Н. Г. Борискина, А. П. Брынза // Металловедение и Термическая Обработка Металлов, 1977. №5. С. 49 – 51
36. **Коробов, Ю. М.** Влияние термоэлектрических явлений, возникающих при резании, на износ инструмента // Станки и инструмент, 1968. №3, С.25 – 26
37. **Коробов, Ю. М.** Электромеханический износ при трении и резании металлов / Ю. М. Коробов, Г. А. Прейс – Киев : Изд-во «Техника», 1976. – 196 с.
38. **Коршунов, Л. Г.** Влияние электризации и малых постоянных токов на износ металлов при трении скольжения / Л. Г. Коршунов, Р. И. Минц // Физико-химическая механика материалов, 1967. Том 3, №4, С.392 – 396

- 39.**Кривоухов, В. А.** Обработка резанием титановых сплавов / В. А. Кривоухов, А.Д. Чубаров – М. : Машиностроение, 1970. – 180 с.
- 40.**Лоладзе, Т. Н.** Экспериментальное исследование влияния разрыва цепи термоЭДС на стойкость сверл / Т.Н. Лоладзе, А.Н. Овсеенко, В.И. Жилис, М.Е. Кущева, А.С. Кондратов, А.М. Кузнецов, А.Д. Макаров, А.К. Синельщиков // Вестник машиностроения, 1979. №6, С. 39 – 42
- 41.**Макашин, Д. М.** Сверление отверстий в корпусных деталях из титановых сплавов / Д. М. Макашин // Главный механик, 2012. №10, С. 21 – 29
- 42.**Маркосян, Р.Г.** Электромагнитные тайны или тайные мечты / Р. Маркосян // Техника молодежи, №1, 1976. С. 26 – 27
- 43.**Масленков, С. Б.** Обрабатываемость материалов резанием // Технология металлов, 2007. №4, С. 42 – 51
- 44.**Медисон, В. В.** Механизм влияния термоэлектрического тока на стойкость инструмента при резании титановых сплавов / В. В. Медисон // Вестник машиностроения, №1, 2014, С. 75 – 78
- 45.**Медисон, В. В.** Патент 2456125 Российская Федерация, МПК В23В1/00 В23В35/00. Способ обработки резанием токопроводящим режущим инструментом изделий из металлов и токопроводящих материалов / В. В. Медисон, В. И. Голубев, С. В. Андреев, Д. В. Калашник, С. М. Мурыжников – №2010139707/02 ; заявл. 27.09.2010 ; опубл. 20.07.2012, Бюллетень изобретений, №20 – 6 с.
- 46.**Медисон, В. В.** Повышение стойкости режущего инструмента методом электроизоляции / В. В. Медисон, В. Ф. Пегашкин, В. И. Голубев, Д. В. Калашник, С. М. Мурыжников // Технология машиностроения, №10, 2012. С. 13 – 16
- 47.**Медисон, В. В.** Повышение стойкости спиральных сверл при обработке титановых сплавов методом электроизоляции / В. В. Медисон, В. Ф. Пегашкин, В. И. Голубев // Титан, №1, 2013. С. 35 – 38

48. **Медисон, В. В.** Применение электроизоляции для повышения стойкости режущего инструмента / В. В. Медисон, В. Ф. Пегашкин, В. И. Голубев // Научно-технический вестник Поволжья. №4, 2011. С. 121 – 124
49. **Модер, Н. И.** Использование метода ядерных реакций при исследовании тонких газонасыщенных слоев в листах из титановых сплавов Gr2 и Ti-6Al-4V / Н. И. Модер, И. В. Левин, В. Б. Выходец, Т. Е. Куренных // Титан, 2003. №1, С. 49 – 56
50. **Ночовная, Н. А.** Особенности применения и производства жаропрочных титановых сплавов в мировом авиадвигателестроении // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Ti-2009 в СНГ». С.41 – 45
51. **Омельченко, И. В.** Процесс резания как источник электрических явлений [Электронный ресурс] / И. В. Омельченко, В. А. Держук // Современные научные исследования и инновации, 2012. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/01/6191>
52. **Пегашкин, В. Ф.** Математическое моделирование стойкости металлорежущего инструмента [электронный ресурс] / В. Ф. Пегашкин, Е. В. Пегашкина – Нижний Тагил : УГТУ – УПИ, 2007. – 69 с.
53. **Пегашкин, В. Ф.** Теория исследований / В. Ф. Пегашкин, И. И. Вендер – Нижний Тагил : НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2005. – 322 с.
54. **Пешков, В. В.** Исследование окисленного поверхностного слоя на титане после отжига / В. В. Пешков, В. Н. Милютин // Металловедение и Термическая Обработка Металлов, 1984. №12, С. 43 – 45
55. **Плотников, А. П.** Автоматический контроль состояния сборного многолезвийного инструмента / А. П. Плотников, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, М. Г. Кристаль, В. П. Заярный // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2011, №3. С. 25 – 28
56. **Полетика М.Ф.** Исследование процесса резания технического титана / М.Ф. Полетика, А.И. Афонасов // Известия Томского Ордена Трудового Красного

Знамени Политехнического Института имени С.М. Кирова, Том. 114, 1964.
С. 149 – 153

57. **Попов, А. А.** Функциональные свойства титановых сплавов: конспект лекций. / А. А. Попов, А. Г. Илларионов, С. Л. Демаков. – Екатеринбург : Издательство ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 71 с.
58. **Попов, А. А.** Эксплуатационные свойства титановых сплавов: конспект лекций. / А. А. Попов, А. Г. Илларионов, С. Л. Демаков. – Екатеринбург : Издательство ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2004. – 47 с.
59. **Попов, Д. В.** Износ твердых сплавов при обработке титана / Д. В. Попов // Технология металлов, №12, 2000. С. 22 – 25
60. **Постников, С. Н.** Электрические явления при трении и резании / С. Н. Постников – Горький : Волго-вятское кн.изд-во, 1975. – 280 с.
61. **Праведников, И. С.** Влияние марки обрабатываемых и инструментальных материалов на термо-ЭДС // Нефтегазовое дело, 2006.[Электронный ресурс] URL: http://www.ogbus.ru/authors/Pravednikov/Pravednikov_6.pdf
62. **Применение титановых сплавов:** материалы 2-го научно-технического совещания – М. : ОНТИ, 1961. С. 68 – 70
63. **Резников, Н. И.** Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н. И. Резников, Е. В. Бурмистров, И. Г. Жарков, А. С. Зыкин, Б. А. Кравченко, В. И. Левилин, Л. П. Медведев, К. Ф. Митряев, Ф. П. Урывский – М. : Машиностроение, 1972. С. 162 – 167
64. **Рыжкин, А. А.** Влияние электрического тока на износ при резании // Электрические явления при трении и резании металлов – М. : Наука, 1969. С.70 – 81
65. **Рыжкин, А. А.** Об эффективности управления электрическими процессами в условиях резания / А. А. Рыжкин, В. Э. Бурлакова // Вестник Донского государственного технического университета, 2012, №2-2, С. 80 – 86

- 66.**Рыжкин, А.А.** Трибоэлектрические явления и износ инструментальных материалов / А.А. Рыжкин, В.Э. Бурлакова // Вестник Донского государственного технического университета, 2011, Т.11, №10, С. 1831 – 1842
- 67.**Самсонов, Г. В.** Физико-химические свойства окислов / Г. В. Самсонов, А. Л. Борисова, Т. Г. Жидкова – М. : Metallurgy, 1978. – 472 с.
- 68.**Сидоров, А. С.** Диагностика состояния режущего инструмента / А. С. Сидоров // Главный механик, 2011. №1, С. 24 – 31
- 69.**Солоненко, В. Г.** Повышение работоспособности режущих инструментов / В. Г. Солоненко – Ростов н/Д : КубГТУ, 1997. – 223 с.
- 70.**Солоненко, В. Г.** Резание металлов и режущие инструменты / В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин – М. : Высшая школа, 2008. – 414 с.
- 71.**Солоненко, В. Г.** Современные методы повышения работоспособности режущих инструментов. // Технология металлов, 2009. №1, С.17 – 23
- 72.**Солоненко, В. Г.** Электроизоляционные методы повышения работоспособности токарных резцов / В. Г. Солоненко, В. Н. Пучкин, Л. А. Ростовцева, О. Н. Репина // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов конференции – Брянск : БГИТА, 2006. С.73 – 76
- 73.**Солоненко, В. Г.** Электроизоляция как метод повышения работоспособности режущих инструментов // Технология металлов, 2009. №2, С.18 – 25
- 74.**Солоненко, В. Г.** Электроизоляция как метод повышения работоспособности режущих инструментов // Технология металлов, 2009. №3, С.9 – 15
- 75.**Спицын, В. И.** Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицын, О. А. Троицкий – М. : Наука, 1985.

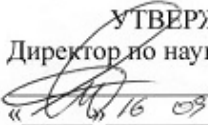
76. **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 496 с.
77. **Старков, В. К.** Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
78. **Тетюхин, В. В.** Новые титановые сплавы корпорации ВСМПО-АВИСМА / В. В. Тетюхин, И. В. Левин, А. В. Волков // Кузнечно-штамповочное производство: перспективы и развитие: сборник научных трудов – Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005. С. 412 – 417
79. **Томсинский, В. С.** Газонасыщение поверхности титанового сплава ВТ6 / В. С. Томсинский // Металловедение и Термическая Обработка Металлов, 1973. №11, С. 74 – 75
80. **Трембач, Е. Н.** Резание материалов : учебник / Е. Н. Трембач, Г. А. Мелетьев, А. Г. Схиртладзе [и др.] – Старый Оскол : ТНТ, 2012. – 512 с.
81. **Троицкий, О. А.** Исследования резания металла сверлением при одновременном действии импульсным током на заготовку / О. А. Троицкий, А. В. Тяпкин, В. И. Стащенко, А. В. Сухов // Неделя металлов в Москве: сборник трудов конференции – Москва, 2010. С. 642 – 661
82. **Фарбер, В. М.** Дифракционные методы анализа / В. М. Фарбер, А. А. Архангельская – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 113 с.
83. **Федосов, В. П.** Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / Под ред. В. П. Федосова / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко – М.: ДМК Пресс, 2007. – 472 с.
84. **Чепкин, В. М.** Опыт и проблемы применения титана в авиационных двигателях // Титан, 1995. №1-2, С. 13 – 14
85. **Шушпанов, М. Н.** Воздействие оксидных пленок на повторно-статическую долговечность титановых сплавов / М. Н. Шушпанов, А. Б. Коломенский // Прогрессивные технологии в сварочном производстве: межвузовский сборник научных трудов – Воронеж : ВГТУ, 2002. С. 7 – 11

- 86.**Юкио Сато.** Обработка сигналов. Первое знакомство. / Под ред. Емумфи Амэмиа – М. : Додэка XXI, 2009. – 175 с.
- 87.**Якунин, Г. И.** Исследование новых эффектов связанных с термоэлектрическими явлениями и влияющих на стойкость быстрорежущих резцов / Г. И. Якунин, Н. Г. Молчанова // Электрические явления при трении и резании металлов – М. : Наука, 1969. С.49 – 55
- 88.**Abdel-Aal, H. A.** Pressure-Induced Critical Influences on Workpiece-Tool Thermal Interactions in High Speed Dry Machining of Titanium [Электронный ресурс] / H. A. Abdel-Aal, M. El. Mansori // URL: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1008/1008.1361.pdf>
- 89.**Adamson, W. L.** Application of titanium in shipboard seawater cooling systems /W.L. Adamson, R.W. Schutz // Naval Engineers Journal, 1987. Vol. 99, Issue 3, p. 124 – 134
- 90.**Astakhov V. P.** A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy, spent in the cutting system / Viktor P. Astakhov, Xinran Xiao // Machining Science and Technology, Vol. 12, 2008. pp. 325 – 347
- 91.**Astakhov, V.P.** Tribology of metal cutting – London : Elsevier Science, 2007. – 392 p.
- 92.**Axer, H.** Aufwand, Leitsung und Wirtschaftlichkeit neuerlicher Werkzeugmaschinen / H. Axer // IV Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium. Essen, 1953.
- 93.**Borigoli, F.** Improvement of wear resistance of Ti-6Al-4V alloy by means of thermal oxidation / F. Borigoli, E. Galvanetto, F. Ioselli, G. Pradelli // Materials Letters, 2005. Volume 59, Issue 17, pp. 2159 – 2162
- 94.**Boyer, R. R.** An overview on the use of titanium in the aerospace industry / R.R. Boyer // Materials Science and Engineering, 1996. Vol. 213, Issues 1 – 2, p. 103 – 114
- 95.**Daymi, A.** Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces / A. Daymi, M. Boujelbene, S. Ben Salem, B. Hadj Sassi, S. Torbaty //

- Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2009. Vol. 1, Issue 2, pp. 77 – 83
- 96.**Fildes, J. M.** Patent 4,694,686 United States, МПК B23Q 17/09. Cutting tool wear monitor / John M. Fildes, Robert H. Krueger – №832,616 ; заявл. 24.02.1986 ; опубл. 22.09.1987
- 97.**Hehenkamp, T.** Untersuchungen über den elektrisch kompensierbaren Verschleiß von Drehmeißeln aus Hartmetall / T. Hehenkamp // Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1958. Vol.29, No. 4
- 98.**Lin Young-Chuan.** Study on Additional Electrical Current on Machinability of Free-Machining Steels in Turning / Lin Young-Chuan, Chen Yuan-Ling // Applied Mechanics and Materials, 2010, Vols 34-35, pp. 1775-1779
- 99.**Medison V. V.** Influence of Thermoelectric Current on the Tool Life in Cutting Titanium Alloys / V. V. Medison // Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, №. 4, pp. 235–238.
100. **Medison V.V.** Use of electrical insulation of the cutting tool to increase tool life when machining titanium alloys / V.V. Medison, V.F. Pegashkin, V.I. Golubev // International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 2014, Vol. 74, pp. 599 – 614
101. **Stratton, P.F.** Titanium case-hardening / P. F. Stratton // Heat Treat. Metals. 2003. №1, pp. 8 – 12
102. **Shan, H.S.** Wear of Cutting Tools : Thermo-Electric Effect / H.S. Shan, P.C. Pandey // Wear, 1975, Vol. 32, pp. 167 – 179
103. **Shet C.** Analysis of energy balance when using cohesive zone models to simulate fracture processes / C. Shet, N. Chandra // Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 124, 2002. pp. 440 – 450
104. **Sun S.** Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys / S. Sun, M. Brandt, M.S. Dargush // International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, 2009. pp. 561 – 568

105. **Tanaka, R.** Influence of Additional Electrical Current on Machinability of BN Free-Machining Steel in Turning /R. Tanaka, Y. Lin, A. Hosokawa, T. Ueda, K. Yamada // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2009, Volume 3, Issue 2, pp. 171-178. DOI: 10.1299/jamdsm.3.171
106. **Uehara, K.** On the Problem of Thermoelectric Current in Metal Cutting / K. Uehara, M. Sakurai, T. Ikeda // Annals of the CIRP, 1992, Vol. 41, pp. 75 – 78
107. **Zhang, P. F.** Mechanical Drilling Processes for Titanium Alloys: A Literature Review / P. F. Zhang, N. J. Churi, Z. J. Pei, C. Treadwell // Machining Science and Technology : An International Journal, №4, 2008. pp. 417 – 444
108. **Zhang Song.** Tool wear criterion, tool life and surface roughness during high-speed end milling Ti-6Al-4V alloy / Song Zhang, Jian-Feng Li // Journal of Zhejiang University SCIENCE A, Vol. 11, Issue 8, 2010. pp. 587 – 595.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Использование результатов диссертационной работы

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КОРПОРАЦИЯ ВСМПО-АВИСМА»  Парковая ул., д. 1, г. Верхняя Салда, Свердловская область, Россия, 624760 Телефон: (34345) 62-366, 21-437 Факс: (34345) 24-736, 51-540 E-mail: info@vsmpo-avisma.ru http://www.vsm-po.ru ОКПО 07510017, ОГРН 1026600784011, ИНН/КПП 6607000556 / 997550001	Форма № 54-В3-А15-8 УТВЕРЖДАЮ Директор по науке и технологиям  М. О. Ледер 2013
20 СЕН 2013 № <u>Д 23/126</u> На № _____	

СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационной работы Медисона В. В. «Повышение стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов методом электроизоляции», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Способ повышения стойкости режущего инструмента (патент RU 2456125 С2), а также соответствующие технологические и конструкторские решения, приняты к использованию открытым акционерным обществом «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» для повышения эффективности обработки заготовок из титановых сплавов.

Предложенный способ повышения стойкости режущего инструмента позволяет повысить стойкость резцов, оснащенных твердосплавными пластинками, используемых при обработке слитков и прутков из титановых сплавов, спиральных сверл из быстрорежущей стали, используемых при обработке изделий из титановых сплавов. Использование разработанного способа приводит к повышению эффективности и снижению себестоимости обработки.

Повышение эффективности достигается за счет относительной простоты технической реализации предлагаемого способа повышения стойкости режущего инструмента, минимальных изменений технологической схемы.

Использование результатов диссертационной работы Медисона В. В. в производственной практике ОАО «Корпорации ВСМПО-АВИСМА» позволит снизить себестоимость выпуска конечной продукции, и тем самым повысить конкурентоспособность производства.

Главный технолог		Литвинов А.Н.
------------------	---	---------------

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Рентгеноструктурный фазовый анализ оксидных пленок

Для определения химического состава титановых сплавов, используемых для создания вспомогательного инструмента с диэлектрическим оксидным покрытием, необходимо знать, какие оксиды присутствуют в составе оксидной пленки, каково их процентное содержание, и имеются ли оксиды TiO_2 , Al_2O_3 , и другие оксиды, имеющие повышенное электрическое сопротивление.

Анализ химического и структурного состава оксидного слоя проводили методом рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА) с использованием дифрактометра *Bruker D8 Advance*.

Рентгеноструктурный фазовый анализ основан на том, что каждая фаза, входящая в состав исследуемого вещества, создаёт на дифракционной картине свою группу интерференционных линий. Группы интерференционных линий разных фаз отличаются друг от друга: характерным расположением линий и их относительной интенсивностью. Таким образом, рентгенограмма многофазного вещества представляет собой сумму рентгенограмм отдельных фаз.

Рентгеноструктурный фазовый анализ подразделяют на [82]:

- качественный фазовый анализ, направленный на идентификацию фаз, т.е. определение присутствия той или иной фазы в смеси;
- количественный фазовый анализ, цель которого установить процентное содержание каждой фазы в образце.

Рентгеноструктурный качественный фазовый анализ проводится с кристаллогеометрических позиций: каждая фаза имеет определенный тип кристаллической решетки (сингонию) и её периоды.

Индицирование (расшифровка) дифракционной картины начинается с отыскания из геометрии съемки углов Вульфа-Брегга для присутствующих интерференционных линий. Далее используется уравнение Вульфа-Брегга, в которое подставляется квадратичная формула для кристаллов соответствующей

сингонии, например, кубической [82]

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda, \quad (1)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4d^2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}; \quad (3)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2 (n^2 h^2 + n^2 k^2 + n^2 l^2)}{4a^2} = \frac{\lambda^2}{4a^2} (H^2 + K^2 + L^2), \quad (4)$$

где h, k, l – индексы отражающей плоскости, которые не могут содержать общего множителя; $H = nh, K = nk, L = nl$ – индексы интерференции, характеризующие интерференционную линию на дифракционной картине.

Анализ уравнения (4) показывает следующее:

1. Чем больше длина волны применяемых лучей, тем под большим углом Вульфа-Брегга наблюдается соответствующая линия. При съемке дифрактограмм с одного и того же вещества в разных излучениях, не получается полностью тождественной картины: они различаются количеством линий и их углами Вульфа-Брегга. На дифрактограммах, полученных в излучении с большой длиной волны (Z анода мало – Cr, Fe) число линий будет меньше, чем при съемке в коротковолновом излучении (Cu, Mo).
2. Линии, соответствующие отражениям от плоскостей с большими индексами (hkl), располагаются под большими углами Вульфа-Брегга.
3. Чем менее симметрична кристаллическая решетка (меньше множитель повторяемости P отражающих плоскостей), тем больше линий присутствует на дифрактограмме, а интенсивность их меньше. Например, для высокосимметричной простой кубической решетки все плоскости

совокупности $\{100\} - (100) (010) (001) (\bar{1}00) (0\bar{1}0) (00\bar{1})$ дают отражения под одним углом Вульфа-Брегга и формируют на дифрактограмме одну линию, интенсивность которой пропорциональна P .

Съемка рентгенограмм осуществлялась в фильтрованном медном K_{α} -излучении $\lambda = 1,5404 \text{ \AA}$. Интервал углов съемки $2\theta = 24 \div 110^\circ$ для исследования химического состава оксидных пленок на поверхности сплавов: VST 5553 оксидированного при 750°C в течение 6 часов; BT3-1, оксидированного при 800°C в течение 5 часов; BT1-0, оксидированного при 800°C в течение 5 часов. Для определения химического состава оксидной пленки на поверхности сплавов BT1-0 оксидированного при 900°C в течение 4 часов и OT4, оксидированного при 800°C в течение 5 часов использовался интервал углов съемки $2\theta = 34 \div 150^\circ$. Съемка с этих углов позволила наблюдать самые сильные линии для более точной идентификации фаз. Применен позиционно-чувствительный детектор *LynxEye* с шагом $0,019^\circ$, напряжение $U = 40 \text{ кВ}$, сила тока $I = 40 \text{ мА}$. Для расшифровки дифрактограмм использована картотека кристаллографической базы данных PDF2007, программный пакет EVA13.0.0.3. Для определения доли фаз применен полуколичественный расчет фазового состава по корундовым эквивалентам из базы.

На Рисунках 1 – 6 представлены дифрактограммы, полученные в ходе рентгеноструктурного фазового анализа оксидной пленки.

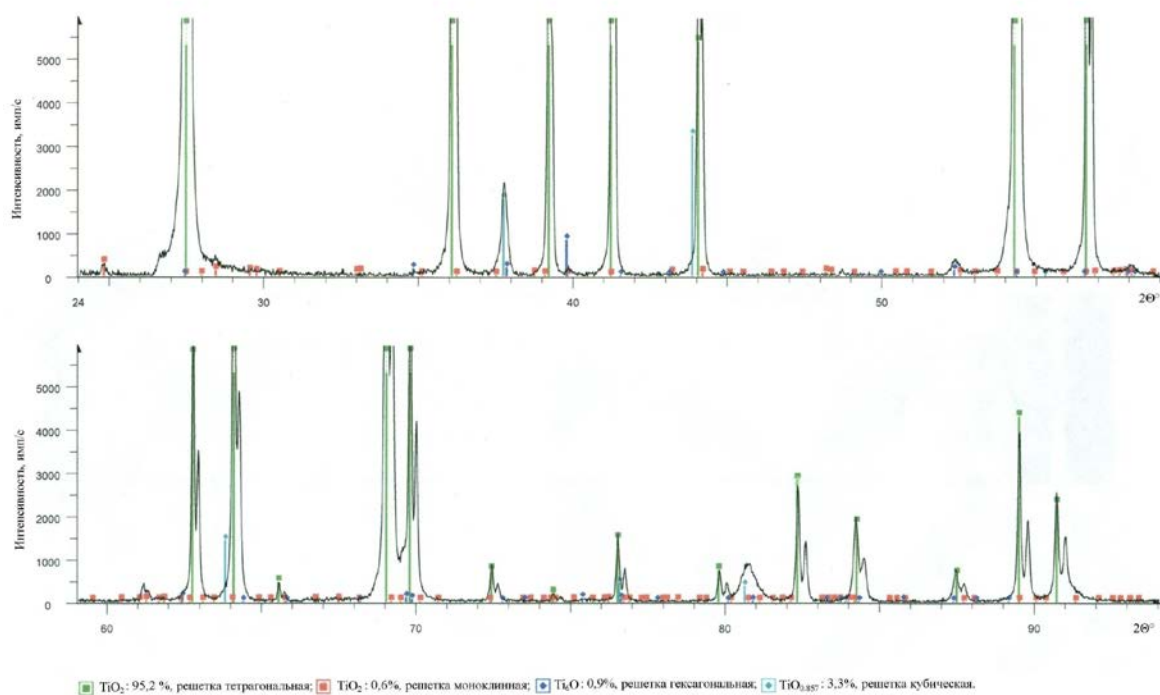


Рисунок 1. Дифрактограмма сплава BT1-0, температура оксидирования 800 °C, время оксидирования 5 часов

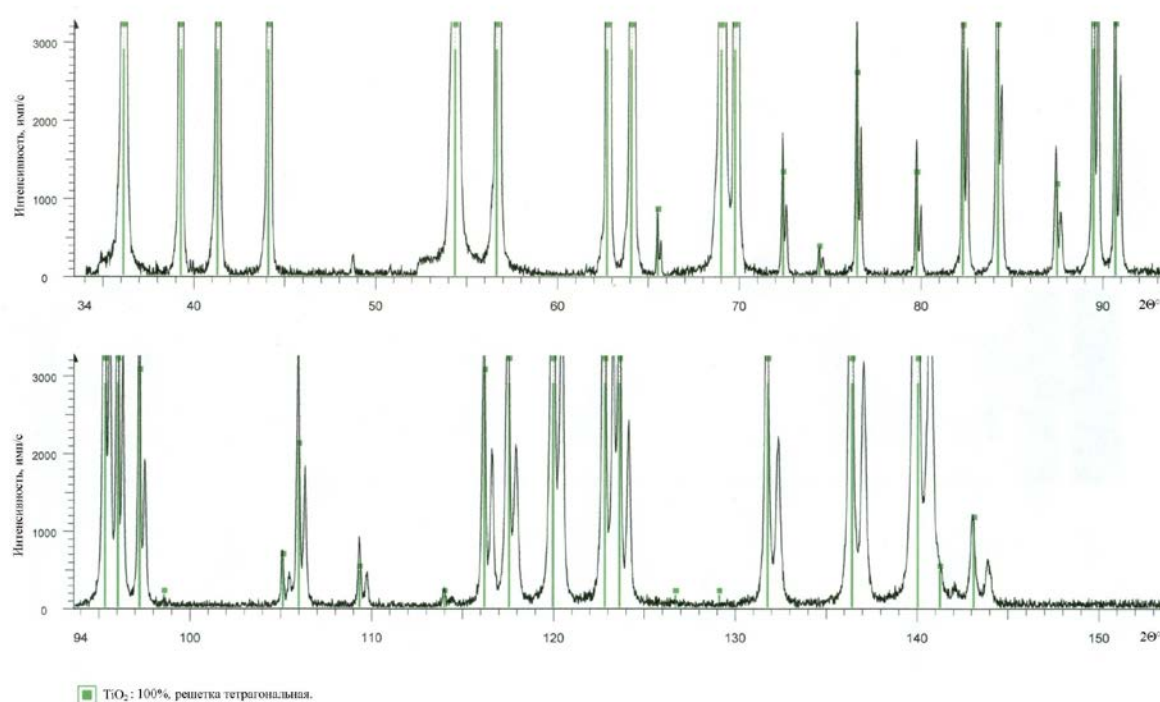


Рисунок 2. Дифрактограмма сплава BT1-0, температура оксидирования 900 °C, время оксидирования 5 часов

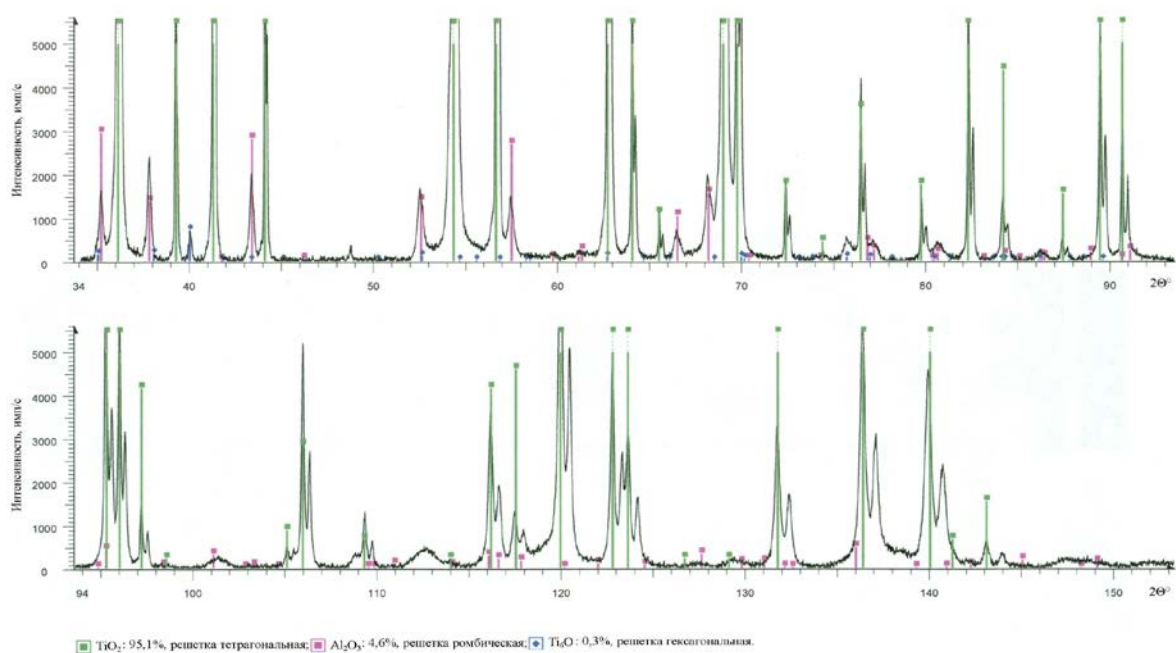


Рисунок 3. Дифрактограмма сплава ОТ4, температура оксидирования 800 °С, время оксидирования 5 часов

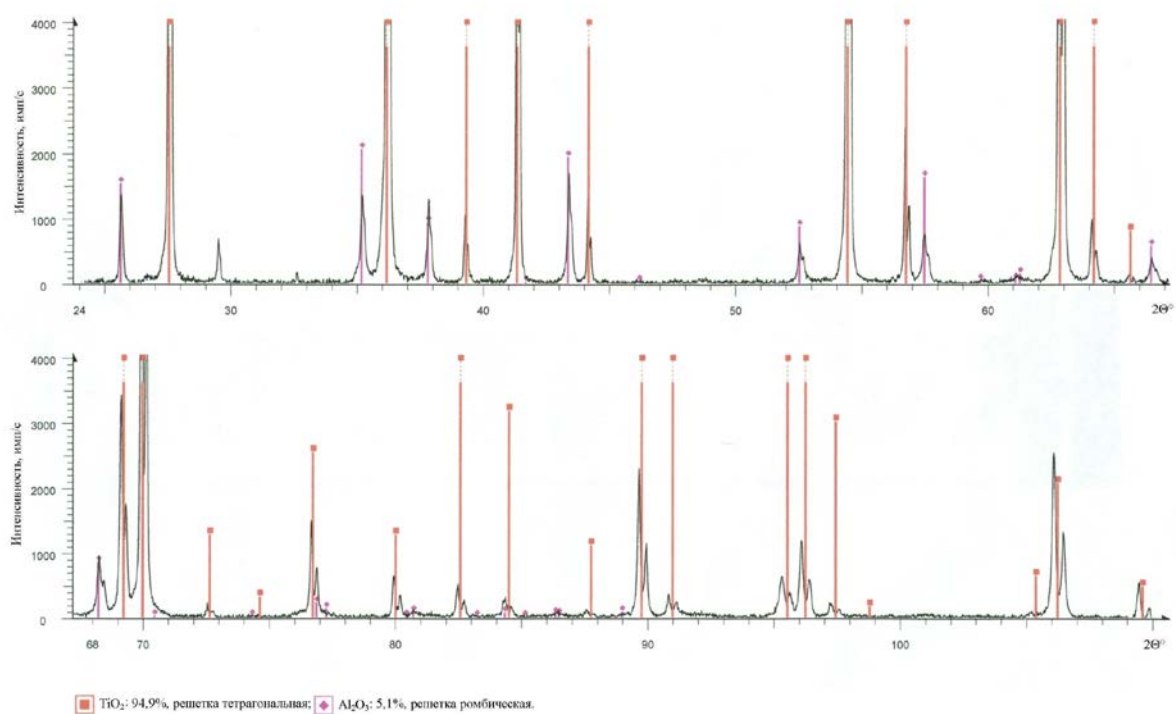


Рисунок 4. Дифрактограмма сплава ВТ6, температура оксидирования 800 °С, время оксидирования 5 часов

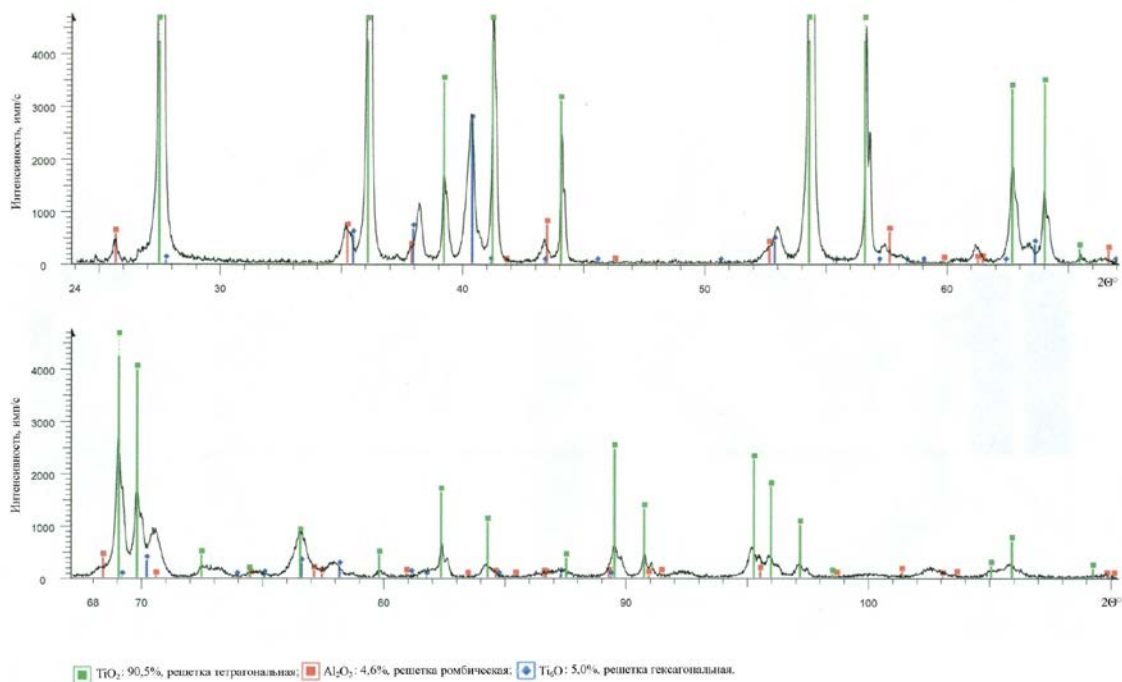


Рисунок 5. Дифрактограмма сплава ВТ3-1, температура оксидирования 800 °С, время оксидирования 5 часов

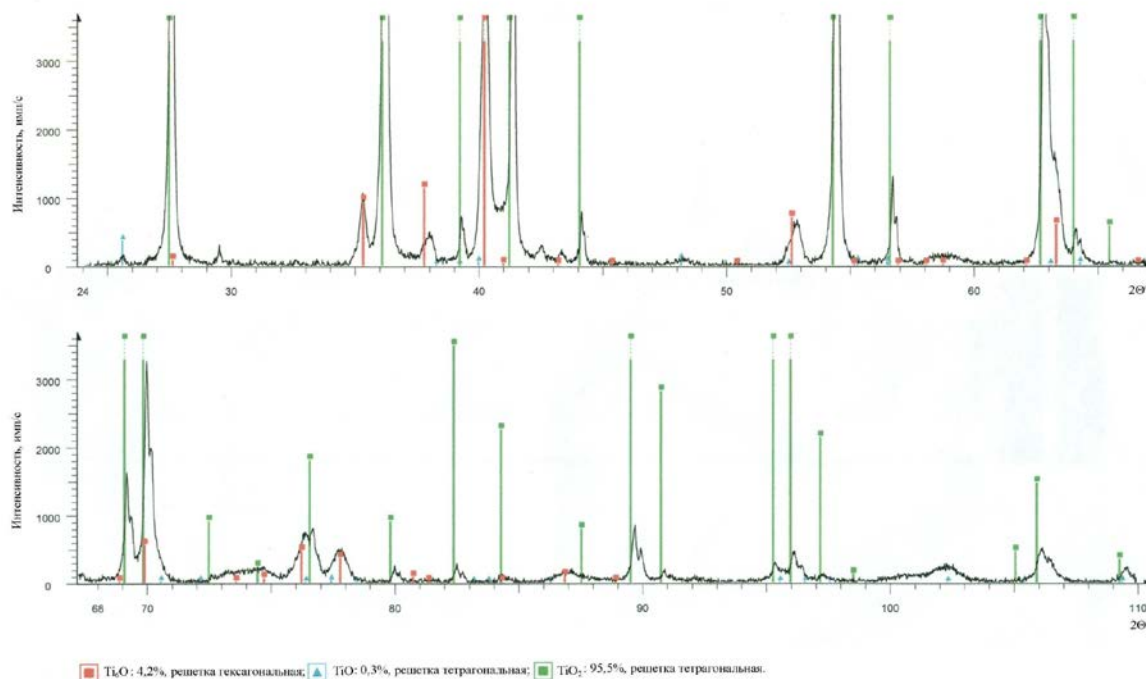


Рисунок 6. Дифрактограмма сплава VST 5553, температура оксидирования 750 °С, время оксидирования 5 часов

В Таблице 1 приведены результаты расшифровки дифрактограмм. Из Таблицы 1 видно, что основной оксид пленки – это рутил (TiO_2), присутствующий в каждом из сплавов. TiO и Ti_6O – переходные оксиды, которые часто встречаются в оксидной пленке. Их электросопротивление значительно ниже, чем у рутила. Также во всех сплавах, кроме VST 5553, где содержание $Al \geq 4$, присутствует оксид Al_2O_3 . Невозможно однозначно объяснить его отсутствие в сплаве VST 5553. Таким образом, оксиды, имеющие повышенное электрическое сопротивление, присутствуют в оксидных пленках титановых сплавов всех марок – в виде TiO_2 и, на сплавах ОТ4, ВТ6, ВТ3-1 – в виде Al_2O_3 .

Таблица 1

Состав оксидной пленки титановых сплавов. Процентное содержание, тип решетки присутствующих оксидов

Сплав	Температура оксидирования, °C	Оксид	Содержание, %	Тип решетки
BT1-0	800	TiO_2	95,2	Тетрагональная
		TiO_2	0,6	Моноклинная
		Ti_6O	0,9	Гексагональная
		$TiO_{0,857}$	3,3	Кубическая
BT1-0	900	TiO_2	100	Тетрагональная
ОТ4	800	TiO_2	95,1	Тетрагональная
		Al_2O_3	4,6	Ромбическая
		Ti_6O	0,3	Гексагональная
BT6	800	TiO_2	94,9	Тетрагональная
		Al_2O_3	5,1	Ромбическая
BT3-1	800	TiO_2	90,5	Тетрагональная
		Al_2O_3	4,6	Ромбическая
		Ti_6O	5,0	Гексагональная
VST 5553	750	TiO_2	95,5	Тетрагональная
		Ti_6O	4,2	Гексагональная
		TiO	0,3	Тетрагональная

Несмотря на высокое содержание в сплаве ВТ6 и VST 5553 ванадия, мы не наблюдаем оксидов ванадия в составе оксидной пленки. Это может быть объяснено его летучестью при нагреве. Также отсутствуют оксиды молибдена и хрома, хотя эти элементы имеются в составе сплава.

Из представленных результатов следует очевидный вывод, что наилучшим образом на величину электрического сопротивления влияют оксиды TiO_2 и Al_2O_3 . В составе оксидных пленок обнаружены также переходные оксиды титана, которые могут положительно влиять на величину электрического сопротивления. Гипотеза о возможном влиянии MnO на высокое электрическое сопротивление титанового сплава ОТ4 после термического оксидирования не подтвердилась.