

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

КАМАЛЕТДИНОВА РЕГИНА РАМИЛЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРМЕТОВ НА
ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА В ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЕ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Л.Ш. Шустер

УФА – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ...	14
<i>1.1 Механизмы машин, работающих в экстремальных условиях</i>	
<i>нагружения</i>	14
1.1.1 Запорная арматура	16
1.1.2 Конструктивные особенности запорной арматуры	19
1.1.3 Эксплуатационные условия работы.....	29
<i>1.2 Материалы, используемые для деталей арматуры</i>	31
1.2.1 Традиционные материалы для деталей запорной арматуры	31
1.2.2 Особенности технологии получения	35
1.2.3 Перспективы использования керметов в запорной арматуре	38
1.2.4 Нерешенные вопросы	40
<i>1.3 Вопросы трибологии тяжело нагруженных сопряженных</i>	
<i>поверхностей</i>	42
<i>1.4 Выводы по главе.....</i>	46
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ,	
ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА.....	48
<i>2.1 Материалы исследований.....</i>	48
<i>2.2 Износостойкие покрытия</i>	53
<i>2.3 Измерение твердости материалов.....</i>	55
<i>2.4 Механические испытания на сжатие.....</i>	56
<i>2.5 Методика исследования структуры материалов.....</i>	58
2.5.1. Металлографическая оптика.....	58
2.5.2 Растровая электронная микроскопия	59
<i>2.6 Методики определения триботехнических характеристик</i>	63
2.6.1 Адгезионные исследования.....	63
2.6.2 Исследование изнашивания	67

ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КЕРМЕТОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ.....	70
<i>3.1. Металлографические исследования изучаемых материалов и их физико-механических свойств</i>	<i>70</i>
<i>3.2. Зависимость адгезионного взаимодействия от температуры и давления для материалов без покрытий.....</i>	<i>73</i>
<i>3.3. Зависимость адгезионного взаимодействия от температуры и давления для материалов с покрытиями.....</i>	<i>82</i>
<i>3.4. Влияние нефтяной среды на показатели адгезии при трении.....</i>	<i>90</i>
<i>3.5 Теоретический анализ результатов исследования адгезионного взаимодействия при трении</i>	<i>94</i>
<i>3.6 Исследование коэффициента трения скольжения.....</i>	<i>107</i>
<i>3.7 Выводы по главе.....</i>	<i>113</i>
ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ НА ИХ ИЗНОС.....	116
<i>4.1 Изнашивание образцов – большей поверхности пары трения.....</i>	<i>117</i>
<i>4.2 Изнашивание инденторов.....</i>	<i>119</i>
<i>4.3 Суммарный износ различных трибосопряжений.....</i>	<i>122</i>
<i>4.4 Металлографические исследования изношенных поверхностей</i>	<i>126</i>
<i>4.5 Роль керметов в механизме формирования износа изучаемых трибосопряжений.....</i>	<i>134</i>
<i>4.6 Выводы по главе</i>	<i>136</i>
ГЛАВА 5 ОБОБЩЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ..	138
<i>5.1 Обобщение результатов исследований по трению и износу трибосопряжений из керамики-металлических материалов</i>	<i>138</i>
<i>5.2 Оборудование, методика и результаты стендовых испытаний</i>	<i>140</i>
<i>5.3 Преимущества применения керметов на основе карбида титана в запорной арматуре.....</i>	<i>146</i>

5.4 Выводы по главе	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
<i>Основные результаты и выводы</i>	<i>152</i>
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	155
ПРИЛОЖЕНИЕ	166

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

f	– коэффициент трения скольжения;
f_∂	– деформационная составляющая коэффициента трения;
f_m	– молекулярная составляющая коэффициента трения;
$F_{\text{экс}}$	– окружная сила на диске, вращающем индентор;
h_r	– износ, связанный с удалением продуктов изнашивания (линейный износ), т.е. толщина изношенного слоя;
$h_{r\Sigma}$	– суммарный износ трибосопряжений;
$h_{r\text{инд}}$	– износ индентора;
$h_{r\text{об}}$	– износ образца;
H_μ	– микротвердость материала;
J_h	– интенсивность изнашивания (линейная);
K	– линейная интенсивность изнашивания, т.е. износ, приходящийся на одно воздействие
l	– путь трения;
m	– весовой износ;
N	– число циклов воздействий, приводящих к износу;
p_c	– контурное давление;
p_r	– нормальные напряжения на контакте;
p_m	– предельные нормальные напряжения на контакте;
P	– нагрузка;
r	– радиус вершины сферического индентора;
$r_{\text{отп}}$	– радиус отпечатка (лунки) на испытываемых образцах;
Ra	– параметр шероховатости (среднее арифметическое отклонение профиля);
S	– площадь касания тел при трении;
$V_{\text{изн}}$	– изношенный объем;

- β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под действием сжимающих напряжений;
- γ – удельный вес (плотность) материала;
- Θ – температура триботехнического контакта, °C;
- τ_n – прочность адгезионных связей на срез.
- τ_0 – прочность адгезионных связей на срез в отсутствии нормальной нагрузки;

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Эксплуатационные характеристики и надежность трубопроводной запорной арматуры, в том числе шаровых кранов, имеющих трибосопряжение «шар-седло», оказывают значительное влияние на эффективность технологических процессов в различных производствах. Например, в горной металлургии в технологических линиях при переработке руды и транспортировке абразивосодержащей пульпы затворы подвергаются интенсивному износу и быстро теряют работоспособность. В нефтехимпереработке при каталитическом крекинге углеводородного сырья запорная арматура эксплуатируется в еще более жестких условиях, связанных с дополнительным воздействием высоких (до 700°C) температур и вибронагрузок из-за больших скоростей жидких и газовых потоков, содержащих алюмосиликатные абразивные частицы, что предопределяет их низкий ресурс.

Одним из наиболее перспективных материалов для работы в указанных условиях, является керамико-металлический композиционный материал (кермет) на основе карбида титана с жаропрочной металлической связкой, в котором достигается уникальный комплекс служебных характеристик за счет твердости и износостойкости тугоплавкого и пластичности металлического компонентов.

Однако широкое использование в арматуростроении новых керамико-металлических материалов сдерживается как отсутствием научно обоснованных методов определения фрикционных характеристик керметов на основе карбида титана, так и рекомендаций по повышению эффективности их применения. В этой связи представляется актуальным разработать модели трибосистемы, позволяющие сочетать прочностные и трибологические характеристики керметов.

Данная диссертационная работа направлена на восполнение этого пробела, что определило ее актуальность и позволило сформулировать цель и задачи, способствующие достижению этой цели. О важности решения данной задачи свидетельствует тот факт, что исследования в этой области были включены в:

- федеральную целевую программу «Исследование и разработка по приоритетным направлениям и развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (№426 от 21.05.13 г.);
- программу сотрудничества с фондом развития инновационного центра «Сколково».

Степень разработанности темы.

Одним из важных параметров, как задвижек, так и более современных шаровых кранов, является сила трения в элементах затворного узла, которая влияет на их износ и характеристики привода. Поэтому материалы элементов затвора выбираются исходя из минимизации коэффициента трения между шаром и седлом.

Однако, для разработки новых материалов и технологий, позволяющих улучшить триботехнические характеристики в затворном узле, отсутствуют исследования механизма влияния твердой основы керметов из карбида титана и износостойких покрытий на триботехнические характеристики и закономерности изнашивания.

Цель работы – установление закономерностей влияния твердой основы из карбида титана и износостойких покрытий на триботехнические характеристики и закономерности изнашивания тяжелонагруженных трибосопряжений из керамико-металлических материалов и на этой основе повышение эффективности работы запорной арматуры.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Определить физико-механические свойства и структуру керамико-металлических материалов на основе карбида титана.
2. Исследовать влияние твердой основы из карбида титана, износостойких покрытий, температуры, давления и окружающей среды на триботехнические характеристики (предельную нагрузочную способность, прочность на срез адгезионных связей, адгезионную составляющую коэффициента трения) подвижного фрикционного контакта керамико-металлических материалов.

3. Изучить влияние твердой основы из карбида титана и износостойких покрытий на закономерности изнашивания трибосопряжений из керамико-металлических материалов.

4. На основании совместного анализа результатов исследования адгезионного взаимодействия и износа трибосопряжений установить обобщенные закономерности влияния твердой основы из карбида титана и износостойких покрытий на объемный износ тяжело нагруженных узлов трения из керамико-металлических материалов и получить соответствующие математические модели.

5. Изучить механизм формирования величины износа трибосопряжений из керамико-металлических материалов (с износостойкими покрытиями и без покрытий) и на этой основе разработать принципы выбора и применения керметов, обеспечивающих повышение надежности шаровых кранов запорной арматуры.

6. Выполнить стендовые испытания шаровых кранов запорной арматуры из изученных керамико-металлических материалов на основе карбида титана.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выявлены обобщенные закономерности влияния твердой основы из карбида титана TiC и износостойких покрытий на функциональные свойства тяжело нагруженных трибосопряжений (в том числе «шар-седло») из керамико-металлических материалов;

- показано, что износостойкие покрытия не только экранируют поры в керметах, но препятствуют выходу на поверхность трения твердых включений TiC, этим самым снижая абразивно-механическое и окислительное изнашивание в парах трения и уменьшая суммарный износ трибосопряжений;

- установлено, что объемный износ трибосопряжений из керметов (с близкой по величине микротвердостью) зависит от коэффициента β упрочнения адгезионных связей и описывается степенной функцией;

- выявлено, что на поверхностях трения керметов без покрытий формируются вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в

зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, увеличивая изнашивание;

– коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из керметов на основе TiC определяется в значительной мере величиной молекулярной (адгезионной) составляющей этого коэффициента.

Практическую ценность представляют:

1. Выполненные исследования послужили научной основой работы для разработки рекомендаций по применению керметов на основе карбида титана TiC и жаропрочного сплава ЖС6У (ВЖЛ14Н) и позволили сформулировать критерии повышения износостойкости путем выбора материалов покрытия для трибосопряжений «шар-седло».

2. Разработанная и апробированная оригинальная методика стендовых испытаний трибосопряжения «шар-седло» шарового крана с помощью модернизированной четырехшариковой машины трения ЧМТ-1 и выводом результатов на экран, которая может быть использована для исследования материалов, применяемых в запорной арматуре.

3. Установленная функциональная зависимость износа трибосопряжения «шар-седло» от адгезионной составляющей коэффициента трения, позволяющая уже на стадии проектирования трибосопряжений прогнозировать их надежность.

4. Выявленные закономерности по влиянию адгезионной составляющей на трение и износ трибосистемы «шар-седло» позволили разработать технологические методы управления фрикционными свойствами данного узла трения.

Методы и методология диссертационного исследования.

Задачи, поставленные в работе, решались на основе системного подхода, включающего теоретические и экспериментальные исследования адгезионного контактного взаимодействия между поверхностями твердых тел, имеющих физическую (Ван-дер-Ваальсовы силы) и химическую природу, теории трения и износа, теории вероятности и математической статистики. При проведении экспериментальных исследований использовались стандартизированные и

известные достоверные методы триботехнических испытаний и оценки механических свойств. Для исследования структуры поверхностей трения использовалась металлографическая оценка, с помощью растровой микроскопии выполнялся микрохиманализ этих поверхностей. Достоверность и обоснованность полученных научных результатов подтверждена многочисленными экспериментальными данными.

Основные научные положения и результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту:

- закономерности влияния твердой основы из карбида титана TiC и износостойких покрытий на функциональные свойства тяжелонагруженных трибосопряжений (в том числе, шар-седло) из керамико-металлических материалов;

- положение, согласно которому износостойкие покрытия не только экранируют поры в керметах, но и препятствуют выходу на поверхности трения твердых включений TiC, этим самым снижая абразивно-механическое и окислительное изнашивание поверхностей трения и уменьшая суммарный износ трибосопряжений;

- подтвержденный экспериментальный факт зависимости суммарного износа тяжелонагруженных трибосопряжений, из керметов (с близкой по величине микротвердостью) от коэффициента β упрочнения адгезионных связей в виде степенной функции;

- закономерности формирования на поверхностях трения керметов вторичных структур в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, увеличивая изнашивание;

- установленное преимущественное влияние молекулярной (адгезионной) составляющей на величину коэффициента трения в трибосопряжении «шар-седло» из керметов на основе TiC.

Степень достоверности.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректной постановкой задач исследования: использованием современных представлений физической и химической природой адгезионного контактного взаимодействия.

Результаты экспериментального исследования получены с помощью растрового электронного микроскопа «JSM-6490LV», с помощью стандартизованных средств измерений (прошедших государственную проверку) и обработаны в соответствии с классическими соотношениями математической статистики и теории ошибок.

Личный вклад соискателя.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В перечисленных в автореферате работах соискателем, статья [14] подготовлена единолично. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работах [1;8;10;14] проведены эксперименты на трибометре и рассчитаны величины износа исследуемых пар трения с учетом твердости материалов трибосопряжений; в работах [2;4;6;13;14;16;17] проведена экспериментальная оценка триботехнических характеристик керамико-металлических материалов на основе карбида титана в различных условиях нагружения; [3;5;12] проведен анализ вопросов использования керамико-металлических материалов в запорной арматуре с учетом их триботенических характеристик; [11;17] обработаны результаты металлографического исследования и определена роль керметов в механизме формирования износа изучаемых трибосопряжений; [10] проведены экспериментальные исследования и обработаны результаты влияния нефтяной среды на триботехнические характеристики изучаемых керметов.

Реализация результатов работы.

Результаты работы используются при проектировании и изготовлении шаровых кранов ООО «МАРОМА Технологии» (г.Уфа).

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Научно-техническая

конференция «Трибология – машиностроению», проводившаяся институтом машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук, (г. Москва, 2014 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий» (г. Уфа, 2013 г., 2015 г., 2016 г.); Мавлютовские чтения: XIII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция (г. Уфа, 2015 г.); Мавлютовские чтения: Российская научно-техническая конференция (г. Уфа, 2016 г.); Интеллектуальная собственность XXI век – Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности глазами молодежи» (г. Уфа, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 11 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Механизмы машин, работающих в экстремальных условиях нагружения

Существует множество отраслей промышленности, в которых механизмы машин подвергаются интенсивному износу, в связи с экстремальными условиями работы. К таким механизмам относятся объекты авиа- и ракетостроения, энергетики, судостроения и машиностроения.

Детальями ответственного назначения в авиационной промышленности являются, например, лопатки газотурбинных двигателей. К абразивному износу лопаток приводит в основном запыленность атмосферы окружающей среды. На режим работы двигателя отрицательно влияет также повышенная влажность атмосферного воздуха, содержащая агрессивные компоненты, поэтому возникает опасность окисления поверхности лопаток. Основными видами их разрушения являются эрозийный, абразивный и коррозионный износ, механическая усталость материалов, которая сопровождается возникновением трещин и изменением конфигураций лопаток. Все вышеперечисленное оказывает отрицательное влияние на работу двигателя, его надежность и долговечность эксплуатации. Выбор материала для лопаток – решающий фактор в обеспечении безопасной работы газотурбинных двигателей.

Трубопроводная арматура для нефти и газа характеризуется тяжелыми условиями работы в абразивных средах под действием активных динамических нагрузок и изменением температуры. Частые поломки, трещины, потери герметизации вследствие изменения размеров и конфигурации запорных элементов арматуры приводят к выходу арматуры из строя.

Существуют еще множество деталей механизмов, которые используются в экстремальных условиях: пресс-формы для литья под давлением, пуансоны, матрицы, раскатные ролики для раскатки дисков турбин и многие другие детали нуждаются в прогрессивных технологиях получения изделий, в котором важным фактором является выбор наиболее подходящего материала.

Интенсивно изнашиваются также инструменты механической обработки деталей машин. Например, штамповые инструменты горячего деформирования работают при высоких температурах нагрева, подвергаются воздействию значительных сил деформирования, оказывает влияние также химическое воздействие со стороны деформируемого материала. Характер работы инструмента определяет тип разрушения поверхностных слоев: в основном это – трещины из-за резких перепад температур и напряжений в поверхностном слое штампа, а появление трещин сопровождается изменением первоначальных размеров и конфигурации инструмента. На поверхности рабочего инструмента происходит абразивный износ, сопровождающийся схватыванием взаимодействующих поверхностей и попаданием мелкодисперсных частиц на границу контакта. Тяжелые условия работы штампового инструмента предъявляют высокие требования к материалу, из которого изготавливают штампы. Металлические штамповые материалы в полной мере не отвечают высоким требованиям эксплуатации, так как приводят к быстрому износу и окислению поверхности материала. Керамика более устойчива к химическому взаимодействию и износу, но высокая хрупкость ограничивает ее применение.

Высокие требования к изделиям, работающим в экстремальных условиях, приводят к необходимости создания новых, более перспективных материалов, одним из которых является керамико-металлические композиционные материалы [51,88]. Применение этих материалов позволяет получить изделия, отвечающие требованиям конструкторско-эксплуатационных параметров и обеспечения заданных характеристик: таких, как пластичность при повышенной твердости и жесткости деталей машин.

Наиболее значимым механизмом в сфере нефтедобычи и нефтехимии – является трубопроводная арматура. Выбор типа запорной арматуры, параметры ее эксплуатации и подбор материалов сопряжений – первостепенные условия для безотказной и безопасной работы на всем комплексе системы транспортировки нефти.

Рассмотрим работу запорной арматуры более подробно.

1.1.1. Запорная арматура

Известно, что одной из главных основ экономики России является добыча, переработка и транспортировка нефти и газа [52]. Важным звеном нефтегазового комплекса является трубопроводный транспорт [32,52], который с каждым годом увеличивает свою протяженность и требует большого внимания к разработке и изготовлению устройств, называемых трубопроводная арматура, для управления потоками транспортируемых рабочих сред.

В истории производства арматуры скачок развития произошел после изобретения паровой машины. Создание дискового поворотного затвора, клиновой задвижки, параллельной задвижки [62] привело к совершенствованию арматуры и созданию литейно-арматурных заводов, что уже в начале XX века Россию выводит на 5-6 место в мире по общему объёму промышленного производства.

По выполняемым функциям трубопроводная арматура делится на три основных класса [32,56]: запорная, регулирующая и предохранительная. Запорная арматура в зависимости от требований рабочих сред предназначена для отключения или включения потока среды. Регулирующая – предназначена для изменения давления или расхода рабочих сред. Предохранительная арматура предотвращает аварийное повышение давления в обслуживаемой системе. К запорной арматуре относятся клапаны, краны, поворотные и шаровые затворы, задвижки. Они составляют 80 % [32,62,94] от общего производства всех изделий трубопроводной арматуры.

Эксплуатационные характеристики, надежность трубопроводной запорной арматуры оказывает значительное влияние на эффективность технологических процессов в различных производствах. Вид и требования к запорной арматуре определяются конкретными условиями и особенностями технологического процесса, свойствами и температурным режимом окружающей среды и трубопровода, нагрузками в системе, габаритными размерами и массой. Например, в горной металлургии в технологических линиях при переработке

руды и транспортировке абразивосодержащей пульпы затворы подвергаются интенсивному износу и быстро теряют работоспособность. В нефтехимпереработке при каталитическом крекинге углеводородного сырья запорная арматура эксплуатируется в еще более жестких условиях, связанных с дополнительным воздействием высоких (до 700 °С) температур и вибронагрузок из-за больших скоростей газового потока, содержащего алюмосиликатные абразивные частицы, что предопределяет их низкий ресурс.

Очень важно учитывать ремонтпригодность в обслуживании, без выемки арматуры из трубопровода и полной разборки, надежность эксплуатации и долговечность работы.

Герметичность затвора – это свойство арматуры препятствовать газовому и жидкостному обмену между средами, исключить утечки среды в окружающую среду. Герметичность достигается отсутствием зазора между разъемными соединениями арматуры, уплотнения подразделяют на основные группы – сальниковая, сильфонная, мембранная и шланговая. Сальниковое уплотнение обеспечивает герметичность штока, шпинделя и другого подвижного элемента относительно окружающей среды. Благодаря своим упругим свойствам может расширяться и сжиматься, обеспечивая плотное заполнение пространства зазора между стенкой и штоком. Сальниковое уплотнение изготавливается из различных материалов, позволяющих обеспечить необходимую герметичность, имеет простую конструкцию, легко ремонтируется и имеет низкую цену [94]. Поэтому является наиболее распространенным уплотнением среди всех групп. Мембранная набивка называется диафрагмой. Герметичность обеспечивается благодаря и мембране, которая выполняется в виде упругого диска или эластичного материала, исполняющего функцию уплотнения корпусных деталей, подвижных элементов относительно окружающей среды. Однако, мембранные уплотнения имеют ограниченные пределы применения по рабочим давлениям и температурам, характеризуются малым сроком службы. В шланговой арматуре герметичность осуществляется благодаря сжатию эластичного шланга. В сильфонной арматуре исключение протечки рабочей среды в атмосферу

достигается гофрированной трубой [56] под названием сильфон. Герметичность сохраняется на всем протяжении срока службы арматуры. Сильфонные узлы имеют сложную конструкцию и высокую стоимость, что приводит к ограниченному использованию данного уплотнения.

По принципу действия трубопроводную арматуру подразделяют на: на управляемую с ручным управлением, приводную и автоматического действия. В управляемой и приводной арматуре передвижение рабочего органа осуществляется приводом за счет внешнего силового источника энергии или при помощи энергии рабочей среды. Автоматически действующая трубопроводная арматура работает только под воздействием рабочей среды без каких-либо посторонних источников энергии.

В работе [59] по конструкции присоединительных патрубков арматуру подразделяют на несколько групп: фланцевую, муфтовую или цапковую, штуцерную и сварную.

Фланцевая имеет на присоединительных концах – детали квадратной или круглой формы с равномерно расположенными отверстиями под болты и шпильки. Фланцевая арматура обеспечивает прочное и герметичное соединение друг к другу. Фланцевое соединение используется в местах, где требуется регулярный ремонт и замена деталей. Отличается простотой и надежностью. Вместе с тем фланцевое соединение трудоемко при изготовлении и сборке, имеет большие габариты и вес.

Муфтовое соединение используется для малых и средних диаметров трубопроводной арматуры. При выполнении соединения с помощью муфт происходит истончение стенок труб за счет нанесения внутренней резьбы соответствующего диаметра арматуры, поэтому данный тип соединения рекомендован для труб с большой толщиной стенок. Соединение очень просто в изготовлении, надежно герметизируется и не требует дополнительных присоединительных конструкций. Однако нарезание резьбы сопровождается уменьшением толщины стенок, которое ведет к уменьшению срока службы и прочности. Такое соединение используется в арматуре с низкими и средними

давлениями. Цапковое соединение с наружной резьбой под накидную гайку может работать при высоких давлениях.

Штуцерное соединение имеет наружную резьбу на присоединительном конце арматуры, присоединяемой к трубопроводу при помощи гайки. В качестве уплотнения используют прокладки.

Для больших диаметров используют соединение сваркой. Преимуществами сварки является полная герметичность и минимум обслуживания. К недостаткам относится сложность ремонта и замены арматуры.

Надежность работы трубопроводной арматуры оказывает значительное влияние на эксплуатационные системы важных отраслей промышленности, основными из которых являются нефтяная, газовая, химическая, нефтехимическая, металлургическая и горная промышленности. Все эти отрасли характеризуются особыми условиями труда, определяющимися высокими давлениями и температурами, работой в коррозионных, токсичных, вязких, абразивных и взрывоопасных средах. Поэтому большое внимание уделяется исследованию технологии ее изготовления, конструктивных особенностей и эксплуатационных характеристик для создания качественных изделий.

1.1.2 Конструктивные особенности запорной арматуры

На метод монтажа, ремонта, эксплуатации изделия оказывают влияние конструктивные характеристики арматуры. К этим характеристикам относятся: строительная длина и высота арматуры, тип фланцев, вид уплотнения, метод управления арматурой, диаметр прохода и диаметр отверстия в седле.

Одни и те же функции могут выполняться разными типами арматуры. В *завдвижках* имеются затворы в виде диска или клина, перемещающего возвратно-поступательно в направлении, перпендикулярном оси потока среды. Задвижки обычно используют на крупных трубопроводах с условным проходом от 50 до 2000 мм при рабочем давлении 0,16-20 МПа [54,56] и температурах среды до 550°C.

Общий вид задвижек представлен на рис. 1.1. Элемент запора 7 может находиться в крайних положениях – «открыто» и «закрыто». Присоединительные концы находятся с двух сторон и имеют фланцевое или муфтовое соединение. При вращении шпинделя 2 затвор перемещается в нужном направлении, перпендикулярном направлению оси потока среды. Герметичное перекрытие потока осуществляется благодаря уплотнению 8.

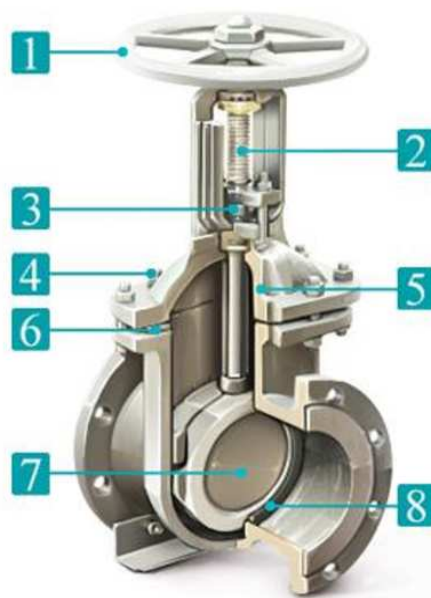


Рисунок 1.1 Устройство задвижки [62]: 1 – маховик; 2 – шпиндель; 3 – прижимная втулка; 4 – резьбовые соединения; 5 – корпус съемной головки; 6 – прокладка; 7 – запорный элемент; 8 – уплотнение.

В работе [62] по типу затвора задвижки подразделяются на: клиновые, параллельные и шиберные. Седло в клиновой задвижке представляет две кольцевые поверхности, которые располагаются под углом друг к другу, а затвор имеет вид клина. Затворы бывают однодисковые, двухдисковые и упругие. В параллельной задвижке седла параллельны друг к другу и перпендикулярны направлению движения потока среды. В шиберной задвижке запирающий элемент имеет вид шибера. Такая задвижка используется при одностороннем потоке среды с малой герметичностью.

В работе [62] по типу шпинделя задвижки подразделяются на выдвигные и невыдвигные. При выдвигном типе резьбы шпинделя и ходовой гайки

расположены снаружи корпуса. Такая конструкция имеет ряд достоинств, из которых следует отметить легкость технического обслуживания и малый износ сальникового уплотнения. Но из-за выхода шпинделя за габариты крышки на размер, равный диаметру прохода, при монтаже требуется увеличение рабочей площади.

Из-за того что с невыдвижным шпинделем имеют малую высоту, они подходят для подземных коммуникаций. Но из-за постоянного нахождения резьбы шпинделя в рабочей среде, возникают сложности монтажа. Резьба подвергается интенсивному износу и коррозии. Это делает использование таких задвижек нецелесообразным для агрессивных сред и объектов ответственного назначения.

Применение задвижек в трубопроводной арматуре имеет ряд преимуществ: простота конструкции; небольшие строительные габариты; отсутствие поворота потока рабочей среды приводит к малому коэффициенту сопротивления; симметричность конструкции позволяет эксплуатировать задвижки при любом направлении движения подачи среды; малое усилие для привода затвора; возможность применения затворов для вязких потоков.

Но имеются и некоторые сложности, а также недостатки при эксплуатации задвижек: выдвижной шток увеличивает габариты; большая скорость его срабатывания может вызвать гидравлический удар; невозможность применения для потоков с твердыми включениями, которые приводят к активному абразивному износу и снижению герметичности затвора.

Задвижки используются ограничено в условиях повышенной коррозии или агрессивности среды вследствие быстрого изнашивания сальникового уплотнения и большой площади соприкосновения транспортируемого материала.

Разновидностью запорной арматуры являются также **клапаны**. Отличие клапанов от задвижек состоит в том, что их запорный элемент движется возвратно-поступательно, параллельно направлению оси потока рабочей среды [56,62,94], а не перпендикулярно.

Наиболее простая конструкция односедельного клапана представлена на рис. 1.2. За счет передачи усилия от маховика с помощью шпинделя к затвору часть проходного сечения перекрывается. Закрытие потока среды осуществляется золотником, который плотно садится в седло, и давление в трубе устанавливается на нулевом уровне. Исключение утечки потока в окружающую среду достигается уплотнительным сальфонным кольцом. Присоединение к трубопроводу осуществляется фланцами с двух сторон. Среда подается под золотник.

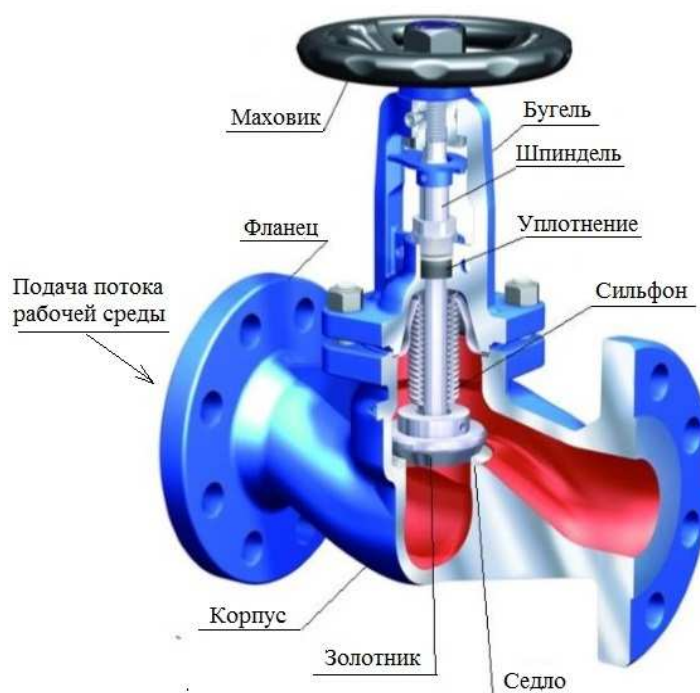


Рисунок 1.2 Односедельный запорный клапан [62]

По типу корпуса запорные клапаны делятся на три вида: прямоточные, угловые и проходные. По конструкции клапаны подразделяются [56,62] на: мембранные, шланговые и золотниковые.

Мембранные клапаны имеют упругие деформируемые затворы, сделанные из резины. Упругая гибкая мембрана прогибается при приложении усилия в перпендикулярном направлении оси потока рабочей среды. Их главным преимуществом является полная герметичность, отсутствие «застойных зон», небольшое сопротивление потоку [62], поэтому часто данные конструкции устанавливают для вязких или пастообразных суспензий, либо ядовитых веществ.

Мембранные клапаны имеют ограниченное использование из-за сравнительно невысоких рабочих температур и давлений.

Для управления потоками абразивных, гранулированных, агрессивных сред используются шланговые затворы. Перекрытие потока среды осуществляется пережатием эластичного патрубка в шланговой задвижке при помощи одной или двух пластин внутри корпуса шлангового затвора. Благодаря большой площади пережатия и эластичности шланга обеспечивается высокая герметичность затвора.

Золотниковые клапаны в зависимости от конструктивного исполнения уплотнительной поверхности могут быть конусными, плоскими, сферическими [62].

Плоские уплотнения могут использоваться в жидких и газовых средах без содержания взвешенных частиц. Конусные же, наоборот, могут использоваться в рабочей среде со взвешенными частицами и при высоких давлениях. Сферические клапаны имеют высокую устойчивость к истиранию и эрозии, поэтому применяются в горнодобывающей промышленности и металлургии.

Клапаны могут работать при высоких перепадах давления, имеют при этом малый ход запорного органа и возможность установки в любом пространственном положении. Конструкции их очень просты, поэтому имеют малую массу и габаритные размеры, легко обслуживаются и ремонтируются в эксплуатационных условиях.

В клапанах важное значение имеет направление подачи рабочей среды, оно обычно подается только в одном направлении «под затвор» (рис. 1.2). При перекрытии потока сред требуются большие усилия для герметизации прохода, но этот недостаток компенсируется возможностью ремонта сальника без отключения линии. Если среда подается по правому каналу, то его называют «на затвор» [58]. В конструкции «на затвор» сальник постоянно находится под действием полного давления, что исключает возможность ремонта на рабочей линии.

Кран представляет собой вид запорного устройства, которое имеет затвор в виде пробки с отверстием для прохода потока среды. Пробка приводится во вращение вокруг своей оси, перпендикулярной оси потока среды. Направление

движения потока среды в кранах может быть произвольным. Кран открыт, когда поток может проходить через отверстие. При этом ось открытия совпадает с осью трубопровода. Если ось отверстия перпендикулярна оси потока, то кран закрыт. Для открытия крана достаточно повернуть пробку на 90° .

В работах [56,94] краны в зависимости от формы тела вращения подразделяются на три типа: конусные, цилиндрические, шаровые.

В конусных кранах величина угла конусности пробки определяется в зависимости от требуемого удельного давления на уплотнительных поверхностях, для обеспечения герметичности. Но при этом возникает опасность появления задиров и заклинования. Поэтому для антифрикционных материалов деталей кранов оптимальным является соотношение угла крана 1:7. Для деталей других материалов - 1:6.

Конусные краны по конструктивным особенностям подразделяются [56,62] на натяжные, краны со смазкой, сальниковые, краны с прижимом (или подъемом) конусной пробки.

Достоинством сальникового крана является обеспечение надежной защиты [62] от протечки среды в атмосферу. Герметичность крана обеспечивается задвижкой сальника за счет большого давления, уплотнения в корпусе набивки. Но такие краны требуют постоянного обслуживания из-за быстрого износа набивки и необходимости смены набивки сальника.

Существуют два типа натяжных кранов в зависимости от способа создания удельного давления – с резьбовым соединением и с пружиной. В быту применяются краны с резьбовым соединением благодаря простоте конструкции и удобству использования. Краны с пружиной применяются для сыпучих и вязких сред, не требующих высокой герметичности. Такие краны используются лишь для низких рабочих давлений из-за отсутствия уплотнительных устройств.

В конструкции кранов со смазкой во избежание коррозии и задира контактирующих поверхностей имеются канавки, заполняемые смазывающими материалами. Их заполнение обеспечивает снижение давления и усилия для поворота пробки. В процессе работы смазка выдавливается и ее требуется

периодически добавлять. Данные краны не используются для проходного сечения потока среды более 300 мм.

В кранах с подъемной пробкой [56] открывание и закрывание прохода производится в два приема: сначала поднимают пробку на высоту, достаточную для устранения трения и износа уплотнительных поверхностей, затем пробку поворачивают на 90° и опускают, прижимая к корпусу. Такая конструкция помогает устранить крутящий момент, необходимый для поворота пробки, и прижатие пробки может регулироваться в широких диапазонах, в независимости от степени уплотнения сальника. Но сложность конструкции, большие габаритные размеры и высокая масса ограничивают область применения кранов с подъемной пробкой.

Второй вид кранов цилиндрический. Их конструкция проще, чем у конусных, но они имеют существенные недостатки. При использовании потоков горячих сред, пробка и корпус расширяются под воздействием температур, и происходит заклинивание. Металлическое уплотнение в таких кранах требует высокой точности обработки поверхностей, чтобы обеспечить небольшой натяг или минимальный зазор. Поэтому требуется тщательное обслуживание уплотнительных поверхностей и использование смазок. Применение цилиндрических кранов в настоящее время ограничено — они уступают таким более совершенным по конструкции видам, как шаровые [56] или конические краны.

Шаровые краны являются наиболее распространенным типом запорной арматуры и имеют ряд преимуществ перед другими кранами благодаря сферической форме затвора - это малые габариты и масса, простой монтаж и обслуживание крана. При изготовлении шарового крана даже при некотором несовпадении радиуса сферы пробки и уплотнительного кольца, обеспечивается достаточно плотный контакт поверхностей. В конических кранах сложно обеспечить одинаковую конусность корпуса и пробки, поэтому усложняется процесс изготовления. Высокая герметичность, прочность, жесткость и низкое

гидравлическое сопротивление шарового крана дают ему явное преимущество по сравнению с другими запорными устройствами.

Конструкция шарового крана представлена на рис. 1.3. В корпусе 2 находится вращающийся шар 3, который имеет отверстие и через него проходит рабочий шток 1. Два уплотнительных кольца 4 удерживают шар крана в корпусе. Поворотом рукоятки на 90° кран открывает поток рабочей среды, либо перекрывает поток. Ручка крана устанавливается в линию с осью трубы, когда клапан открыт, а если ручка находится под прямым углом к оси трубы, то клапан закрыт. Соединение с трубопроводом осуществляется фланцем 5.

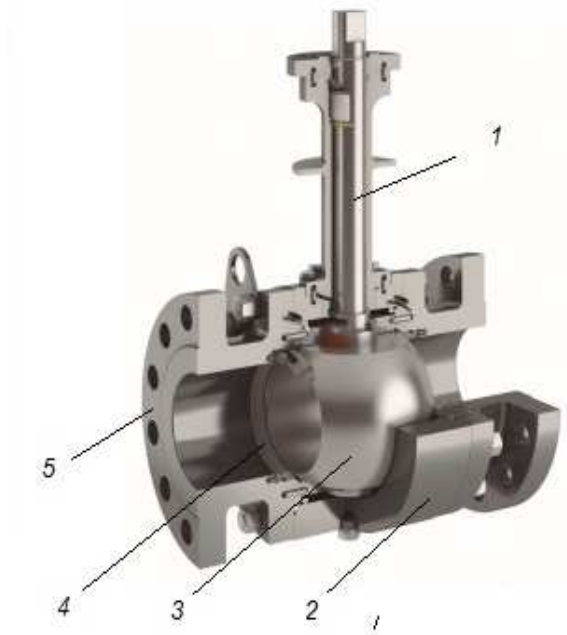


Рисунок 1.3 Конструкция шарового крана [62]:
1 – шток; 2 – корпус; 3 – шар; 4 – седло; 5 – фланец.

Шаровые краны можно разделить на полнопроходные, стандартные и неполнопроходные. Пропускная способность крана определяется [62] отношением площади сечения отверстия в шаре крана к площади сечения подводящего трубопровода. Соотношение полнопроходного крана составляет 90-100 %, стандартного 70-80 %, неполнопроходного 40-50 %. По экономическим показателям неполнопроходные краны самые дешевые, а самыми дорогими являются полнопроходные из-за большого проходного сечения. Но высокая стоимость полнопроходных кранов компенсируется их преимуществами: долгим

сроком службы, отсутствием требований по уходу, отсутствия необходимости подтягивания или смазки, быстрым монтажом и низкими эксплуатационными расходами которые обеспечивают их использование в промышленности.

По конструктивным признакам шаровые краны делятся [58,62] на краны: с плавающей пробкой и с плавающим кольцом. Плавающая пробка свободно перемещается относительно шпинделя. При перепаде давления в среде пробки плотно прижимается к уплотнительному кольцу со стороны выходы и обеспечивает тем самым герметизацию. При больших проходных сечениях нагрузка от пробки на кольцо увеличивается, что затрудняет работу крана. Поэтому краны с плавающей пробкой изготавливаются, обычно, с номинальным диаметром не более 200 мм. Иногда в таких кранах плавающими являются кольца. В конструкции кранов с плавающими кольцами пробка имеет осевой выступ в нижней части, который входит в специальное углубление, а кольца-седла под действием давления прижимаются к ее сферической поверхности пробки. Такая конструкция уменьшает силы для поворота крана, но высокие требования к точности изготовления увеличивают его стоимость и ограничивают в использовании.

Еще одной разновидностью арматуры является так называемый **дисковый затвор**. В этом затворе запирающий элемент имеет форму диска, вращающегося вокруг собственной оси. Если седло находится перпендикулярно направлению оси потока среды, то оно перекрывает поток. Для открытия необходимо шар повернуть на 90°. На рис. 1.4 представлена конструкция дискового затвора. На верхней части штока прикреплены маховик и рукоятка. Благодаря им поворотный диск, прикрепленный к штоку, от рукояти вращается внутри корпуса вокруг собственной оси. Седловое уплотнение чаще всего выполнено в виде резинового кольца, которое обеспечивает полную герметичность конструкции в любом направлении потока рабочей среды.

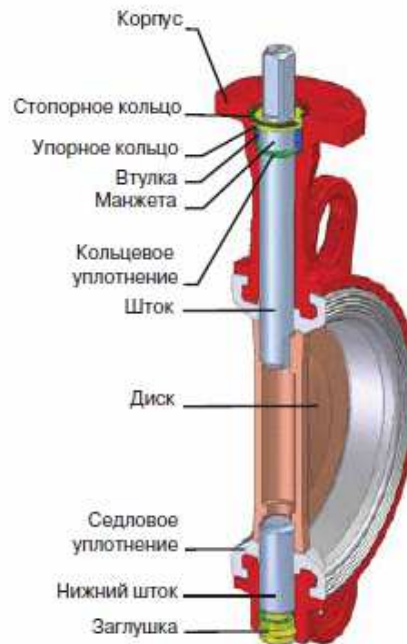


Рисунок 1.4 Конструкция дискового затвора [62]

Дисковые затворы могут использоваться с трубами любого типа и любого диаметра [62], имеют очень малые габариты и массу, легко монтируются, не требуют дополнительной смазки или дополнительного ухода. Для труб большого диаметра ручное управление заменяется механическим приводом с редуктором, который увеличивает крутящий момент на оси заслонки и тем самым облегчает управление.

Дисковая заслонка находится непосредственно в зоне движения рабочей среды, что нарушает естественную турбулентность потока и снижает пропускную способность крана. Применение дисковых затворов ограничено из-за непригодности данной конструкции к работе при высоких и средних давлениях в рабочей среде.

Из рассмотренных конструктивных исполнений запорной арматуры для экстремальных условий нагружения наиболее приспособленными являются задвижки, клапаны и шаровые краны. Они обеспечивают высокую герметичность затвора, имеют относительно малые габариты и вес, ремонтпригодны и просты в обслуживании рабочих элементов. Далее будем рассматривать только эти три вида конструктивного исполнения арматуры.

1.1.3 Эксплуатационные условия работы

Основными параметрами эксплуатационных характеристик запорной арматуры являются: давление, температура, пропускная способность, время срабатывания, крутящий момент, который необходим для управления арматурой.

Важным параметром работы арматуры является давление среды. Обычно рассматривают три вида давления [29]: рабочее P_r , условное P_y , пробное P_{np} .

Условное давление P_y соответствует максимальному давлению, которое при температуре среды 20 °С обеспечивает безопасную и длительную работу арматуры и других узлов трубопровода. Для выбранных материалов деталей арматуры расчетом на прочность при температуре 20 °С определяется размеры арматуры и ее соединительных частей. Расчетные значения условных давлений указаны в ГОСТ 356-80.

В зависимости от величины условного давления рабочей среды различают [32,62] следующие основные группы давлений: 1) вакуумная (давление ниже 0,1 МПа); 2) малое давление (от 0 до 1,6 МПа); 3) среднее давление (от 2,5 до 29 МПа); 4) высокое давление (от 16 до 80 МПа); 5) сверхвысокое давление (от 100 МПа и выше).

Заданный режим эксплуатации арматуры и ее частей определяется рабочим давлением P_r , которое соответствует его максимальному значению. Условное давление арматуры должно быть больше рабочего, так как прочность большинства материалов деталей арматуры уменьшается с повышением температуры. Величина условного давления обычно превышает рабочее давление на величину, около 5 %.

Пробное давление P_{np} соответствует избыточному давлению, при котором арматуру и соединительные части трубопроводов подвергают гидравлическому испытанию водой на прочность и плотность при температуре не выше 100 °С. Отклонение пробного давления должна находится в пределах ± 5 %.

Температура среды соответствует температуре, в которой эксплуатируется арматура в течение длительного времени. По этой температуре арматуру разделяют [32] на несколько видов: 1) криогенная – для эксплуатации при температурах ниже 153 °С; 2) для холодильной техники – для температуры выше 153 °С; 3) обычная – ее выпускают для различных диапазонов температур в зависимости от материала арматуры: для нормальных и повышенных температур ($\approx$ до + 450 °С); для высоких температур от 450 до 600 °С; для сверхвысоких от 600 °С и выше.

Принято условным диаметром прохода D_y арматуры и трубопровода называть номинальный внутренний диаметр отверстия в арматуре, являющийся проходом для рабочей среды. В зависимости от размера условные диаметры подразделяют [50] на пять групп: «сверхмалых размеров (до 5 мм); малых размеров (от 6 до 40 мм); средних размеров (от 50 до 300 мм); больших размеров (от 350 до 1200 мм); сверхбольших размеров (от 1400 мм и выше)».

Фактический проходной диаметр трубопровода не всегда совпадает со стандартными значениями диаметра условного прохода арматуры. Арматура может быть с сужением проходного сечения, то есть диаметр меньше проходного диаметра трубопровода, либо, наоборот, – с увеличением условного прохода.

К эксплуатационным характеристикам относят также режимы и условия, в которых будет использоваться арматура. Для работы в особых условиях, а именно в нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах, к промышленным арматурам предъявляются ряд важных требований [32,56]: коррозионная стойкость материала корпусных деталей, затвора и уплотнений, герметичность затвора для сальниковых и прокладочных уплотнений, взрывобезопасность. Такие параметры как долговечность, надежность, герметичность, ремонтпригодность имеют решающее значение при выборе типа арматуры. Надежность арматуры определяется ее безотказностью, способностью выполнять требуемые функции в течение длительного периода работы. Долговечность определяется способностью сохранять рабочие характеристики до предельного состояния с перерывами для технического обслуживания и ремонта. Надежность и долговечность

ограничивается такими характеристиками как коррозионная стойкость и износ деталей арматуры.

1.2 Материалы, используемые для деталей арматуры

1.2.1 Традиционные материалы для деталей запорной арматуры

Требования к материалам корпуса и затворного узла определяются условиями эксплуатации [30], которые характеризуются рабочим давлением, химическим составом и свойствами рабочей среды. Эти материалы должны обеспечивать арматуре коррозионную стойкость, прочность, пластичность, стойкость к ударам и вибронагрузкам.

В промышленном производстве, особенно в сфере нефтехимпереработки, запорная арматура эксплуатируется в экстремальных условиях нагружения под воздействием высоких температур и давлений среды.

Элементы затворного узла находятся в наиболее жестких условиях и подвергаются интенсивному износу, поэтому для обеспечения высоких характеристик в агрессивных средах с повышенной температурой (400 °C и выше) предъявляются ряд требований к материалу узла: высокая твердость, износостойкость и прочность, малый коэффициент трения в затворе, стойкость против термических и механических ударов.

Для изготовления арматуры [32,94] используют чугун, углеродистую сталь или коррозионностойкую сталь, титан, цветные сплавы и керамику.

Серый чугун хорошо обрабатывается, но использовать для деталей ответственного назначения не рекомендуется вследствие малой стойкости к ударным нагрузкам. Белый чугун имеет высокую твердость и износостойкость, но плохо поддается механической обработке, соответственно использовать его для производства деталей сложной конфигурации и высокой чистоты поверхности конструктивно сложно. Белый чугун не используется в трубопроводной арматуре.

Ковкий чугун имеет хорошие пластические и коррозионные свойства, сопротивление удару, по сравнению с другими видами чугуна имеет повышенную прочность при растяжении. Высокопрочный чугун получают путем добавления модификатора, они обладают хорошими механическими характеристиками. Высокопрочный чугун иногда заменяет сталь, которая работает при температуре до 300 °С [33,94]. Однако для работы в условиях повышенных температур и абразивосодержащих сред арматуру из данного вида чугуна не изготавливают.

Сталь обладает достаточной пластичностью [94], прочностью, легко поддается механической обработке и подходит для деталей ответственного назначения. Часто для придания большей твердости, прочности, износостойкости и других важных свойств, сталь легируют, то есть добавляют в расплав ряд других элементов. Легирование осуществляется хромом, марганцем, никелем, кобальтом. Например, введение в сплав 12 % хрома повышает антикоррозионные свойства, при повышении содержания хрома до 12-14 % и более получают нержавеющие стали. Коррозионностойкость также повышается добавлением молибдена, меди для кислых сред с высокими температурами. Никель повышает кислотостойкость.

Стали и сплавы можно подразделить [94] на три основные группы: коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные.

Коррозионностойкие сплавы применяются для деталей запорной арматуры, работающих в агрессивных средах. Они характеризуются стойкостью к коррозии в несложных промышленных условиях эксплуатации, в том числе нефтяной, газовой, машиностроительной отраслях.

Детали из **жаростойких** сплавов могут работать в агрессивных средах слабонагруженных конструкций при температурах выше 550 °С. Они отличаются стойкостью к химическому разрушению в высокотемпературных средах.

Детали из **жаропрочных** сплавов обладают хорошей механической прочностью и жаростойкостью, работоспособных при высоких нагрузках и температурах.

Детали из нержавеющей жаропрочных сталей [32,94] типа 12X18Н9Т, 12X18Н10Т, 08X18Н10Т работают в щелочных и криогенных средах, в азотной, фосфорной и серной кислотах. Работоспособны при температурах в пределах от $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для установок нефтяного и газового производства используют стали типа 20Х5ТЛ с диапазоном рабочих температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 10Х18Н9Л с диапазоном рабочих температур $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [94].

Широкое применение сталей для производства арматуры определилось их дешевизной и доступностью. Стали легко поддаются механической обработке, работают в широком диапазоне температур и устойчивы к агрессивным средам. Однако, наряду со всеми явными преимуществами обладают и недостатками. Стальная арматура при работе в потоке среды с абразивными частицами быстро изнашивается и теряет свою начальную герметизацию, а это приводит к протеканию среды и потере надежности запорного элемента. Поэтому стальная арматура требует частой замены затворного узла и приостановления эксплуатации технологической линии на несколько часов.

Достоинством коррозионностойких и жаропрочных сплавов является то, что они сохраняют свои механические характеристики при высоких рабочих температурах. В запорной арматуре применяются сплавы [94]: ХН28ВМАБ с допустимой температурой до $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$, ХН70ВМЮТ, ХН60ВТ, ХН62МВКЮ с рабочей температурой до $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пределом прочности на растяжение $\sigma_{\text{в}} = 1000\text{--}1100\text{ МПа}$.

Перспективным материалом в арматуростроении [2] является **техническая керамика**. Керамика долговечна, имеет малый коэффициент трения, демонстрирует высокие коррозионные способности, обладает высоким электрическим сопротивлением. По сравнению со стальными затворами и задвижками керамические материалы имеют ряд преимуществ. Во – первых, применение керамики исключает схватывание и задиры запорных элементов, что облегчает управление арматурой и снижает усилие на затвор. Во – вторых, керамические материалы работают в диапазоне температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до

+ 800 °С. В – третьих, они устойчивы в агрессивных и абразивных средах. В – четвертых, могут работать при высоких давлениях до 40 МПа.

Основные керамические материалы [2], которые используются для арматуры, – это Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC и Si_3N_4 . Керамические материалы имеют высокую твердость и износостойкость, а срок службы по сравнению со стальными затворами увеличивается до 6 раз. Но из-за существенных недостатков керамика имеет малый объем производства в России. Изготовление керамических затворных элементов очень трудоемко [59]. Например, для изготовления сложнопрофильных изделий требуется высокая точность и качество заготовки, что сложно получить в процессе спекания порошков. Еще одним важным и существенным недостатком является низкая стойкость против механических и термических ударов, которые приводят к образованию трещин и разгерметизации затвора.

Важным фактором при выборе арматуры является сохранение высоких прочностных свойств материала вместе с ее пластичностью. В настоящее время металлические и керамические материалы не могут обеспечить в полной мере необходимые требования для экстремальных условий нагружения арматуры. Высокий комплекс требований к эксплуатационным характеристикам технических систем [1] привел к созданию **композиционных материалов**. Они имеют важную отличительную особенность – способность изменять свойства в широком диапазоне в зависимости от требуемых характеристик и обладают комплексом уникальных функциональных возможностей. Однако, получение традиционными способами металло-керамических композиционных материалов (кермет) имеет ряд недостатков, таких как высокая пористость, сложная обрабатываемость и трудоемкость изготовления.

Вследствие сложности изготовления композиционных материалов, появились предложения использовать **многослойные керметные покрытия**. Такие покрытия предложены в США, наносимые на стальные изделия с никелевой связкой. Покрытие наносится от 3 до 8 слоев, позволяющих увеличить твердость и повысить износостойкость шаровых кранов. Но из-за разности

свойств покрываемого материала и покрытия, часто возникают трещины и отслоения наносимого кермета. В России использование керметных покрытий не нашло широкого применения, вследствие высокой стоимости, чаще используются в отраслях нефтяной промышленности за рубежом [59].

Перспективным материалом для деталей трубопроводной запорной арматуры является **керамико-металлический композиционный материал** – кермет – на основе карбида титана (TiC) с металлической жаропрочной связкой ЖС6У или ВЖЛ14Н. Мамлеевым Р.Ф.[59,66] предложена новая технология получения керметов для шаровых затворных узлов нефтяной промышленности, которая позволяет упростить процесс изготовления керметов, а также увеличить срок службы и сократить стоимость в производстве запорной арматуры. В керамико-металлическом композиционном материале достигается уникальный комплекс служебных характеристик за счет твердости тугоплавкого керамического и пластичности металлического компонентов. Создание керамико-металлических композиционных материалов и исследование их эксплуатационных характеристик является одним из актуальных направлений функционального материаловедения.

1.2.2. Особенности технологии получения

Создание новых композиционных материалов является неотъемлемой частью развития техники. Для изготовления высоконагруженных сопряжений, работающих в агрессивных средах, одним из главных вопросов остается выбор рационального технологического процесса [88] для получения деталей из керамико-металлических материалов.

Существуют разные способы изготовления керамико-металлических композиционных материалов. Самым распространенными методами являются горячее прессование, спекание, экструзия и пропитка[51,88]. Технологический процесс получения материала определяется [88] исходной структурой и

свойствами использованного материала и требованиями к данной конструктивной заготовке.

Для получения керамико-металлического композиционного материала – кермета – наиболее приемлемым является метод пропитки. Преимущество заключается в получении отливок высокого качества сложной конфигурации. Сложность процесса заключается в регулировании температуры взаимодействия материалов на границе фаз и подбора компонентов, обеспечивающих смачивание тугоплавкого компонента расплавом, являющимся менее тугоплавким компонентом [88]. Керметы, полученные методом пропитки, имеют плохие показатели ударной вязкости и стойкости к образованию трещин. Поэтому этот метод не нашел применения при изготовлении заготовок деталей запорной арматуры.

Получение изделий методом спекания при одновременном воздействии давления и температуры называют горячим прессованием. Преимущество этого метода заключается в получении беспористых изделий при существенном сокращении времени спекания и сохранения первоначального химического состава прессуемых веществ. Однако для тонкостенных и сложнопрофильных изделий этот метод не пригоден [51,88]. Даже при явных достоинствах этого метода – процесс малопродуктивный.

Следующими методами получения керметов являются экструзия и прокатка. Технологический процесс экструзии заключается в пропуске вязкого материала через формующее отверстие для получения прутков заданных размеров. Получение листов и труб производится путем пропускания нагретого материала через прокат [88]. Использование данных методов для изделий сложных конструкций не пригоден.

Одним из распространенных методов получения керамико-металлических композиционных сплавов является спекание. Технологический процесс сопровождается нагреванием порошков до температуры, необходимой для создания твердого каркаса из керамической составляющей композитного материала и дальнейшей инфильтрацией каркаса металлом.

Предложено несколько вариантов технологии получения и применения композита «карбид титана - металл». Наиболее простая из них предусматривает выполнение следующих операций [66].

1. Изготавливается по известной технологии оболочковая форма по выплавляемой модели (рис. 1.5 а), соответствующей размерам композитного изделия или образца с рабочей полостью.

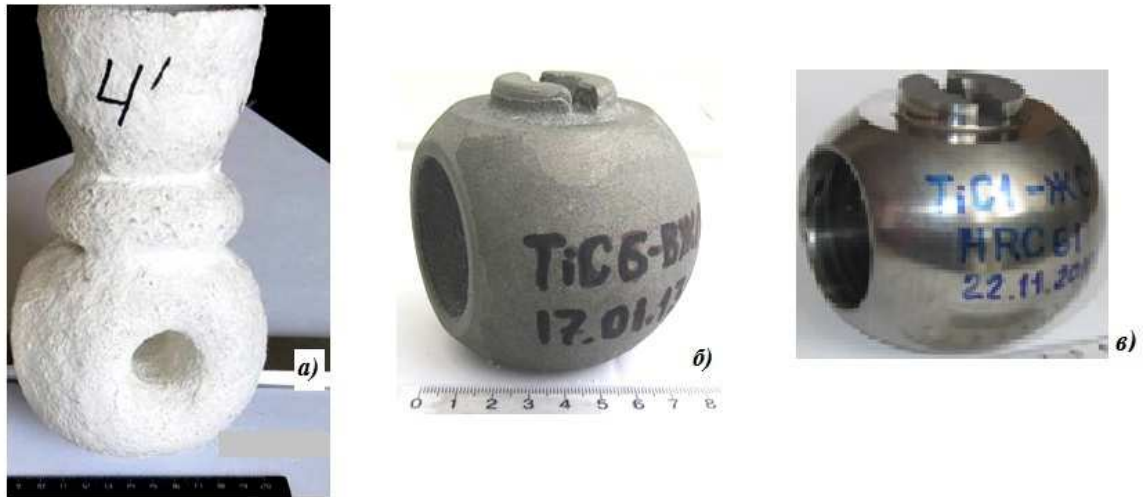


Рисунок 1.5 Получение заготовки шарового затвора: а) огнеупорная оболочковая форма; б) полученная заготовка; в) шаровой затвор после механической обработки.

2. Полость формы полностью заполняется порошком карбида титана.
3. Оболочковая форма устанавливается на стол вибрационной установки и после ее включения уплотняется в течение 1...1,5 минуты при частоте и амплитуде колебаний стола, равным соответственно 40-45 Гц и 0,8 мм.
4. Форма устанавливается в печь подогрева в камере вакуумной плавильной установки. После этого установка вакуумируется до остаточного давления в камере 0,1-0,15 Па, осуществляется нагрев оболочки до температуры 1400-1450°C, в ходе которого происходит предварительное спекание порошка TiC.
5. Навеска металла, помещенного в тигель установки, расплавляется и заливается в форму. Расплав за счет сил гидростатического и капиллярного давления инфильтруется через поры в порошке TiC и постепенно полностью

заполняет рабочую полость, оформляя тем самым, контуры композиционного изделия.

6. Установка после этого выключается, оболочковая форма охлаждается до комнатной температуры и разрушается. Извлеченная из формы заготовка композиционного изделия подвергается механической обработке для получения необходимых размеров (рис. 1.5 б).

Изготовление керамико-металлических композиционных материалов данным методом позволяет все технологические процессы (такие как виброуплотнение, спекание в неокислительной среде, инфильтрация каркаса карбида титана металлом), проводить в огнеупорной оболочковой форме. Таким образом облегчается процесс получения кермета [66]. Такой метод изготовления изделий по выплавляемым изделиям позволяет добиться высокоточных размеров сложнопрофильных заготовок с внутренними полостями и необходимыми физико-механическими свойствами изделия. Поэтому изготовление изделий методом спекания и инфильтрации каркаса металлов является одним из наиболее перспективных и упрощенных методов получения деталей из металло-керамических композиционных материалов.

Изготовление шарового крана запорной арматуры очень трудоемкий процесс из-за сложной конфигурации и требуемой высокой точности. Рассмотренный метод позволяет добиться необходимых результатов благодаря упрощению технологического процесса и выбора оптимальных метода изготовления заготовки.

1.2.3 Перспективы использования керметов в запорной арматуре.

Как было рассмотрено выше, использование металлов и сплавов для шарового затвора помогает решить поставленные вопросы, но ненадолго, работоспособность их определяется очень низким сроком службы и частой заменой элементов арматуры. Керамика является более современным и перспективным материалом в арматуростроении, но из-за высокой хрупкости при

механических и термических ударах использование ее для объектов ответственного назначения не рационально. Керамико-металлические композиционные материалы соответствуют требованиям изделий для высоконагруженных деталей ответственного назначения и позволяют увеличить срок службы.

Перспективным материалом для деталей трубопроводной запорной арматуры является керамико-металлический композиционный материал – кермет – на основе карбида титана (TiC) с металлической жаропрочной связкой ЖС6У, в котором достигается уникальный комплекс служебных характеристик за счет твердости тугоплавкого керамического и пластичности металлического компонентов.

Использование керметов в арматуростроении позволяет благодаря высокому и технологичному качеству изготовления изделий снизить затраты на ежегодные замены и ремонт оборудования, снизить количество простоев и сохранить энергозатраты на перекачку нефтяных сред. Высокая стоимость по сравнению со стальными или другими металлическими изделиями окупается в течение десяти лет, при создании качественных и высокоточных изделий с требуемыми характеристиками.

Изучению керамико-металлических композиционных материалов для трубопроводной арматуры нефти и газа не уделено особого внимания в связи с их трудностью технологического процесса изготовления и получения высококачественных изделий, наряду с высокой стоимостью. Однако, при решении этих вопросов и более глубокого исследования свойств материалов и поведении их в экстремальных условиях, можно добиться высоких показателей надежности и долговечности по сравнению с металлическими материалами, которые соответственно повысят производительность труда и снизят затраты на ремонт и замену изделий.

1.2.4 Нерешенные вопросы

Для высокотемпературных и абразивосодержащих сред возможность диагностирования арматуры [95] позволяет предотвратить ее преждевременный отказ. Проблема работоспособности запорной арматуры остается весьма актуальной, особенно для технологических сред в горной металлургии и нефтехимпереработке.

Важным показателем при диагностировании шаровых кранов является крутящий момент, который отражает усилия, необходимые для преодоления трения шара о седло при открытии и закрытии. Увеличение трения в элементах затворного узла происходит из-за роста величины перепада давления в процессе работы. Шар и седло подвергаются интенсивному износу [59], влияют на характеристики привода и герметичность шарового затвора. При нарушении функциональности узла необходимо техническое обслуживание или ремонт оборудования, которое приводит к простоям и большим убыткам.

Для диагностирования арматуры «РОСЭНЕРГОАТОМ» применил новые программы создания оборудования по измерению крутящего момента и определения утечек в затворе [95]. Недостатком данной программы явилось отсутствие углубленных исследований по режиму эксплуатации арматуры и температурных факторов, не была учтена приработка материалов в процессе работы и исследование их изнашивания, которые существенно влияют на дальнейшее использование арматуры.

Исследования износа материалов под воздействием абразивосодержащих сред с учетом температурного воздействия проводились НПО ВНИИАШ и ПО Азнефть. Результаты [22] показали повышенную прочность и высокую износостойкость керамико-металлических материалов по сравнению с керамикой и корундовыми материалами. Данных по исследованию изнашивания и адгезии между трущимися поверхностями не были учтены в работах, хотя это является одним из главных факторов потери герметичности запорной арматуры.

Исследованиям триботехнических характеристик изнашивания материалов арматуростроения были посвящены работы ЦКБА Санкт-Петербургского ПО арматуростроения. В качестве материалов использовались керамические материалы. Испытания проводились при комнатной температуре и при 300 °С с нагрузкой от 0,5 до 10,0 МПа [22]. Установлено что скорость изнашивания оксидных материалов увеличивается с повышением температуры и появлением трещин на поверхности керамики. Данные по современным композиционным материалам и исследованиям их триботехнических характеристик не были представлены, хотя такие материалы являются наиболее перспективными для арматуростроения.

В зарубежной литературе [114] также представлен теоретический анализ и механизмы основных видов изнашивания запорной арматуры в нефтедобывающей промышленности. Объектом исследования стали керметы, изготовленные по многослойной технологии спекания двух типов керамико-металлических композиционных материалов, где нижний слой WC-Co12 %, а верхний – WC-NiCo. Основным недостатком технологии получения многослойных керметов при плохом спекании является появление поверхностных дефектов в виде пор и трещин. Еще одним существенным недостатком этой технологии является неравномерная толщина наносимых слоев, которая приводит к разнородности свойств материала на поверхности запорной арматуры, что в дальнейшем может привести к разгерметизации затворного узла. Однако, поведение керамико-металлических композиционных материалов в стендовых испытаниях не были изучены, так же как и триботехнические свойства многослойных материалов.

Одним из главных вопросов, как для производителей, так и для потребителей является увеличение срока службы работы запорной арматуры. Достигнуть долговечности затворного узла можно за счет подбора материалов, позволяющих минимизировать коэффициент трения и адгезию между шаром и седлом. При этом требования к материалам должны соответствовать потребительским характеристикам трубопроводной арматуры: иметь высокую

твердость и износостойкость, вместе с высокой пластичностью, обладать стойкостью против термических и механических ударов, иметь малый коэффициент трения шара о седло, обладать невысокой стоимостью. Таким требованиям отвечают керамико-металлические композиционные сплавы, их использование в запорной арматуре является совершенно новым и перспективным направлением. В арматуростроении активно изучаются механические свойства керметов и проводятся ряд испытаний на исследование механических свойств материалов, но для получения полной картины важно так же исследование триботехнической составляющей керметов, которые главным образом определяют герметичность запорной арматуры и ее долговечность.

1.3 Вопросы трибологии тяжелонагруженных сопряженных поверхностей

Протекание механических и физико-химических процессов в результате взаимодействия материалов при их контактировании определяет возникновение сил трения. Сила трения зависит от нормальных нагрузок, скорости скольжения, температуры, свойств материала и среды.

Вопросам трения и изнашивания посвящены работы В.А. Арчегова, Н.А. Буше, И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, А.П. Семенова, Э.Д. Брауна и др. [7,8,9,10,13,14,15,17,37,41,42,43,54,57,79,82]. В работах описываются основные механизмы изнашивания с учетом качества контактирующих поверхностей и сред, в которых работают механизмы. Среди наиболее часто встречающихся видов износа для тяжелонагруженных машин являются окислительный, абразивный, усталостный, фреттинг износ, а также коррозия и эрозия металлов. Окислительный процесс обусловлен деформацией тонких слоев на поверхности и взаимодействием компонентов среды с деформируемыми слоями. Абразивный износ характеризуется повреждением деталей машин вследствие действия твердых включений и частиц среды в зоне трения, а также наличием твердых включений в сопряженных поверхностях трения. Усталостный механизм

изнашивания проявляется при трении качения и проскальзывания и характеризуется возникновением микротрещин, единичных и групповых микровпадин. Фреттинг износ проявляется в виде схватывания и вырывов, а также окислением контактирующих поверхностей, данный вид износа является одним из наиболее опасных для механизмов, работающих в тяжелых условиях трения. Эрозия является следствием активного и повторяются воздействия газового или жидкого потоков, вследствие повторяющегося воздействия. Коррозия проявляется химическим воздействием среды [54].

Поведению и закономерностям износа сопряженных поверхностей из металлических материалов (стали, бронзы, алюминия и других сплавов) посвящены работы [13,14,37,57,93,103]. Есть ряд работ, посвященных изучению механизмов изнашивания керамических материалов [22,23], в которых выявлен ряд существенных недостатков при использовании их в тяжело нагруженных механизмах (обусловленных температурными и силовыми факторами).

Работы В.А. Арчегова, И.И. Беркович, Н.А. Буше, И.А. Буяновского, Д.Н. Гаркунова, И.Г. Горячевой, Д.Г. Грамаковского, Б.И. Костецкого, И.В. Крагельского, А.В. Чичинадзе, Ф. Боудена, Д. Тейбора [4,7,12,15,16,20, 24, 26, 39,40,41,49,53,55,67,70,71,73,74,91] посвящены исследованию неравновесных процессов и самоорганизации в трибосистемах. Адгезионные исследования изнашивания рассмотрены на примерах металлических материалов, полимеров и других материалов, однако, исследованию характеристик керамико-металлических материалов (керметов) не было уделено особого внимания.

Широкое изучение сплавов на металлической основе обусловлено дешевизной, простотой изготовления и механической обработки, доступностью и отработанной технологией получения деталей машин. Многие металлические детали в последние десятилетия заменяются керамикой, вследствие большой стойкости к износу и большого диапазона рабочих температур, но ограничены дороговизной изготовления.

Как было сказано выше, перспективными являются керамико-металлические материалы, вследствие своих уникальных свойств для работы в

тяжелонагруженных условиях. Но из-за издержек производства, качества изготовления, не изученных вопросов долговечности и отсутствия возможности прогнозировать поведение материалов в различных условиях трения и изнашивания под воздействием температур [105,107,110,112] керамико-металлические материалы еще не нашли широкого применения в машиностроении. Остаются открытыми также вопросы принципа выбора материалов для различных условий эксплуатации (с учетом окружающей среды).

В российских источниках [59] представлены данные по механическим свойствам керметов на основе карбида титана и некоторых материалов, используемых для запорной арматуры. Но данные по триботехническим характеристикам отсутствуют.

В зарубежной литературе [99,100,101,102,104,105,109,111,112] представлены сравнительные данные по износу и механическим характеристикам керамико-металлических композиционных материалов с разным содержанием связующих компонентов. Проведен ряд экспериментальных исследований, при котором учитывается влияние среды на стойкость к абразивному и эрозийному износу материалов.

Способы получения керметов на основе 70TiC-FeCrMn при различных режимах спекания и исследования их механических характеристик представлены в работе [102]. Главной целью работы было создание керамико-металлических материалов с высокой твердостью и удовлетворительной вязкостью, что достигалось благодаря инфильтрации карбидного каркаса металлическим сплавом. Изучение образца 70TiC-FeCrMn показало, что легирование кермета кремнием позволяет получить более однородную микроструктуру и снижение пористости материала. В работе открытыми остаются вопросы оптимизации подбора компонентов материала и изучения их триботехнических свойств.

Благодаря низкому коэффициенту трения [100,101,113], высокой прочности и стойкости к окислению, благоприятным физическим свойствам керметы на основе карбида титана TiC используются в абразивных средах и при повышенных температурах. Поэтому научный и практический интерес представляют

адгезионные исследования и механизмы изнашивания керамико-металлических композиционных материалов. В качестве образца были взяты керметы TiC-NiMo и TiC-FeNi. Экспериментальные данные по адгезионному износу показали, что наилучшими свойствами обладает кермет TiC-FeNi. А исследования по абразивно-эрозионному износу [101,113], которые проводились в центрифуге под воздействием кварцевого песка размерами 0,1-0,3 мм и скоростью 80 м/с под углом 30°, показали лучшие результаты керметы TiC-FeNi. Расхождения данных по износу определяются разнородностью структурных компонентов керметов TiC-NiMo и TiC-FeNi.

Исследование [105] посвящено изучению микроструктуры керамико-металлических материалов с твердой керамической основой (в виде TiC, TiN, WC) и металлической матрицей (из стали или Co) на эрозийный износ. Однако, не изученными остаются триботехнические характеристики этих материалов.

В работах [104,111,112] было выявлено влияние процентного содержания твердых включений WC и TiC керамико-металлических материалов на их твердость и появление трещин в процессе испытаний. В работе[99] предлагается нанесение покрытий на поверхности керметов, которые смогут создать прочный слой на поверхности материала и заполнить трещины и поры. Но вопросы механизма трения и изнашивания керамико-металлических материалов с нанесенными различными покрытиями на данный момент остаются неизученными.

Более полные и развернутые триботехнические исследования керамико-металлических материалов на основе TiC и Ti(C,N) представлены в работе [109]. В этой работе приводится полная технология получения керметов, расчет объемного износа материала в зависимости от содержания связующих компонентов, исследование структуры и микрохиманализ на следах износа. Трибологические свойства керметов оценивались в условиях возвратно-поступательного движения шара WC по изучаемым материалам в диапазоне нагрузок от 20 Н до 60 Н. В качестве связующего материала для TiC и Ti(C,N) использовался Ni₃Al с объемным содержанием от 20 % до 40 %. Результаты

показали, что лучшие данные по износостойкости имеют керметы на основе TiC, так как обладают более однородной структурой, чем керметы на основе Ti(C,N). Увеличение нагрузки приводит к большим показателям коэффициента трения и повышенному износу материала. Проведенные исследования выявили, что при объемном содержании Ni₃Al 30 % керамико-металлический композиционный материал на основе TiC имеет наилучшие триботехнические свойства. Но и в этой работе при разностороннем подходе к оценке износа исследуемых материалов не приводятся данные по совместимости трибосопряжений «кермет по кермету».

Поэтому изучение триботехнических свойств керамико-металлических материалов и их сопряжений (с учетом покрытий) остается важным направлением для развития машиностроительного производства.

1.4 Выводы по главе

1. Литературный обзор показал, что использование керамико-металлических композиционных материалов еще не получило широкого применения в тяжелонагруженных сопряжениях, в том числе и запорной арматуре. Главным вопросом в производстве керметов остается нахождение эффективных технологических процессов в создании материалов и изучение их характеристик, в том числе триботехнических. Существуют ряд эффективных технологий по созданию металло-керамических композиционных материалов и исследований их механических характеристик, но должного внимания не оказано изучению триботехнических характеристик композиционных материалов с учетом подбора соотношений исходных компонентов, а именно содержания тугоплавкой составляющей и металлического компонента.

2. Перспективным направлением в области развития запорной арматуры является изучение сохранения надежности и герметичности узла. Выполнены меры по увеличению износостойкости и твердости с одновременно высокой пластичностью материалов за счет использования разнокомпонентных составляющих композиционного материала, что значительно увеличило срок

службы арматуры. Но вопросы сохранения герметизации с учетом износа трибосопряжений материала остаются не изученными. Также остаются актуальными вопросы влияния температуры и агрессивной среды на совместимость трущихся поверхностей керамико-металлических композиционных материалов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н.

3. Важную роль при работе в тяжелонагруженных трибосопряжениях играет адгезия контактирующих поверхностей. Адгезия зависит от природы контактирующих тел и их структурного состава, влияет на работу сопряженных узлов в условиях повышенных температур и давлений. Остаются не изученными адгезионные составляющие сил трения для керамико-металлических композиционных материалов на основе карбида титана и играют определяющую роль в развитии арматуростроения нефтяной промышленности.

4. Исследованию изнашивания керамики и керамико-металлических материалов посвящено много работ, которые позволили решить некоторые задачи устойчивости материалов к воздействию среды и температуры, определить места утечек арматуры и потери герметизации. Однако вопросы трения и изнашивания трибосопряжений остаются практически не изученными, как и определение условий минимизации коэффициента трения и изнашивания керметов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н (с покрытием TiN, Zr-Ti-N-C, TiCrN и без покрытий), работающих при повышенных температурах в агрессивной среде.

На основании приведенных выше выводов сформулирована цель данной научной работы и определены задачи, решение которых позволило достичь эту цель.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА

2.1 Материалы для исследований

Для изготовления шаровой пробки запорной арматуры из керамико-металлических композиционных материалов использовался порошок карбида титана, просеянный через сито 0,071 мм, и куски металла из сплавов ЖС6У или ВЖЛ14Н, исходный химический состав которых указан в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Состав материалов, % по массе

Сплав	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Fe	Mn	Si	Zr, P, S, B, Ce
ВЖЛ-14Н	осн.	0,03- 0,08	18,0- 20,0	-	4,0- 5,0	-	1,2- 1,5	2,5- 2,9	1,8- 2,8	8,0- 10,0	≤0,4	≤0,4	≤0,02
ЖС6У	осн.	0,13- 0,20	8,0- 9,5	9,0- 10,5	1,2- 2,4	9,5- 11,0	5,1- 6,0	2,0- 2,9	0,8- 1,2	≤1,0	≤0,25	≤0,25	≤0,02

Образцы и инденторы TiC–ЖС6У и TiC–ВЖЛ14Н для испытаний вырезались из готовой шаровой пробки.

Технологический процесс изготовления шаровой пробки включал в себя получение огнеупорной оболочковой формы по выплавляемым моделям (рис. 2.1).

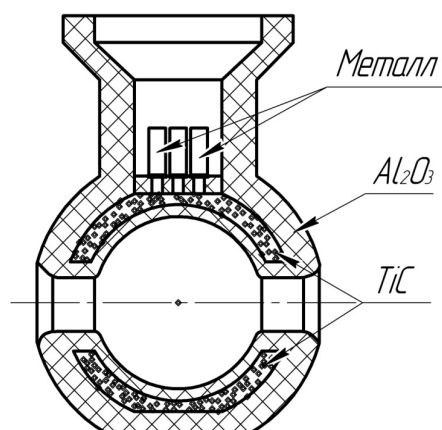


Рисунок 2.1 Схема заполнения оболочковой формы

В готовую форму засыпали порошок карбида титана фракции 10-63 мкм в количестве 0,25 кг. Далее форму устанавливали на вибростол и уплотняли вибрацией с амплитудой 0,1-0,5 мм и частотой колебаний 40-50 Гц. Формовка после уплотнения имела пористость 45 ± 5 %, где размер пор составлял 30 ± 5 мкм. Оболочковую форму закрывали крышкой со сквозными отверстиями и на крышку устанавливали куски сплава ЖС6У или ВЖЛ14Н массой 0,3 кг [65].

Далее форму помещали в камеру печи подогрева и герметизируют ее до 1,0 Па. Первоначально производили нагрев до температуры 1300 °С, при которой происходило спекание порошка карбида титана в течение 2 часов. Затем печь нагревали до температуры 1550 °С в течение 0,5 часа, где происходило расплавление сплава и инфильтрация каркаса карбида титана сплавом. Установка печи подогрева выключалась и охлаждалась до комнатной температуры. В результате получалась заготовка шаровой пробки с объемным содержанием карбида титана 45 %.

Для получения керметов TiC–ЖС6У и TiC–ВЖЛ14Н с объемным содержанием карбида титана 50-53% использовали тот же технологический процесс. Но для получения более плотного состава TiC использовался надавливающий стальной пуансон при виброуплотнении порошка карбида титана. Пуансон устанавливался в верхнем отверстии оболочковой формы, а форма помещалась на вибростол и уплотнялась вибрацией. Частота колебаний составляла 40-45 %, а амплитуда – 0,1-0,5 мм. Усилия надавливания небольшие – 0,01-0,05 МПа, этого достаточно для получения более плотного состава TiC без пластификатора.

Получение кермета с объемным содержанием карбида титана 64-65 % заключалось в следующем. Создавали оболочковую форму по выплавляемым моделям. Предварительно в порошок добавляли этиловый спирт до получения пастообразной массы. Готовую массу заливали в форму и виброуплотняли с частотой колебаний 40-50 Гц и амплитудой 0,1-0,5 мм. Таким образом, достигали объемное заполнение порошка карбида титана до 65 %. Весь остальной технологический процесс повторялся [65,66], как описано выше.

По описанным выше технологическим процессам получали керметы разных составов: TiC–ЖС6У с объемным содержанием карбида титана 45 % (далее «TiC–ЖС6У (TiC 45 %)»), TiC–ЖС6У и TiC–ВЖЛ14Н с объемным содержанием карбида титана 50-53 % (далее «TiC–ЖС6У» и «TiC–ВЖЛ14Н»), TiC–ВЖЛ14Н с объемным содержанием карбида титана 64 % (далее «TiC–ЖС6У (TiC 64 %)»). Полученные керметы исследовали на триботехнические характеристики материалов.

Для сравнения триботехнических свойств кермета использовались два сплава ЖС6У и 12Х18Н10Т. Образцы для исследований этих материалов вырезались из готового прутка диаметром 30мм на пиле Makita 2414 NB (рис. 2.2).

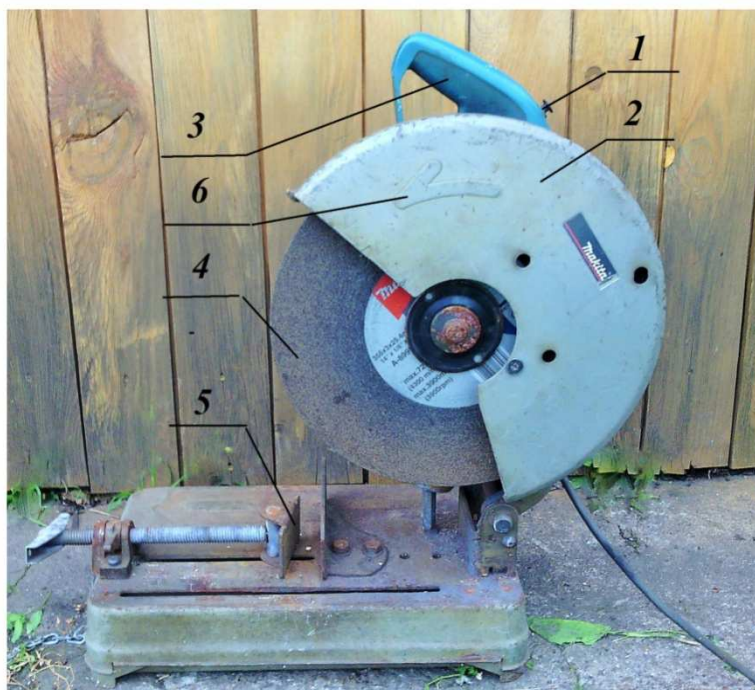


Рисунок 2.2 Пила Makita 2414 NB: 1) кнопка включения и выключения; 2) защитный кожух; 3) рукоятка; 4) абразивный круг; 5) зажимное устройство; 6) стрелка направления вращения круга.

Абразивный круг 4 марки Makita А – 89953 размерами 355 × 3 × 25,4 мм устанавливали за защитный кожух 2. Направление вращения круга указано на кожухе стрелкой 6. Пруток фиксировали с зажимным устройством 5.

Оборудование подключалось к электрическому току и нажатием кнопки 1 производили абразивный круг во вращение. Вращающийся абразивный круг при помощи рукоятки 3 подводили к прутку и разрезали на маленькие части толщиной 5 мм.

Полученные образцы доводили до необходимой шероховатости на шлифовально-полировочной машине P25FRS Top Tech Machines (рис. 2.3). В машине P25FRS Top Tech Machines вручную изменяли направление и скорость вращения стола. На стол укладывали наждачную бумагу и фиксировали резинкой для равномерной шлифовки образца. Водостойкая наждачная бумага в листах SIA 1913 siawat fc использовалась разной зернистости Р 1200, Р 800, Р 320 из карбида кремния для шлифовки материалов ЖС6У и 12Х18Н10Т. Шлифовки на листах Р 320 достаточно для получения зеркальной поверхности на образцах.



Рисунок 2.3 Шлифовально-полировочная машина P25FRS Top Tech Machines

Для шлифования и полирования керметов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н использовалась шлифовально-полировочная машина Struers Tegra Pol 15 (рис. 2.4). Скорость вращения стола регулировалась от 50-600 об/мин. Подача воды осуществлялась вручную.



Рисунок 2.4 Шлифовально-полировочная машина Struers Tegra Pol 15

В качестве шлифовальных дисков использовались круги марки MD Piano 220 и MD Largo 200, а для полировки поверхности – диск MD Nap 200. Шлифовальный диск MD Piano 220 представляет собой алмазную основу в твердой смоле, который предназначен для подготовки композиционных материалов из твердых частиц в мягкой матрице. Серия MD Piano 220 использовалась для более грубого шлифования, для тонкого шлифования использовался диск MD Largo 200. Стадия полировки производилась на диске MD Nap 200 с алмазной пастой. Таким образом, получили образцы с высокой частотой поверхности для исследования керметов TiC-ЖС6У и TiC – ВЖЛ14Н с разным содержанием TiC.

Диаметр готовых образцов составлял 25 – 30 мм, а толщина – 5 мм (рис. 2.5) с шероховатостью поверхности не ниже Ra 0,2 мкм.



Рисунок 2.5 Образец ЖС6У после испытания на износ

Инденторы (рис. 2.6) изготовлены высотой 25 мм, диаметром 5 мм со кругленными вершинами радиусом 2,5 мм, с шероховатостью поверхности не ниже Ra 0,2 мкм.



Рисунок 2.6 Индентор для проведения испытаний на адгезиометре

Для исследования износа изготовлены инденторы (рис. 2.7) высотой 10 мм, диаметром 5-6 мм с кругленными вершинами радиусом 2,5-3 мм, с шероховатостью поверхности не ниже Ra 0,2 мкм.



Рисунок 2.7 Индентор для проведения испытаний на трибометре
«NANOVEA TRB»

2.2 Износостойкие покрытия

В структуре кермета имеются поры, которые в процессе работы могут привести к разгерметизации запорной арматуры, для решения данной проблемы обычно применяют износостойкие покрытия. В качестве покрытий исследовали TiN, TiCrN и Zr-Ti-N-C.

Покрытие TiN наиболее часто используется для повышения коррозионной и эрозионной стойкости лопаток газотурбинных двигателей [81], также для улучшения адгезионных свойств материалов. Покрытие TiCrN применяется для увеличения износостойкости материалов и адгезионных параметров при работе в области повышенных температур до 650 °С.

Для нанесения покрытий TiN, Zr-Ti-N-C, TiCrN использовалась ионно-плазменная вакуумная камерная установка ННВ – 6,6 – И1 (рис. 2.8).

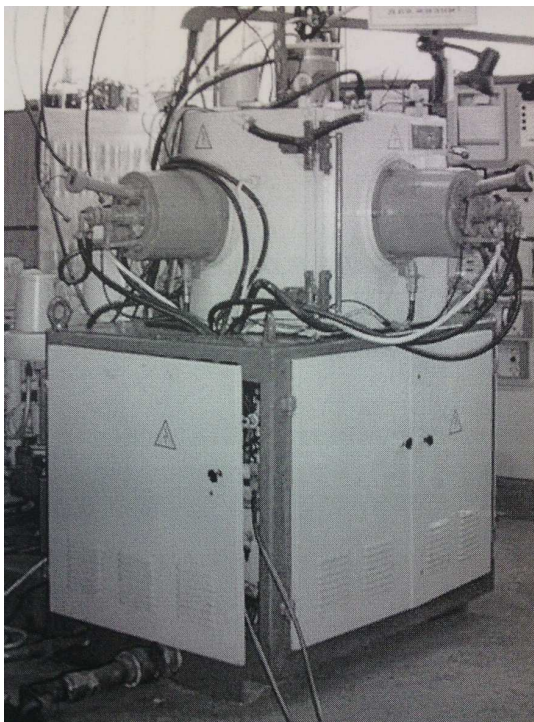


Рисунок 2.8 Установка ННВ–6,6–И1

Установка ННВ–6,6–И1 предназначена для нанесения упрочняющих одно- и многослойных покрытий на детали диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм способом конденсации вещества с ионной бомбардировкой.

Покрытия наносились вакуумным ионно-плазменным напылением. Перед нанесением покрытия поверхности образцов очищались, после чего образцы устанавливались в вакуумную камеру. Внутри камеры создавался высокий вакуум для очистки и активации поверхности изделий перед нанесением покрытий.

Принцип нанесения покрытия заключается в испарении материала катода за счет концентрации высокой энергии электрической дуги. Плазменный ускоритель служит для генерации металлической плазмы, предварительного ускорения ионов и частичной сепарации капельной фазы. Плазменный ускоритель конструктивно состоит из напыляемого материала – торцевого катода, и кольцевого анода. Возбуждение вакуумной дуги в ускорителе осуществляется путем пробоя по порции газа и загорания дуги в парах испаренного материала катодом. Испарение

тугоплавких элементов возможно за счет получения высоких температур в камере.

Установка позволяет нанести высококачественные покрытия с хорошими параметрами против адгезии.

Покрытия Zr-Ti-N-C наносились с применением отдельных катодов-испарителей. Образец, вращаясь в камере установки для нанесения покрытия, проходил мимо каждого из катодов, что приводило к формированию послойного покрытия с чередующимися слоями TiN, TiZrN и ZrN. Подобная структура является хорошим барьером для трещин, благодаря послойному нанесению твердого и мягкого слоя верхних и нижних слоев. Данное покрытие применяется для режущих инструментов, с целью предотвращения развития трещин в процессе работы инструмента.

2.3 Измерение твердости материалов

Определение твердости по Виккерсу проводили на автоматическом микротвердомере EMCO-Test DuraScan 50 (рис. 2.9) при нагрузке 100 Г и 200 Г по стандарту ГОСТ 9450 –76. Микротвердомер «DuraScan» содержит автоматизированную систему нагружения с оптической фокусировкой и LED освещением. Измерения проводились вдавливанием алмазной пирамидки с квадратным основанием на поверхность образца. Размер угла между противоположными сторонами алмазной пирамиды составляют 136°. Полученный отпечаток позволял рассчитать микротвердость исследуемого образца, который рассчитывался компьютером автоматически.

Данные измерений выводились на персональный компьютер в программе Ecos Workflow, в котором имеются функции серийного и единичного измерения микротвердости. Оптическая фокусировка позволяет получить качественное изображение с увеличением в 10 и 50 раз. Значения микротвердости даны после усреднения 10 замеров в разных точках образца.

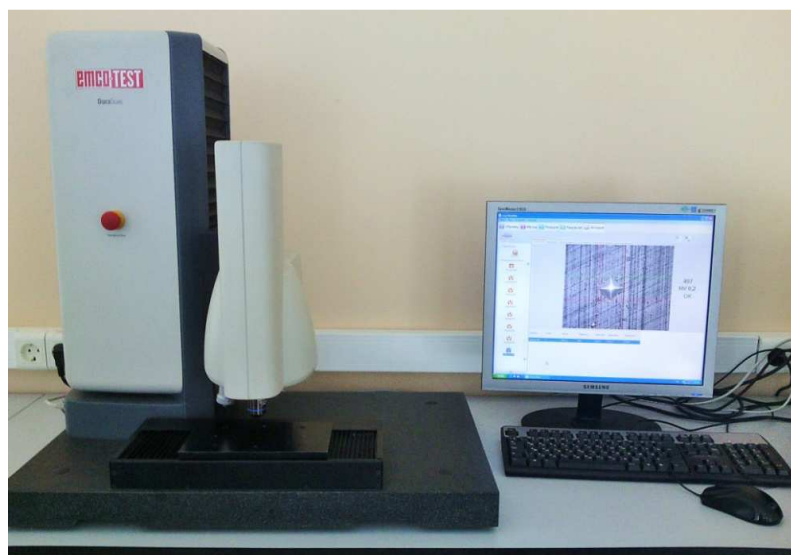


Рисунок 2.9 Микротвердомере EMCO-Test DuraScan 50

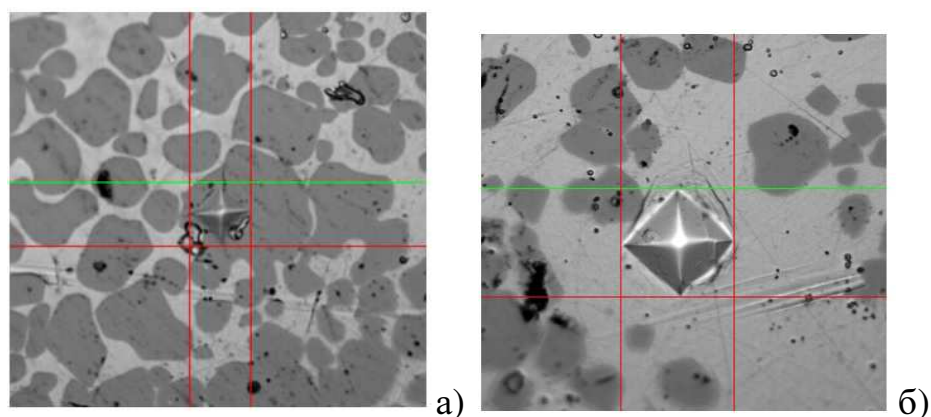


Рисунок 2.10 Измерение микротвердости TiC-VЖЛ14Н на EMCO-Test DuraScan 50 увеличение $\times 50$: а) зерно TiC; б) сплав ВЖЛ14Н.

Все результаты выводятся в отдельном файле и выводом графика изменения микротвердости по точкам. Пример изображения для расчета микротвердости для кермета TiC–ВЖЛ14Н представлен на рисунке 2.10 (а) и (б).

2.4 Механические испытания на сжатие

Испытание образцов на сжатие проводили на динамометре RMS–100 «Schенck» (рис. 2.11). Образцы размером $5 \times 5 \times 7,5$ мм сжимали при температурах испытания 20°C , 600° и 975°C .



Рисунок 2.11 Динанометр «Schenck»

Рабочие поверхности образцов шлифовали перед испытаниями, на сотые кромки наносились фаски для предотвращения возможных концентраторов напряжений.

Машина состоит из станины, подвижной траверсы и пульта управления. При испытаниях на сжатие вместо захватов устанавливаются столики-пресса. Управление работой стенда и связь с компьютером производится с помощью блока управления. Машина обеспечивает построение графиков.

Деформации, возникающие в испытуемых образцах, обычно очень малы: абсолютные деформации измеряются микронами и сотыми долями миллиметра, а относительные - десятыми и сотыми долями процента. Для измерения таких малых деформаций применяются специальные высокочувствительные приборы – тензометры.

При испытании образцов на сжатие большое внимание следует уделять обеспечению соосности его нагружения, поэтому, как правило, нагружение образца производится в специальных приспособлениях, имеющих строго параллельные опоры.

2.5 Методика исследования структуры материалов

2.5.1 Металлографическая оптика

Для изучения микроструктуры материалов и их поведений в процессе трения и изнашивания использовался оптический микроскоп «OLYMPUS GX51» (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 Оптический микроскоп «OLYMPUS GX51»

Микроскоп предназначен для обработки микроизображений, полученных фотоаппаратом «Altra 20» с разрешением 3,2 мегапикселя и цифровой видеокамерой «UC30» и разрешением 2 мегапикселя. В микроскопе предусмотрено 5 объективов с разными увеличениями: $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$. Для получения четких данных в микроскопе имеется галогеновое освещение в 12 В. Редактирование изображения возможно в ручном либо полуавтоматическом режиме.

Данные микроскопа выводятся на персональном компьютере в программе AnalySIS start. В программе даются изображения структуры материалов, включений и фаз, возможность исследования линейных размеров зерен и определения площади структуры, возможна дополнительная обработка изображений.

Для изучения микроструктуры материалов на оптическом микроскопе «OLYMPUS GX51» образцы должны быть плоскопараллельными, требуется отполированная поверхность не грубее $Ra = 0,32$ мкм. На поверхности не допускаются дефекты механической обработки и трещины в виде царапин и жировых пятен. Для получения четкого изображения микроструктуры требуется предварительное обезжиривание и травление керамико-металлических образцов. Травление шлифов проводили в реактиве, содержащем 8 мл глицерина или H_2PO_4 , 40 мл уксусной кислоты, 31 мл HNO_3 , 21 мл HCl .

Для улучшения выявления микроструктуры образцы после травления подвергали нагреву до $400...450$ °С [6].

2.4.2 Растровая электронная микроскопия

Морфология поверхностей образцов была проанализирована с помощью сканирующего микроскопа «JSM-6490LV» (рис. 2.13). Растровый электронный микроскоп (РЭМ) позволяет получить объемное изображение поверхности материала с их количественной и качественной оценкой.



Рисунок 2.13 Сканирующий микроскоп «JSM-6490LV»

Преимущество использования сканирующего микроскопа «JSM-6490LV» заключается в неразрушающем контроле, то есть при исследовании поверхности образца структура твердого тела не разрушается. Для работы на РЭМ не требуется дополнительных функций в виде травления для выявления структуры образцов, кроме как шлифования. Микроскоп может исследовать широкий спектр изучаемых материалов.

Работа сканирующего микроскопа «JSM-6490LV» заключается в направлении узко сфокусированного пучка электронов – зонда – на поверхность образца. В результате происходит эффект отражения электронов. Как на рис. 2.14.

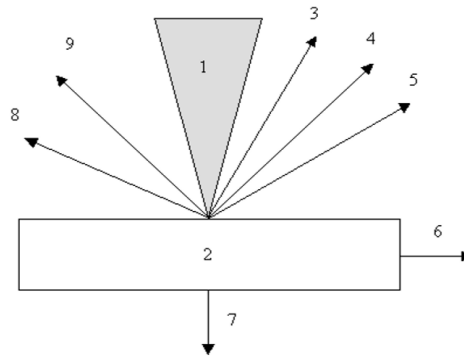


Рисунок 2.14 Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом [76]:

1 – электронный луч; 2 – объект; 3 – отраженные электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – Оже-электроны; 6 – ток поглощенных электронов; 7 – прошедшие электроны; 8 – катодолуминесцентное излучение; 9 – рентгеновское излучение.

Изображение поверхности образца формируют вторичные, отраженные и поглощенные электроны. Контраст изображения зависит от шероховатости поверхности и химического состава образца [76].

В отраженных электронах размер области генерации зависит от длины пробега электронов в образце. Протяженность пробега зависит от напряжения и атомного номера элементов в таблице Менделеева. Разрешение РЭМ изменяется в малых пределах: от 10 нм при невысоких ускоряющих напряжениях и до 100 нм при высоких ускоряющих напряжениях – рис. 2.15.

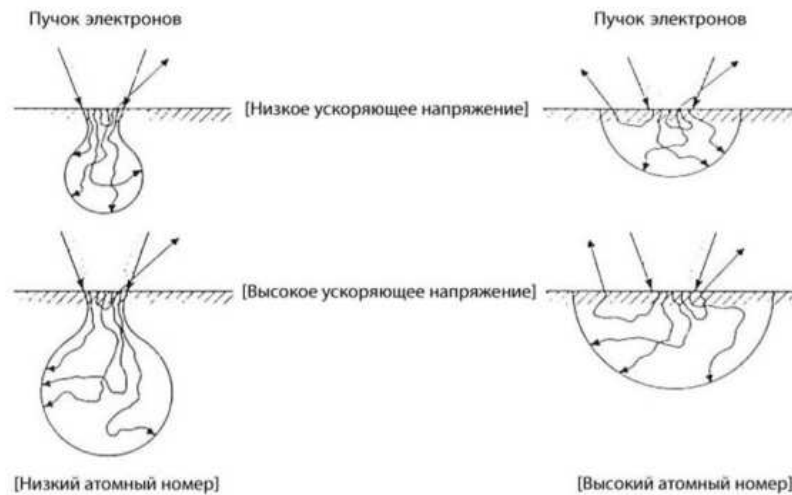


Рисунок 2.15 Область взаимодействия [18].

Меньшее количество отраженных электронов возникает, если атомный номер элемента мал, и наоборот, при большом атомном номере потери энергии при движении меньше, соответственно и большее число электронов отражается на поверхности. Эти закономерности позволяют сформировать изображение изучаемого материала. Глубина слоя отраженных частиц составляет примерно 0,1 – 1 мкм [18,76].

Вторичные электроны позволяют получить максимальную разрешающую способность до 5 – 10 нм. Данные вторичных электронов определяются не атомным номером, а углом падения первичных электронов, которые позволяют получить данные о топографии поверхности.

На композиционные эффекты изображения влияют поглощенные электроны. Часть электронов после воздействия зонда остается в объеме образца. Ток поглощенных электронов определяется разностью тока зонда и тока отраженных и вторичных электронов. Поглощенные электроны имеют разрешающую способность, сравнимую со вторичными электронами [76].

Процессы рассеивания электронов внутри образца влияют на разрешающую способность изображения. Пространственное разрешение по поверхности образца показано на рис. 2.16.

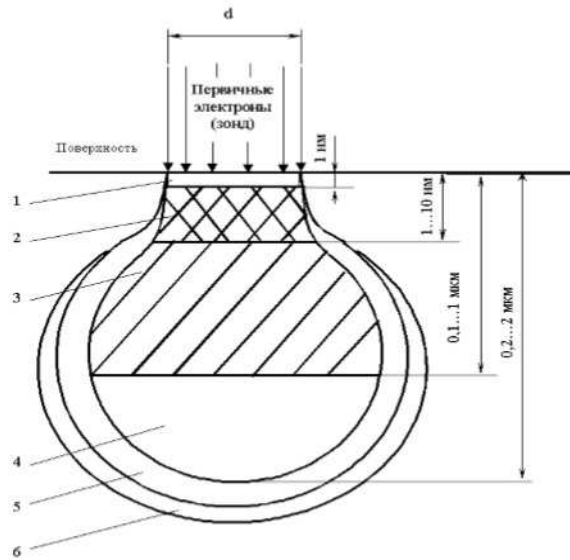


Рисунок 2.16 Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов (зонд) [76]:

1 – Оже – электронов; 2 – вторичных электронов; 3 – отраженных электронов; 4 – характеристического рентгеновского излучения; 5 – тормозного рентгеновского излучения, 6 – флуоресценции.

Сканирующий микроскоп «JSM-6490LV» позволяет сделать качественный и количественный микроанализ. Качественный анализ помогает определить элементы, присутствующие в образце. Количественный анализ дает данные по концентрации элементов в образце. Концентрация n - компонентной системы химического элемента определяется по формуле [44]:

$$c_i = \frac{I_i^* / I_i}{f_i(c_1, c_2, \dots, c_n)}. \quad (2.1)$$

где I_i^* и I_i - интенсивность излучения в образце и эталоне; $c_1, c_2, \dots, c_n$ - концентрация содержащихся элементов в образце; $f_i(c_1, c_2, \dots, c_n)$ - поправочная функция, включающая три поправки на атомный номер, на поглощение и на флуоресцентное возбуждение.

В работе РЭМ для качественного и количественного анализа микроструктуры образцов использовали керметы TiC-ЖС6У, TiC-ВЖЛ14Н и сплав ЖС6У после проведения испытаний на трение и износ материалов.

2.6 Методика оценки триботехнических характеристик

2.6.1 Адгезионные исследования

Для оценки исследования триботехнических параметров использовали адгезиометр [97] (рис. 2.17). Установка в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте, в том числе для тяжело нагруженных трибосопряжений машин и механизмов.



Рисунок 2.17 Адгезиометр

Установка позволяет производить нагрев зоны контакта, обеспечивая характерное распределение температуры по глубине контактирующих тел. Температуру Θ фрикционного контакта изменяли электроконтактным способом.

Единичную неровность пятна касания двух трущихся тел имитирует индентор, сдавленный двумя плоско-параллельными образцами (рис. 2.18). Образцы изготавливаются с высокой частотой поверхности не менее $Ra = 0,25$ мкм. Индентор вращается вокруг собственной оси под приложенной нагрузкой N с окружной силой $F_{\text{экс}}$, связанной со сдвиговой прочностью адгезионных связей на срез [97].

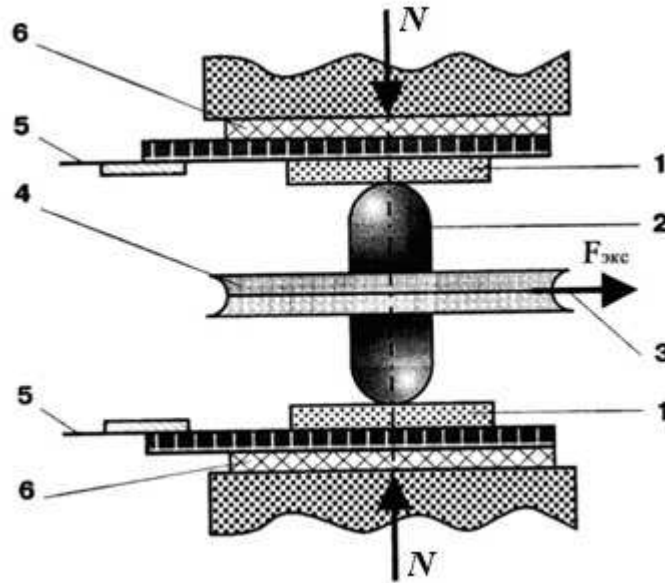


Рисунок 2.18 – Модель фрикционного контакта: 1 – образцы; 2 – индентор; 3 – тросик; 4 – диск; 5 – медные пластины; 6 – изоляция.

Для обеспечения однородности физико-механических свойств образцы изготавливаются плоскопараллельными из одной и той же заготовки диаметром 25 мм и высотой 5 мм. Индентор должен быть выполнен из более твердого материала фрикционной пары в виде двустороннего сферического пуансона диаметром 5 мм для внедрения в образец, сделанного из более «мягкого» тела. Это условие позволяет сохранить исходную форму при нагружении контакта силой N и получить отпечаток на более «мягком» теле – образце, радиус которого используется при расчете величин p_r и соответствующим им величин τ_n .

Прочность адгезионных связей τ_n определяется из соотношения [96]:

$$\tau_n = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{экс}}}{\pi} \cdot \frac{R_{\text{экс}}}{r_{\text{отп}}^3}, \quad (2.2)$$

где $F_{\text{экс}}$ – окружная сила на диске, вращающая индентор; $R_{\text{экс}}$ – радиус диска, в котором закрепляется индентор; $r_{\text{отп}}$ – радиус отпечатка (лунки) на испытываемых образцах.

Предполагается, что нормальные напряжения, действующие на поверхность сферы, постоянны и равны в области всего отпечатка при соблюдении условия [97]:

$$0,02 \leq \frac{h}{r_1} \leq 0,2 \quad (2.3)$$

где h – глубина внедрения, r_1 – радиус сферического индентора.

Нормальные напряжения на контакте p_r рассчитываются [97]:

$$p_r = \frac{N}{\pi \cdot r_{\text{отп}}^3} \quad (2.4)$$

N – сжимающая сила, приводящая к насыщенному пластическому контакту (появлению остаточной лунки на образцах).

Адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения равна [96,97]:

$$f_m = \frac{\tau_n}{p_r} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{экс}}}{N} \cdot \frac{R_{\text{экс}}}{r_{\text{отп}}} \quad (2.5)$$

Зависимость величины τ_n от нормальных напряжений определяется методом постепенно снижающихся нагрузок. В качестве нагрузки используют набор разновесок. Суммарный вес разновесок выбирают исходя из соотношения (2.3).

Каждую разновеску снимают в момент проведения опытов, когда на кривой записи $F_{\text{экс}}$ появляется участок установившегося трения (рис. 2.19), соответствующий предыдущей разновеске.



Рисунок 2.19 Типичная запись тангенциальной силы адгезионного взаимодействия при использовании метода уменьшающихся нагрузок

Площадь контакта индентора и образца остается практически постоянной, соответствующей первоначальному грузу, после снятия разновески нагрузка снижается и обеспечивается ступенчатое уменьшение нормальных напряжений. Эксперименты проводят при разных температурах контакта Θ [97]. После расчетов получали зависимости $\tau_n = f(p_r)$ при различных температурах.

Достоверные данные о величине τ_n могут быть получены при 2-3-кратном повторении эксперимента, при этом вероятное отклонение не превышает 5-8 % [96,97].

Эксперименты проводились при разных температурах контакта $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Радиус $r_{\text{отп}}$ отпечатка на плоских образцах определялся на микроскопе. Нормальные напряжения, действующие на поверхность сферы, рассчитываются по формуле (2.3), нагрузку N изменяли с шагом 480 Н.

После расчетов в Excel все данные заносились в программу SigmaPlot для построения графиков зависимости τ_n и p_r при различных температурах контакта.

В условиях упругого контакта величина τ_n линейно зависит от p_r при различных температурах Θ и подчиняется уравнению [97]:

$$\tau_n = \tau_o + \beta \cdot p_r, \quad (2.6)$$

где τ_o — напряжение среза при отсутствии нормальных напряжений;

β — коэффициент упрочнения адгезионных связей от нормальных напряжений. Это позволяет экстраполированием прямых $\tau_n = f(p_r)$ до $p_r = 0$ определить τ_o , а также величину β — как тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс.

При этом коэффициент регрессии определяли из выражения:

$$\beta = \frac{m \cdot \sum p_{ri} \cdot \tau_{ni} - \sum p_{ri} \cdot \sum \tau_{ni}}{m \cdot \sum p_{ri}^2 - (\sum p_{ri})^2}, \quad (2.7)$$

где m — число наблюдений, а свободный член регрессии:

$$\tau_o = \frac{\sum \tau_{ni} - \beta \cdot \sum p_{ri}}{m}, \quad (2.8)$$

Выборочный коэффициент r_k , характеризующий силу исследуемой связей, вычислялся по найденному значению коэффициента регрессии:

$$r_k = \beta \cdot \frac{m \cdot \sum p_{ri}^2 - (\sum p_{ri})^2}{m \cdot \sum \tau_{ni}^2 - (\sum \tau_{ni})^2}, \quad (2.9)$$

Расчеты показали, что выборочный коэффициент корреляции во всех опытах был в пределах 0,97-0,985, что указывает на наличие устойчивой функциональной базы.

После расчетов получали температурные зависимости триботехнических характеристик молекулярной составляющей коэффициента трения; прочности на срез адгезионных связей и нормальных напряжений для подвижного пластического контакта.

2.6.2 Исследования изнашивания

Для оценки изнашивания керамико-металлических композиционных материалов и трибосопряжений эксперименты проводили по схеме «шар-диск» на трибометре «NANOVEA TRB» (рис. 2.20). В качестве диска использовались образцы, в качестве шаров – сферические инденторы.

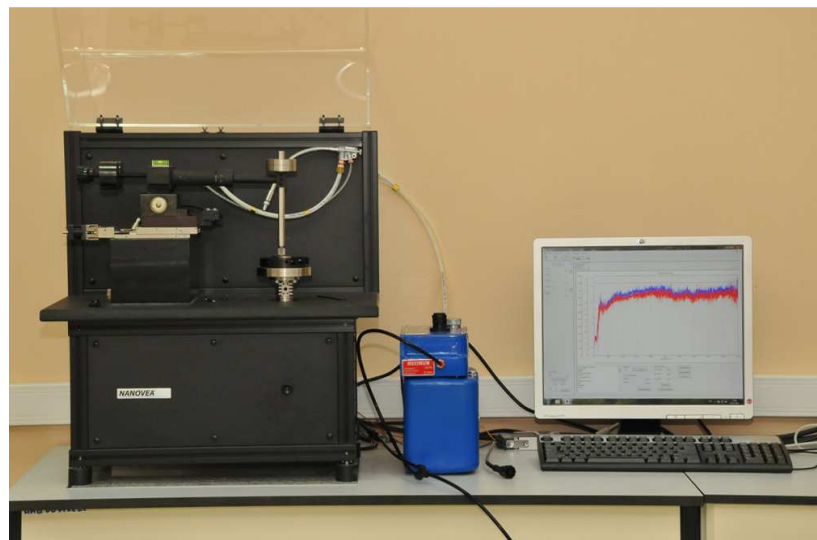


Рисунок 2.20 Трибометр «NANOVEA TRB»

Этот трибометр позволяет воспроизвести износ и трение с использованием вращательного режима. Диапазон скоростей можно регулировать от 0,01 до

2000 об/мин. Данные трибометра могут быть точно зафиксированы в заданном интервале времени. Программное обеспечение позволяет в режиме реального времени получать данные по коэффициенту трения и температуры.

Эксперименты проводили при нормальном нагружении 2 Н и постоянной скорости скольжения 0,15 м/с. Диаметр поверхности трения на диске (образце) составлял 6 мм.

Количество циклов воздействий в испытаниях для всех пар трения было одинаковое и составляло $N \approx 15000$ (путь трения $l \approx 280 - 290$ м). В качестве контртела использовали инденторы (со скругленной вершиной диаметром 6 мм) из TiC-ЖС6У и ЖС6У с покрытиями и без покрытия. Плоские образцы диаметром 25 мм и толщиной 7-8мм изготавливали из сплава ЖС6У и 12Х18Н10Т, а также из керамико-металлических материалов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н, шероховатость поверхности Ra 0,2 мкм. Для сравнения данных по износу использовали образцы и инденторы с покрытиями из TiN, TiCrN, Zr-Ti-N-C. Таким образом, исследования проводили на образцах с покрытием и без.

Испытания проводили без смазки при температуре окружающей среды 23 – 25°C и относительной влажности 50 %. Перед началом испытаний поверхности образцов и инденторов обрабатывались спиртом и просушивались. Результаты трибологических испытаний представляли как усредненное значение, полученное по трем экспериментам [46].

Величину изнашивания материала образцов и индентора определяли по потере объема в процессе испытаний. Объемные потери материала определяли по формуле:

$$V_{\text{изн}} = m / \gamma , \quad (2.10)$$

где $V_{\text{изн}}$ – изношенный объем; m – весовой износ; γ - удельный вес (плотность) испытуемого материала.

Вес испытуемых образцов до и после триботехнических испытаний измеряли на электронных весах «METTLER TOLEDO» (рис.2.21) с точностью измерения до 10^{-6} гр.



Рисунок 2.21 Электронные весы «METTLER TOLEDO»

Согласно ГОСТ 27674-88 интенсивность J_h изнашивания индентора определяли как отношение значения износа h_r (мкм) к обусловленному пути трения l (м), на котором происходило изнашивание:

$$h_r = \frac{V_{изн}}{S}, \quad (2.11)$$

где S – площадь касания тел при трении.

$$J_{hu} = \frac{h_r}{l} = \frac{V_{изн}}{S \cdot l} \quad (2.12)$$

Однако при рассмотрении изнашивания образцов (как элемента обратной пары трения) определяющим в оценке изнашивания является не длина пути трения, а число локальных взаимодействий, приводящих к износу. Поэтому сравнение изнашивания образцов выполняли по величине к приведенной линейной интенсивности изнашивания:

$$K = h_r / N, \quad (2.13)$$

где N – число циклов воздействий, приводящих к линейному износу h_r , т.е. по существу, величина K представляет собой износ, приходящийся на одно воздействие.

ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КЕРМЕТОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

При открытии и закрытии затворного узла в шаровом кране происходит трение шара о седло, которое оказывает влияние на их износ и характеристики привода. Для обоснованного выбора материала элементов затвора необходимо обеспечить минимизацию адгезии и коэффициентов трения. В данном разделе представлены экспериментальные зависимости адгезионных параметров различных пар трения от температуры, давления и среды.

3.1 Металлографические исследования изучаемых материалов и их физико-механических свойств

Структуры керметов (рис. 3.1) характеризуются наличием в них металлической связки в виде непрерывной фазы и изолированных частиц карбида титана, образовавшихся после разрушения карбидного каркаса, и пор.

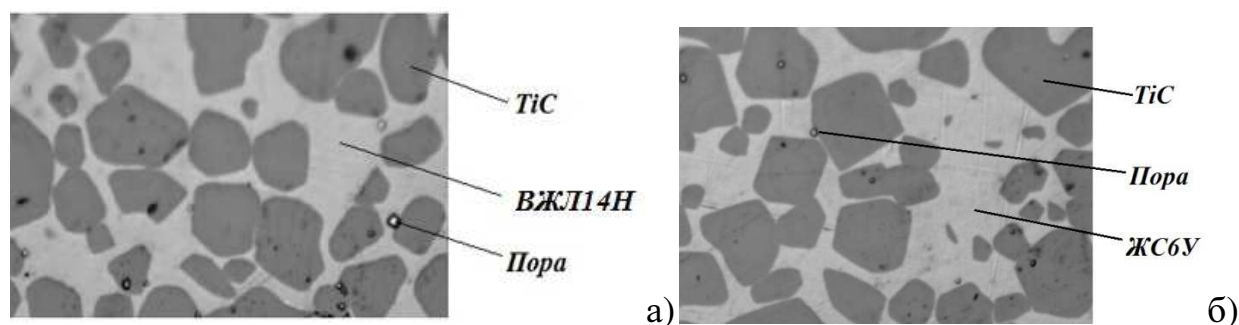


Рисунок 3.1 Структура керметов: а) TiC-ВЖЛ14Н (увеличение $\times 50$);
б) TiC–ЖС6У (увеличение $\times 50$)

Для исследования адгезионных параметров фрикционного контакта, были использованы керметы с разным объемным содержанием карбида титана в структуре (рис. 3.2).

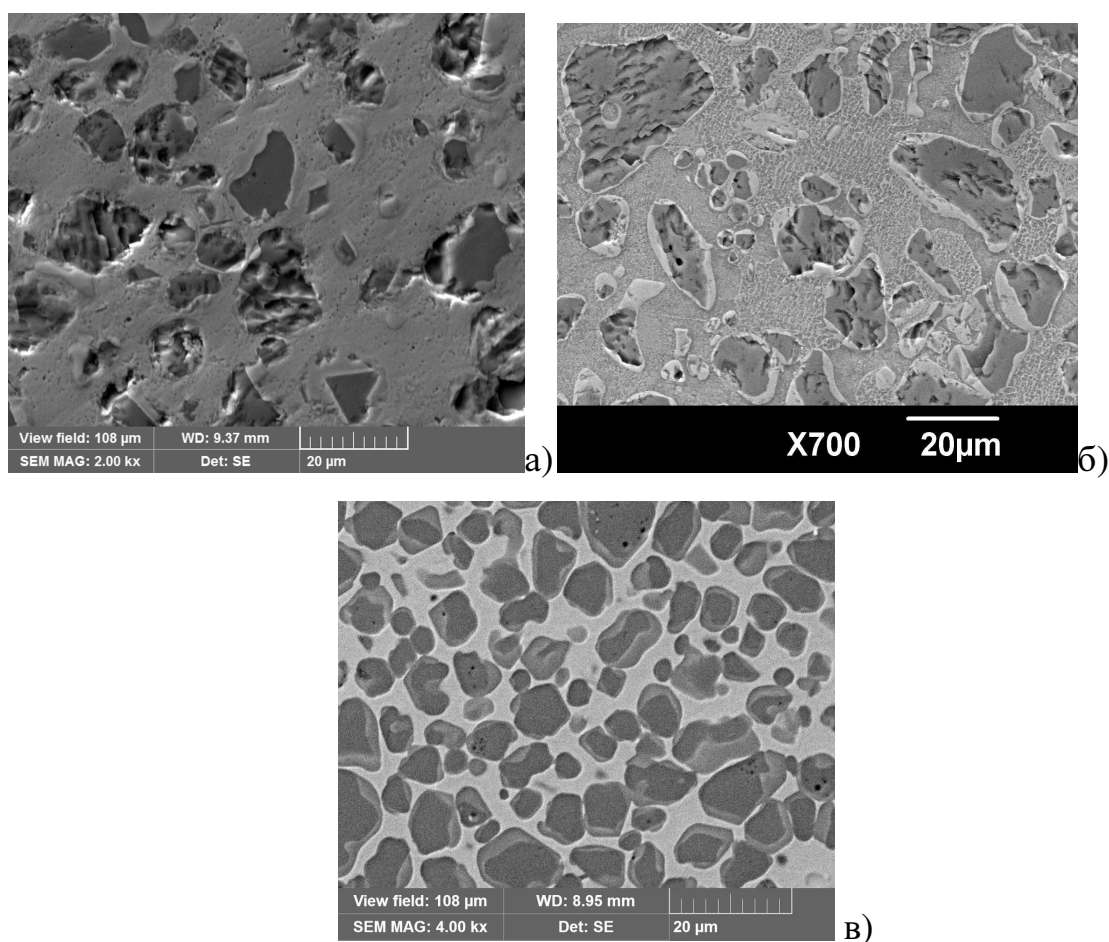


Рисунок 3.2 Кермет TiC-ЖС6У с разным объемным содержанием карбида титана:

а) TiC 45-50%; б) TiC 50-55%; в) TiC 64%.

Объемное содержание карбида титана в кермете оказывает влияние на твердость образцов. Данные микротвердости TiC-ЖС6У, TiC-ВЖЛ14Н и сплава ЖС6У, представленные в таблице 3.1, соответствуют средним значениям по 10 замерам в разных точках образца.

Таблица 3.1

Результаты определения микротвердости

№	Материал	Микротвердость $H_{\mu 0,1}$, МПа	Микротвердость $H_{\mu 0,2}$, МПа
1.	TiC-ЖС6У (TiC 50%)	980	1400
2.	TiC-ЖС6У (TiC 45%)	600	—
3.	TiC-ВЖЛ14Н (TiC 50%)	690	950
4.	TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%)	860	1050
5.	ЖС6У	540	650
6.	12Х18Н10Т	—	260

На испытательной машине «Schenck» исследовались показатели предела прочности на сжатие образцов при разных температурах. Результаты представлены в таблице 3.2 [47]. Экспериментальные данные представлены усредненными результатами по трем образцам.

Таблица 3.2

Данные по пределу прочности материалов при сжатии (МПа)

№	Температура испытания, °С	Предел прочности материала сжатия, МПа	
		Кермет TiC-ЖС6У	Сплав ЖС6У
1	20	2440	1500
2	300	2270	1200
3	600	2215	980
4	900	1100	750

Данные таблицы показывают, что предел прочности на сжатие у кермета TiC–ЖС6У существенно выше, чем у сплава ЖС6У во всем исследованном диапазоне температур.

Литые изделия могут содержать микропористость, которая есть также и в керметах, полученных инфильтрацией расплава металла (рис. 3.1). Это для шаровых узлов затвора запорной арматуры является недостатком. Например, выход микропоры диаметром до 15...25 мкм на поверхность шаровой пробки или седла при их механической обработке может привести к негерметичности затвора крана [47]. Устранение дефектов возможно путем нанесения износостойких покрытий.

На рисунке 3.3 (а) и (б) представлена структура кермета без покрытия и с нанесением покрытия TiN. На рисунках видно качественное соединение кермета с покрытием и отсутствие пор, трещин или других дефектов в переходной зоне.

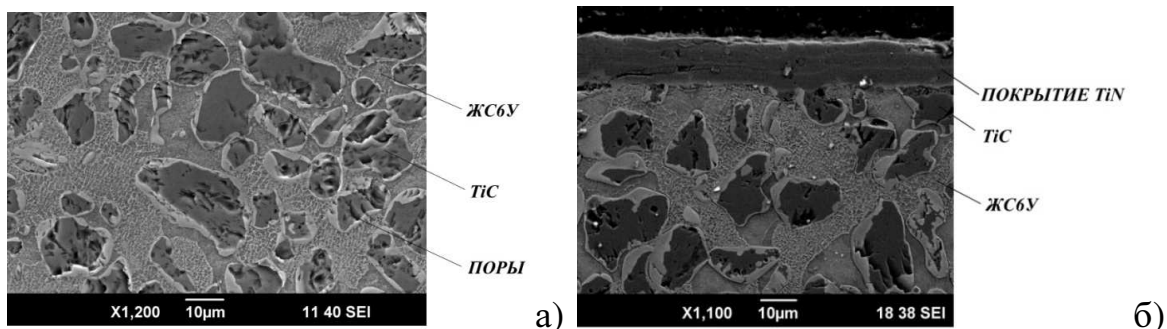


Рисунок 3.3 Микроструктура образцов кермета TiC-ЖС6У без (а) и с покрытием TiN (б)

Данные по микротвердости покрытий при нагрузке 100Г и 200Г, нанесенных на образцы TiC-ЖС6У и ЖС6У, представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Твердость образцов и покрытий, нанесенных на исследуемые образцы

№	Материал	Микротвердость $H_{0,1}$, МПа	Микротвердость $H_{0,2}$, МПа
1.	TiC-ЖС6У	983	1400
2.	TiC-ЖС6У+TiCrN	1870	—
3.	ЖС6У	540	650
4.	TiC-ЖС6У + TiN	1561	1590
5.	TiC-ЖС6У + Zr-Ti-N-C	1313	1380

Из табл. 3.3 видно, что нанесение износостойких покрытий существенно увеличивает микротвердость поверхностей трения.

3.2 Зависимость характеристик адгезионного взаимодействия от температуры и давления для материалов без покрытий

Исследовали инденторы из керметов “карбид титана – никелевый сплав ЖС6У” (далее «TiC – ЖС6У»), “карбид титана- никелевый сплав ВЖЛ14Н” (далее «TiC – ВЖЛ14Н») и “карбид титана- никелевый сплав ВЖЛ14Н” с объемным содержанием карбида титана 64 % (далее «TiC – ВЖЛ14Н (TiC 64 %)»), а также для сравнения – индентор из никелевого сплава ЖС6У. В

качестве контртела использовали плоские образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и никелевого сплава ЖС6У, а также из керметов “карбид титана – никелевый сплав ЖС6У” с объемным содержанием карбида титана TiC 45-50 % (далее «TiC – ЖС6У (TiC 45-50 %)») и “карбид титана- никелевый сплав ВЖЛ14Н” с объемным содержанием карбида титана 64% (далее «TiC – ВЖЛ14Н (TiC-64 %)»)

Полученные экспериментальные результаты приведены на рис. 3.4 – рис. 3.9. и в табл. 3.4 – 3.6.

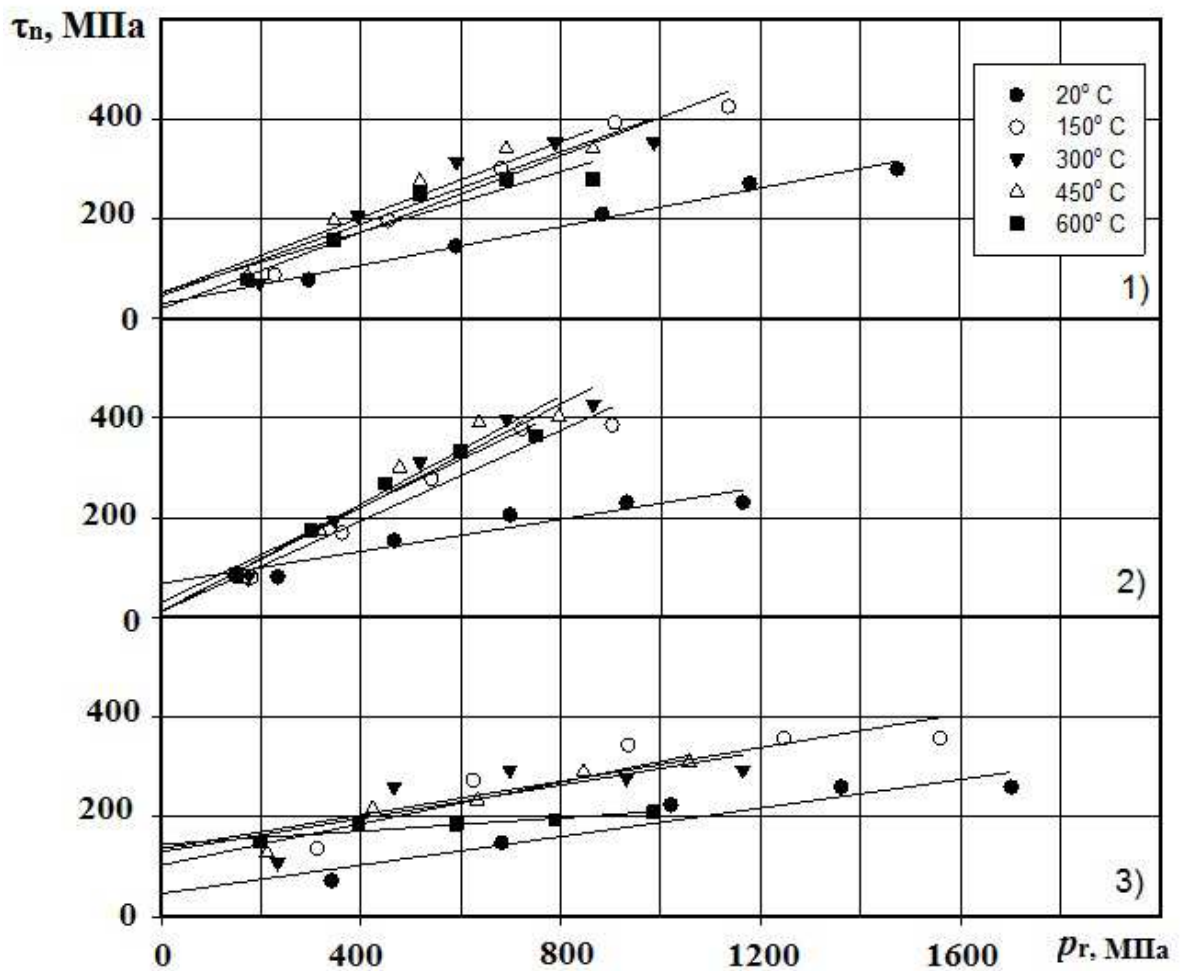


Рисунок 3.4 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта образцов 12Х18Н10Т с инденторами: 1) TiC-ЖС6У; 2) ЖС6У; 3) TiC-ВЖЛ14Н.

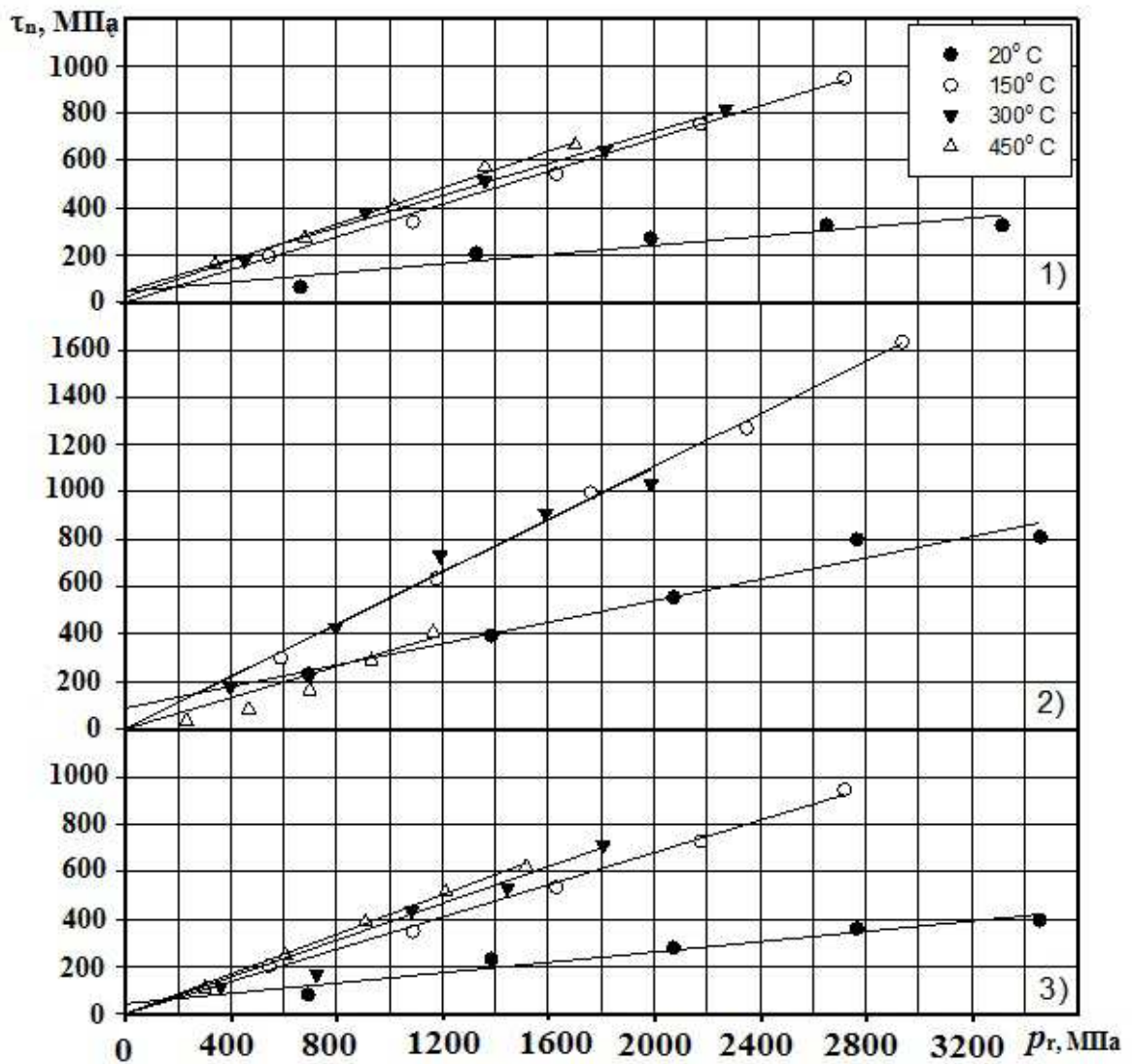


Рисунок 3.5 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта образцов ЖС6У с инденторами: 1) TiC-ЖС6У; 2) ЖС6У; 3) TiC-ВЖЛ14Н.

Как видно из рис. 3.4 -3.6 для всех исследованных пар трения зависимость прочности τ_n адгезионных связей на срез от давления p_r на контакте в исследованном диапазоне температур имеет прямо пропорциональный характер и описывается биномиальной функцией:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (3.1)$$

где τ_0 – прочность адгезионных связей на срез при отсутствии давления на контакте;

p_r – коэффициент упрочнения адгезионных связей от действия давления на контакте.

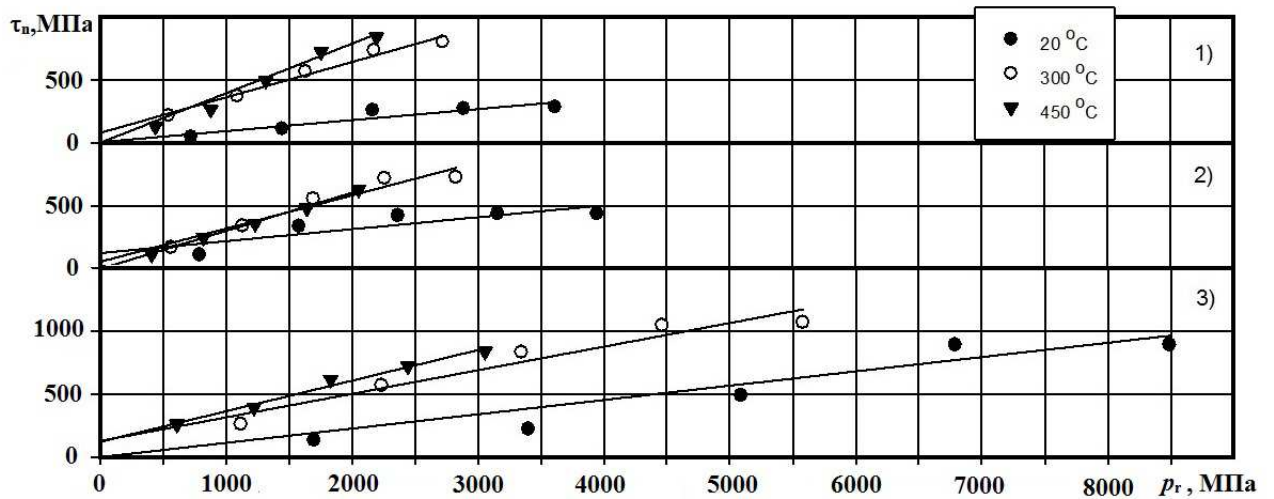


Рисунок 3.6 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта инденторов с образцами: 1) TiC-ЖС6У (TiC 55%) - TiC-ЖС6У (TiC 45-50%)
2) TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%) - TiC-ЖС6У (TiC 45-50%)
3) TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%) - TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%)

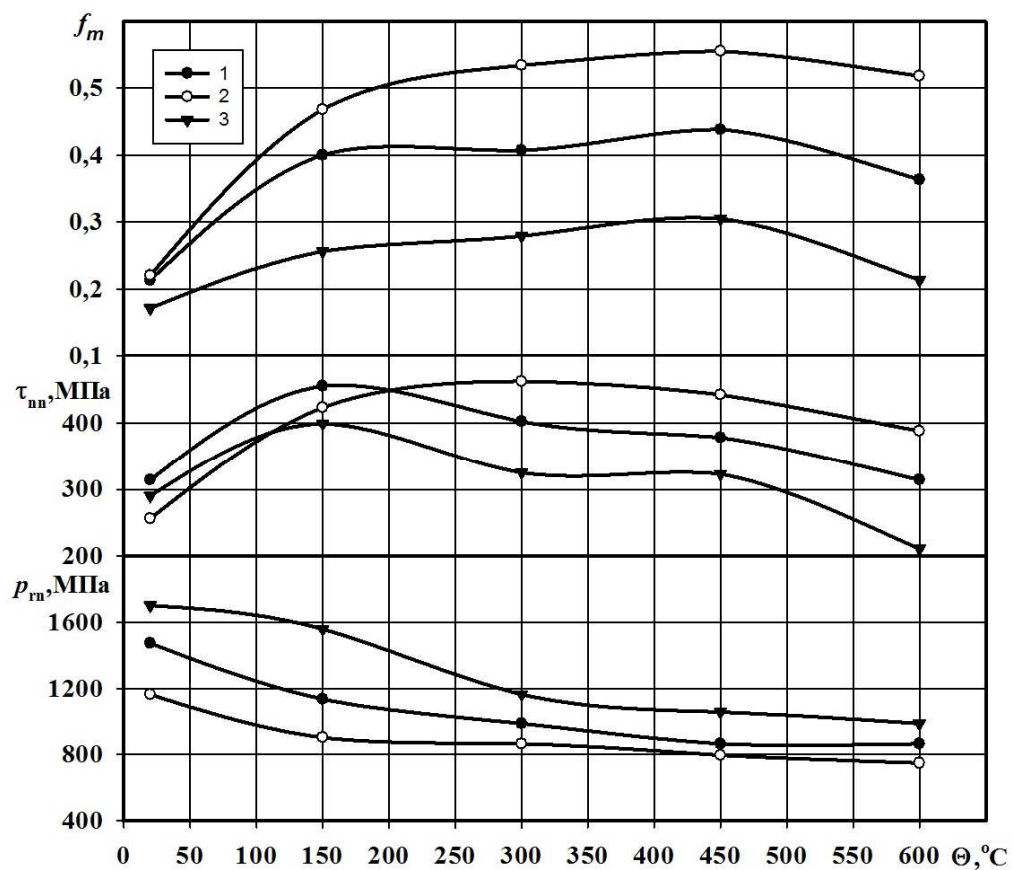


Рисунок 3.7 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов 12Х18Н10Т с инденторами: 1) TiC-ЖС6У; 2) ЖС6У; 3) TiC-ВЖЛ14Н.

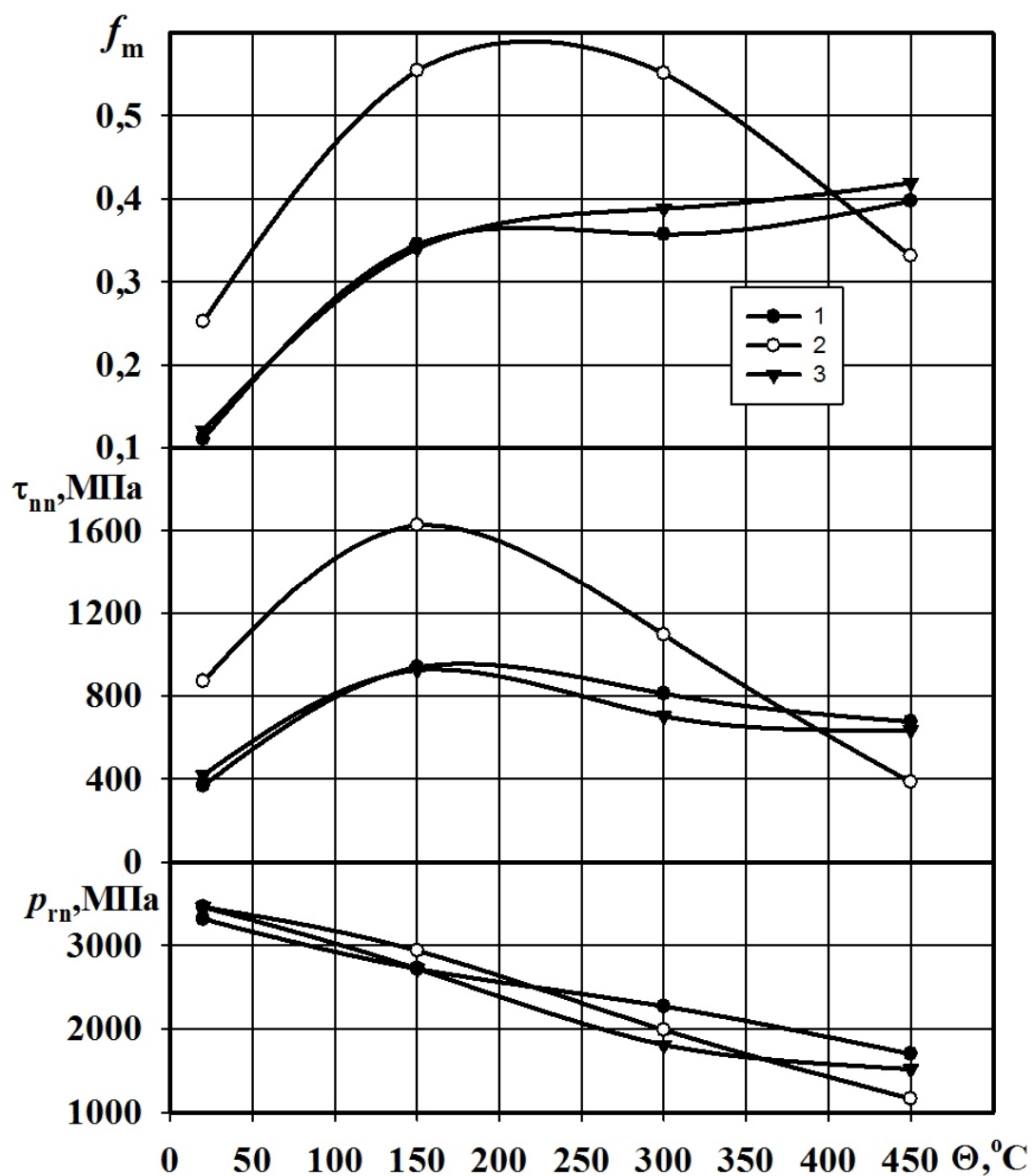


Рисунок 3.8 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов ЖС6У с инденторами:
1) TiC-ЖС6У; 2) ЖС6У; 3) TiC-ВЖЛ14Н.

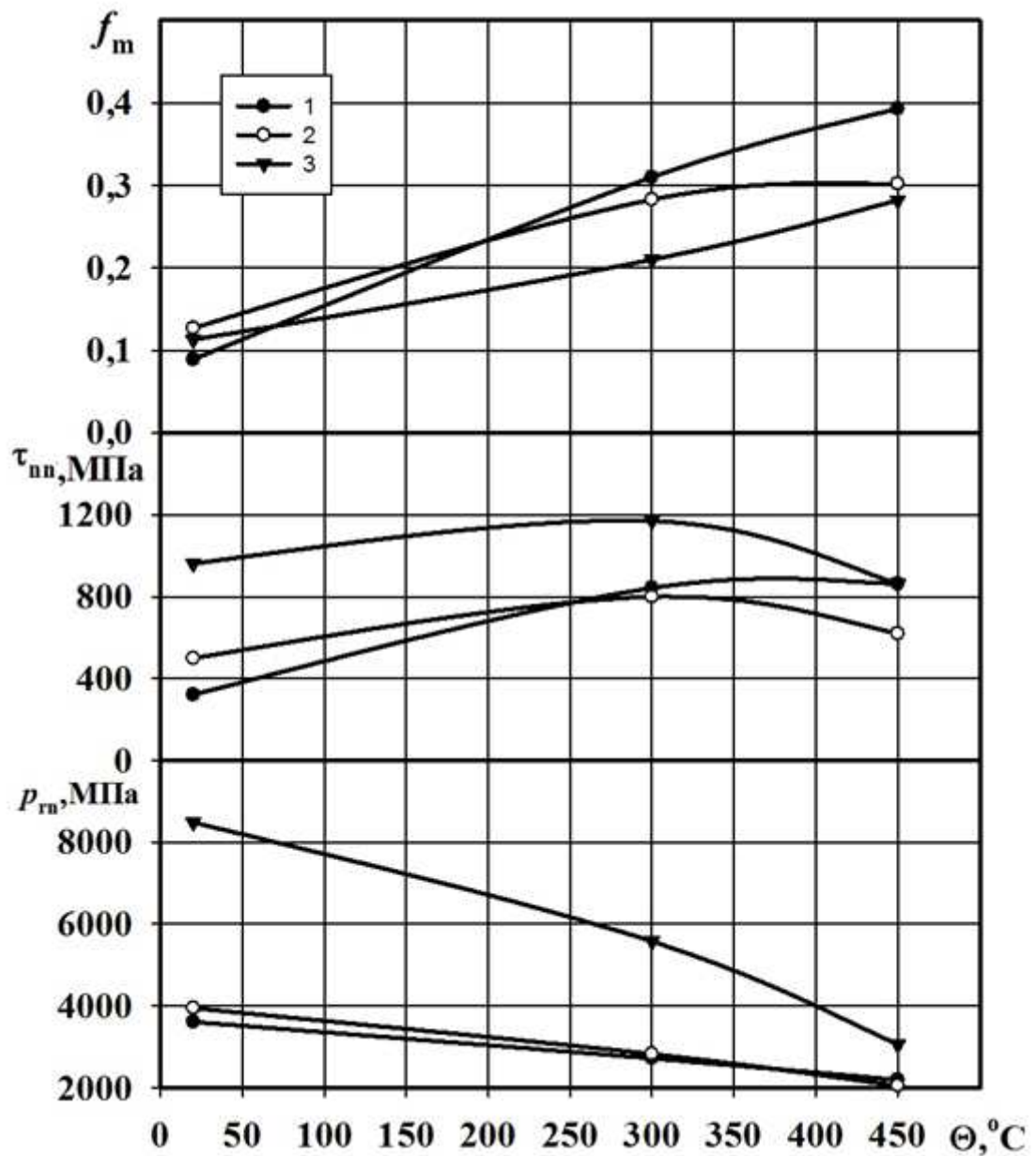


Рисунок 3.9 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта инденторов с образцами:

- 1) TiC-ЖС6У (TiC 55%) – TiC-ЖС6У (TiC 45-50%);
- 2) TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%) – TiC-ЖС6У (TiC 45-50%);
- 3) TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%).

Материалы и температуры контакта оказывают существенное влияние на величину фрикционных параметров τ_0 и β (табл. 3.4 – 3.6), которые изменяют прочность τ_n и молекулярную (адгезионную) составляющую коэффициента трения:

$$f_m = \frac{\tau_n}{p_r} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta \quad (3.2)$$

Таблица 3.4

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении по стали 12Х18Н10Т

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	p_{mv} , МПа	τ_{mv} , МПа	f_m	β	τ_0 , МПа
Инденатор: TiC–ЖС6У. Образец: 12Х18Н10Т	20	1474	314	0,213	0,194	29
	150	1136	455	0,400	0,384	19
	300	987	402	0,407	0,361	45
	450	865	378	0,438	0,380	50
	600	865	314	0,363	0,303	52
Инденатор: ЖС6У. Образец: 12Х18Н10Т	20	1164	256	0,220	0,161	68
	150	903	423	0,468	0,454	12
	300	865	462	0,534	0,519	13
	450	796	442	0,555	0,543	10
	600	749	388	0,518	0,478	30
Инденатор: TiC–ВЖЛ14Н. Образец: 12Х18Н10Т	20	1702	290	0,171	0,143	46
	150	1559	399	0,256	0,169	136
	300	1164	325	0,279	0,167	130
	450	1057	323	0,305	0,208	103
	600	987	211	0,213	0,066	145

Таблица 3.5

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении по сплаву ЖС6У

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	p_{mv} , МПа	τ_{mv} , МПа	f_m	β	τ_0 , МПа
Инд.: TiC–ЖС6У. Образец: ЖС6У	20	3316	368	0,111	0,097	47
	150	2720	938	0,345	0,345	0
	300	2271	811	0,357	0,337	47
	450	1702	676	0,397	0,384	22
Инденатор: ЖС6У. Образец: ЖС6У	20	3459	871	0,252	0,226	89
	150	2937	1627	0,554	0,554	0
	300	1988	1095	0,551	0,551	0
	450	1164	385	0,331	0,331	0
Инд.: TiC–ВЖЛ14Н Образец: ЖС6У	20	3459	419	0,121	0,109	43
	150	2720	925	0,340	0,340	0
	300	1808	702	0,388	0,388	0
	450	1516	635	0,419	0,419	0

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении
керамико–металлических материалов

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$p_m, \text{МПа}$	$\tau_m, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Индентор: TiC-ЖС6У (TiC 55%) Образец: TiC-ЖС6У (TiC 45-50%)	20	3611	321	0,089	0,087	6
	300	2720	843	0,310	0,281	80
	450	2195	863	0,393	0,393	0
Индентор: TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%). Образец: TiC-ЖС6У (TiC 45-50%)	20	3946	500	0,127	0,095	126
	300	2825	800	0,283	0,263	56
	450	2053	620	0,302	0,302	0
Индентор: TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%). Образец: TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%)	20	8489	962	0,113	0,113	0
	300	5581	1171	0,210	0,187	128
	450	3056	862	0,282	0,243	121

На рис.3.7–3.9 представлены результаты адгезионных исследований (p_m , τ_m и f_m) в экстремальных условиях нагружения (при вырожденном за счет релаксации пластическом контакте [48,57]), т.е. по максимальным значениям величин на графиках $\tau_n=f(p_r)$ из рис. 3.4-3.6.

Из рис. 3.7-3.9 видно, что зависимость прочности τ_m адгезионных связей от температуры Θ для всех пар трения носит экстремальный характер с максимумом при $\Theta = 150...300 ^\circ\text{C}$. Причем, для контртела из ЖС6У (рис. 3.8) – этот экстремум более ярко выражен.

Зависимость адгезионной составляющей f_m коэффициента трения от температуры Θ тоже немонотонная: с максимумом для контртела из 12Х18Н10Т при температуре около $450 ^\circ\text{C}$ (рис. 3.7), для контртела из ЖС6У – при температуре около $200 ^\circ\text{C}$ (рис. 3.8) только для фрикционной пары ЖС6У-ЖС6У. Для других пар трения, начиная с температуры $\Theta \approx 200 ^\circ\text{C}$, величина f_m изменяется незначительно (рис. 3.8).

Из рис. 3.7 и 3.8 видно, что нагрузочная способность фрикционного контакта (характеризуемая величиной p_m пропорциональной кратковременному пределу текучести σ_T более мягкого тела пары трения [54,57]), для всех

исследованных пар с повышением температуры Θ контакта уменьшается. При этом, применение сплава ЖС6У взамен стали 12Х18Н10Т в 1,5 – 2 раза повышает нагрузочную способность фрикционного контакта.

Из рис. 3.7 и 3.8 следует также, что использование кермета в качестве материала хотя бы для **одной** детали пары трения существенно уменьшает как прочность τ_n адгезионных связей на срез, так и молекулярную составляющую f_m коэффициента трения во всем исследованном диапазоне температур.

Как видно из табл. 3.4 и 3.6, то же самое происходит с коэффициентом β (упрочнения адгезионных связей от действия нормальных давлений p_r) т.е. использование кермета даже в **одной** из деталей пары трения уменьшает величину фрикционного параметра β и, следовательно, величину τ_n при одном и том же давлении p_r .

Из этих таблиц видно также, что фрикционный параметр τ_0 , имеет тенденцию, в основном, к уменьшению с повышением температуры Θ контакта. При этом, величина параметра τ_0 существенно меньше величины τ_{nn} .

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3.9, свидетельствуют о том, что применение изучаемых керметов в **обеих** деталях пары трения:

во-первых, существенно повышает несущую способность (величину p_m) фрикционного подвижного контакта примерно в 1,2-2 раза по сравнению с парами, в которых лишь одна деталь из кермета;

во-вторых, повышение температуры не оказывает столь значительного влияния на уменьшение несущей способности фрикционного контакта;

в-третьих, незначительно изменяется характер зависимости $\tau_{nn} = f(\Theta)$: с максимум при более высоких температурах контакта;

в-четвертых, постепенно (без скачков) увеличивает величину f_m с повышением температуры Θ контакта в исследованном диапазоне;

в-пятых, при температурах контакта выше $\sim 100^\circ\text{C}$ уменьшает молекулярную составляющую коэффициента f_m трения (примерно в 1,5-2 раза).

При этом, установлено, что наилучшие триботехнические характеристики (p_{rn} , τ_{nn} и f_m) обеспечивает фрикционная пара TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%). Как видно, из табл. 3.5 именно эта фрикционная пара обеспечивает также наименьшую величину фрикционного параметра β , т.е. у этой пары трения внешняя нагрузка оказывает наименьшее влияние на величину тангенциальной прочности τ_n адгезионных связей на срез (что очень важно для обеспечения плотного контакта и герметизации при работе крана запорной арматуры).

3.3 Зависимость адгезионных параметров от температуры контакта и давления для материалов с покрытиями

Как было отмечено выше, керметы, в том числе на основе карбида титана, могут иметь поры, нежелательные для герметичной запорной арматуры. Поэтому для экранизации пор на поверхности деталей из керметов наносят износостойкие покрытия, которые одновременно повышают триботехнические свойства керметов. Для исследования эффективности покрытий вначале наносили их на поверхности **одной** из деталей (образцов) фрикционной пары, а затем исследовали триботехнические характеристики керамико-металлических материалов с нанесенными покрытиями на **обе** детали фрикционной пары.

Экспериментальные исследования адгезионного взаимодействия выполнены сначала для образцов из стали 12Х18Н10Т и сплава ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C и инденторов без покрытий из ЖС6У и кермета TiC-ЖС6У, а затем – для образцов TiC-ЖС6У и инденторов из TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н с покрытием TiCrN.

Полученные экспериментальные результаты приведены на рис. 3.10 и 3.15 и в табл. 3.7-3.9. Здесь же приведены для сравнения данные, полученные для аналогичных пар трения без покрытий.

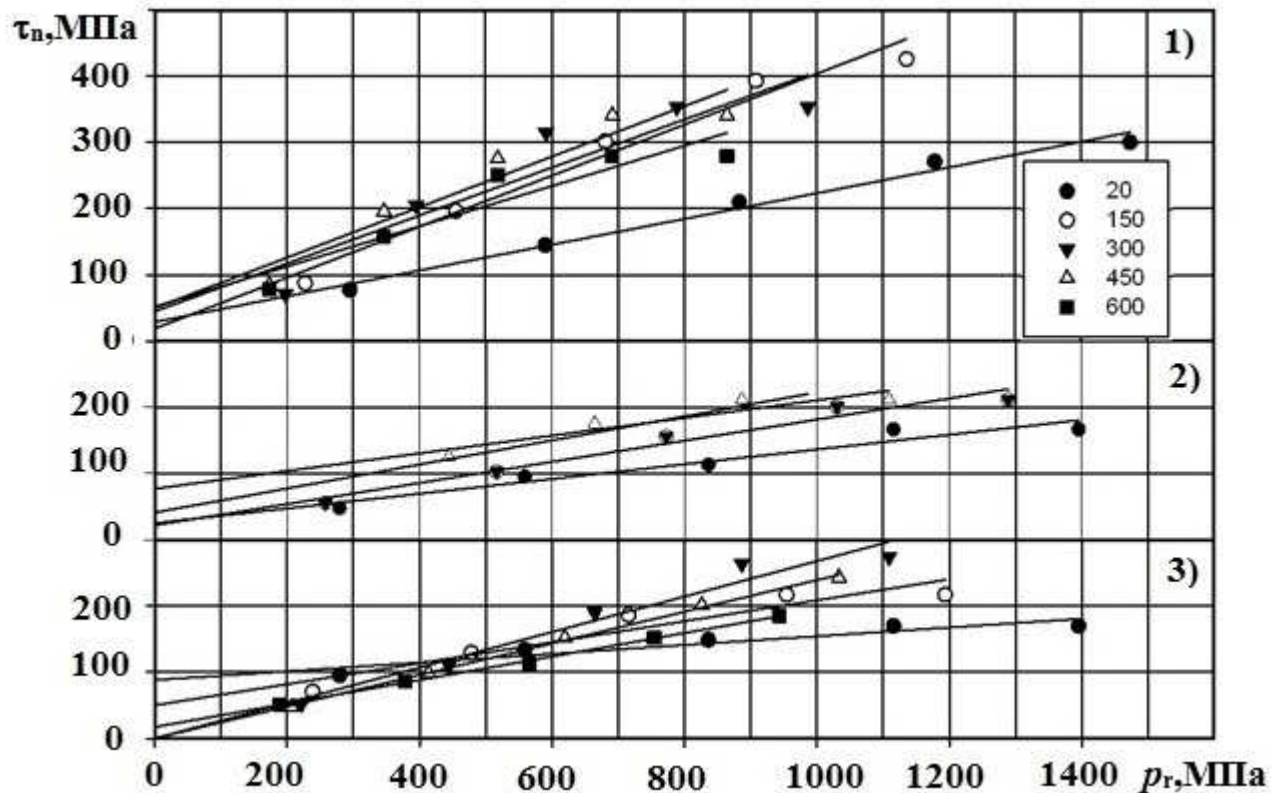


Рисунок 3.10 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта инденторов TiC-ЖС6У с образцами: 1) 12X18H10T; 2) 12X18H10T + Zr-Ti-N-C; 3) 12X18H10T+TiN.

Как видно из рис. 3.10-3.12, нанесение покрытий на поверхности одной или обеих деталей пар трения не изменяет прямопропорциональный характер зависимости прочности τ_n на срез адгезионных связей от давления p_r на фрикционном подвижном контакте в исследованном диапазоне температур, которая описывается биномиальной функцией (3.1).

Материал покрытия и температура Θ контакта оказывают влияние на предельные нормальные давления $p_{гн}$, фрикционные параметры τ_0 и β (табл. 3.7-3.9), которые изменяют предельные значения прочности $\tau_{гн}$ на срез адгезионных связей и молекулярной составляющей f_m коэффициента трения.

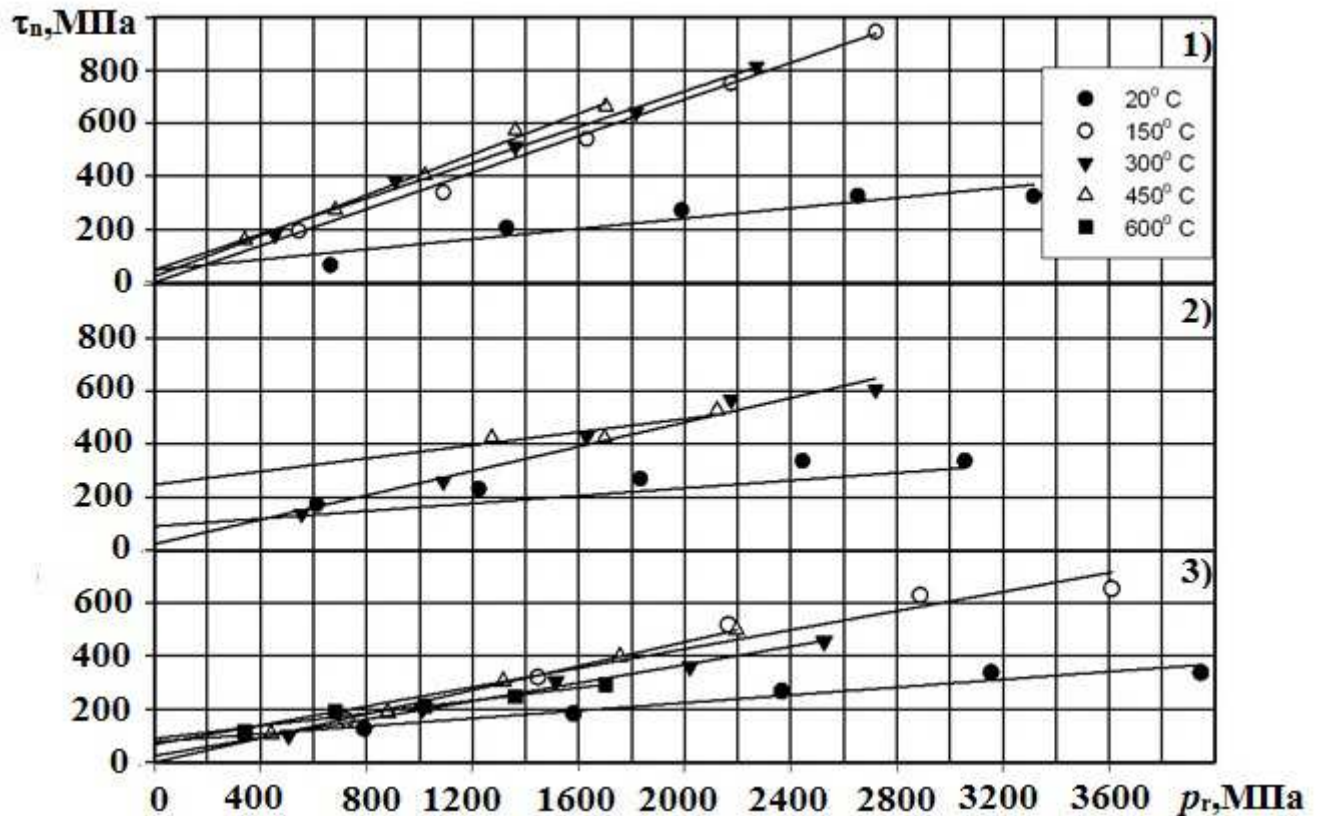


Рисунок 3.11 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта инденторов TiC-ЖС6У с образцами: 1) ЖС6У; 2) ЖС6У+Zr-Ti-N-C; 3) ЖС6У+TiN.

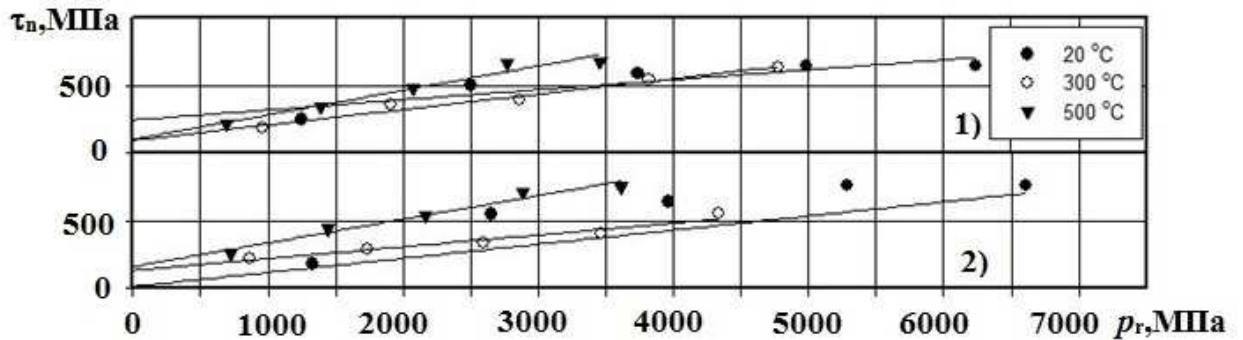


Рисунок 3.12 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта образцов TiC-ЖС6У + TiCrN с инденторами: 1) TiC-ВЖЛ14Н + TiCrN; 2) TiC-ЖС6У + TiCrN.

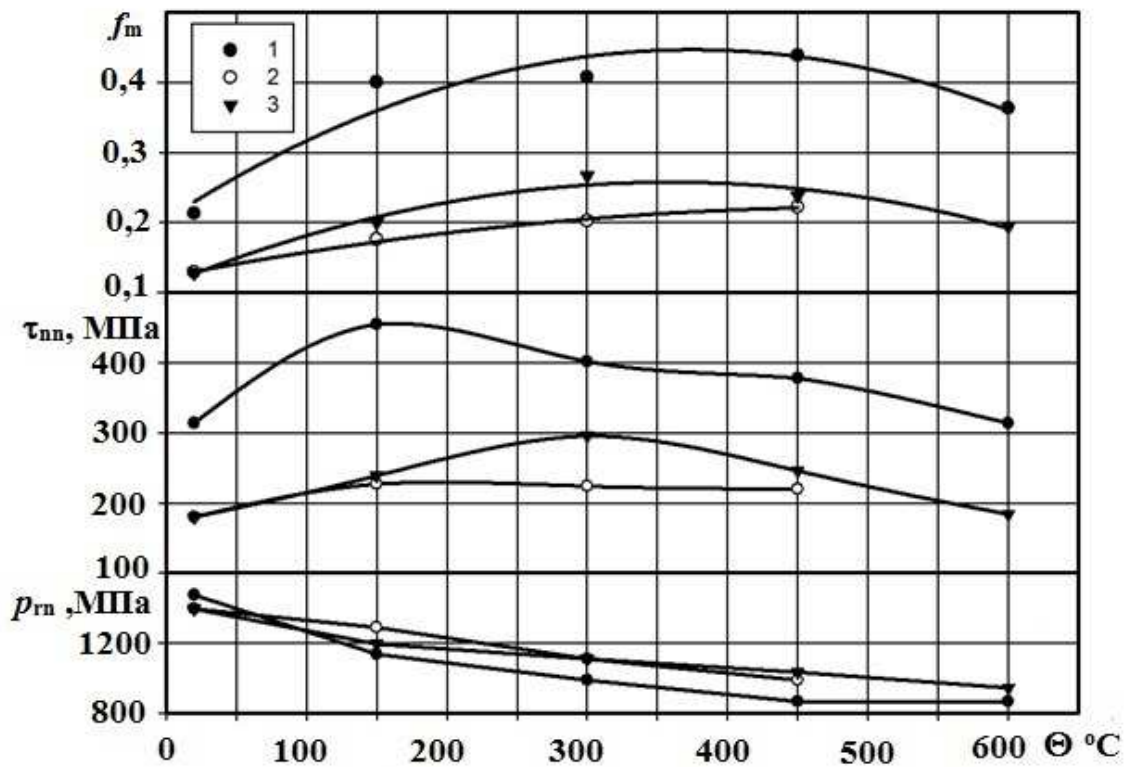


Рисунок 3.13 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта инденторов TiC-ЖС6У с образцами: 1) 12X18H10T; 2) 12X18H10T + Zr-Ti-N-C; 3) 12X18H10T+TiN.

Из рис. 3.13 и 3.14 видно, что нагрузочная способность фрикционного контакта, характеризуемая величиной $p_{гн}$, при нанесении покрытия хотя бы на одну из деталей фрикционной пары несколько увеличивается и постепенно уменьшается с повышением температуры контакта. То, что с нанесением покрытия величина $p_{гн}$ мало изменяется, можно объяснить тем, что величина $p_{гн}$ определяется в основном физико-механическими свойствами подложки [53,54,57], а с нанесением покрытий эти свойства мало изменяются [81,97]. Вместе с тем, не изменяя немонотонный характер зависимостей $\tau_{nn} = f(\Theta)$ – с максимумом при температуре $\sim 150-300$ °C, - нанесение износостойких покрытий Zr-Ti-N-C или TiN на поверхность одной из пар трения заметно (в 1,3-2 раза) уменьшает прочность τ_{nn} адгезионных связей на срез и молекулярную составляющую коэффициента f_m трения. При этом существенной разницы в полученных результатах по трению с покрытиями Zr-Ti-N-C или TiN практически не получили.

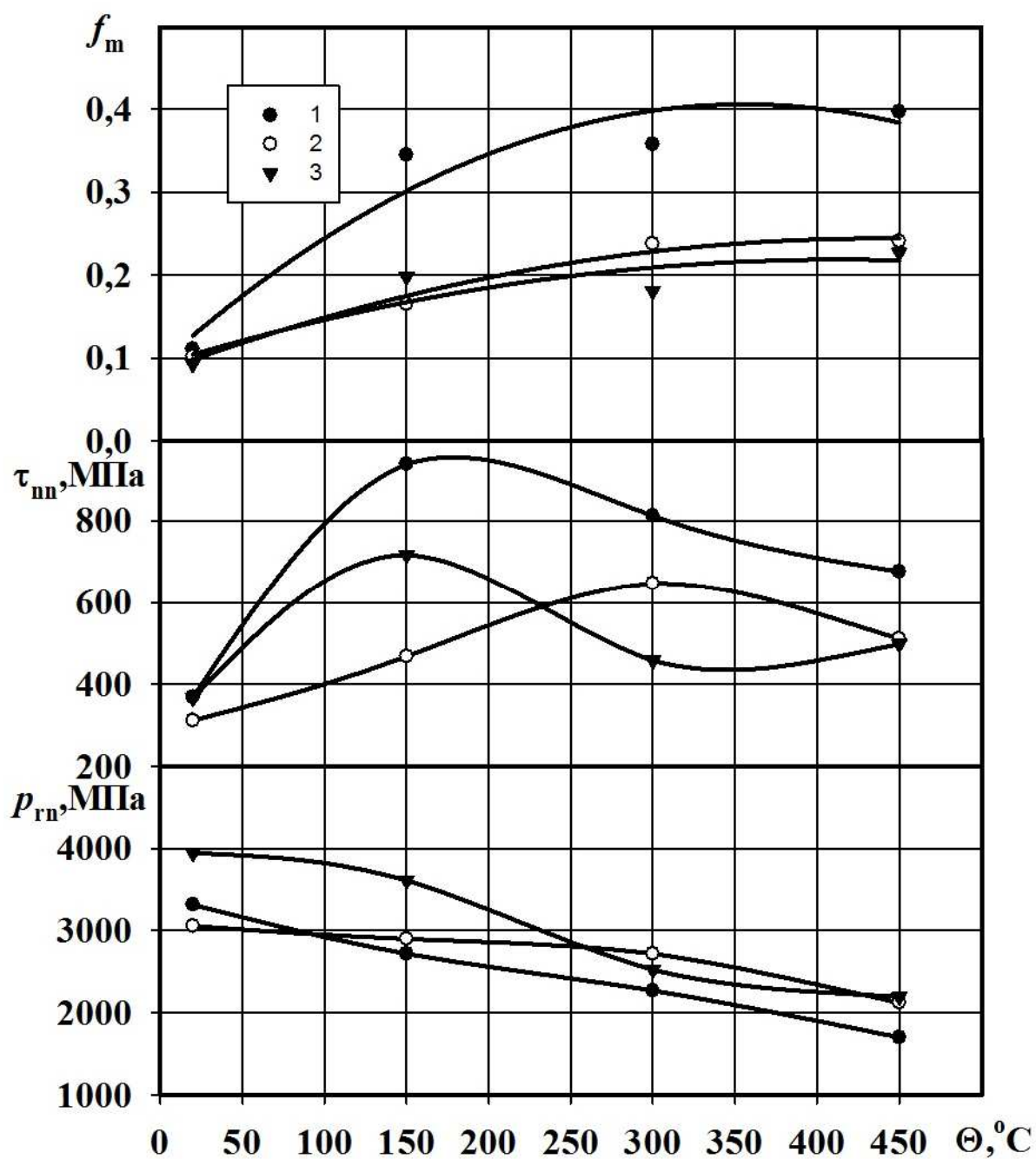


Рисунок 3.14 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта инденторов TiC-ЖС6У с образцами:
1) ЖС6У; 2) ЖС6У+Zr-Ti-N-C; 3) ЖС6У+TiN.

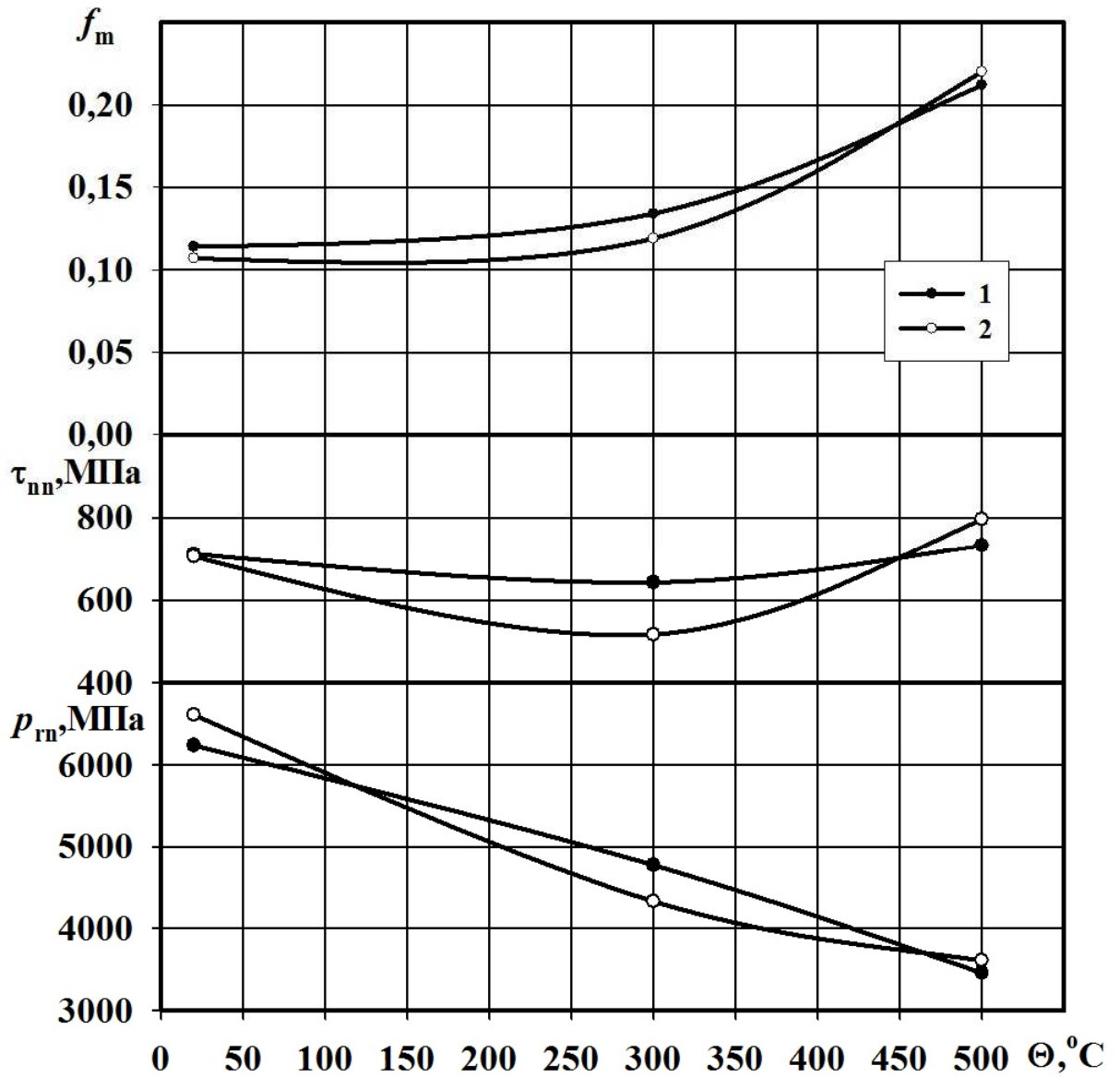


Рисунок 3.15 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов TiC-ЖС6У + TiCrN с инденторами: 1)TiC-ВЖЛ14Н + TiCrN; 2)TiC- ЖС6У + TiCrN

Как видно из табл. 3.7 и 3.8, то же самое происходит с коэффициентом β (упрочнения адгезионных связей от действия номинальных давлений p_r), т.е. нанесение износостойкого покрытия даже на одну из деталей пары трения уменьшает величину прочности τ_n адгезионных связей на срез при одном и том же давлении p_r .

Таблица 3.7

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении по стали 12X18H10T с покрытием

	$\Theta, ^\circ \text{C}$	$p_m, \text{МПа}$	$\tau_{mv}, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: 12X18H10T	20	1474	314	0,213	0,194	29
	150	1136	455	0,400	0,384	19
	300	987	402	0,407	0,361	45
	450	865	378	0,438	0,380	50
	600	865	314	0,363	0,303	52
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: 12X18H10T+Zr-Ti-N-C	20	1395	180	0,129	0,111	25
	150	1289	227	0,176	0,159	22
	300	1109	224	0,202	0,133	77
	450	987	220	0,222	0,181	41
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: 12X18H10T+TiN	20	1395	180	0,129	0,066	88
	150	1194	239	0,200	0,158	50
	300	1109	296	0,267	0,267	0
	450	1033	246	0,238	0,238	0,2
	600	943	184	0,195	0,177	17

Таблица 3.8

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении по сплаву ЖС6У с покрытием

	$\Theta, ^\circ \text{C}$	$p_m, \text{МПа}$	$\tau_{mv}, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Индентор: TiC- ЖС6У Образец: ЖС6У	20	3316	369	0,111	0,097	47
	150	2720	938	0,345	0,345	0
	300	2271	812	0,358	0,337	47
	450	1702	676	0,397	0,384	22
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: ЖС6У +Zr-Ti-N-C	20	3056	312	0,102	0,072	90
	300	2719	647	0,238	0,230	23
	450	2122	511	0,241	0,124	247
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: ЖС6У+TiN	20	3946	367	0,093	0,073	78
	150	3611	717	0,198	0,180	68
	300	2526	458	0,181	0,172	24
	450	2195	498	0,227	0,227	0
	600	1702	293	0,172	0,120	89

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении
керамико–металлических материалов с покрытием

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$p_m, \text{МПа}$	$\tau_{mn}, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Индентор: TiC-ВЖЛ14Н + TiCrN Образец: TiC-ЖС6У + TiCrN	20	6237	711	0,114	0,074	249
	300	4775	642	0,134	0,114	97
	500	3459	732	0,212	0,181	106
Индентор: TiC-ЖС6У + TiCrN. Образец: TiC-ЖС6У + TiCrN	20	6609	705	0,107	0,104	17
	300	4331	516	0,119	0,088	135
	500	3611	796	0,220	0,175	165

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3.15, свидетельствуют о том что нанесение износостойкого покрытия на поверхности **обеих** деталей из керамико-металлических материалов пары трения, существенно изменяет их триботехнические параметры:

- в 1,5-1,8 раза повышается несущая способность (величина p_m) фрикционного контакта;
- изменяется характер зависимости фрикционного параметра τ_{mn} от температуры Θ контакта: с минимум при $\Theta \approx 450 ^\circ\text{C}$ (а не с максимумом как в других парах, например, рис. 3.7 и 3.9);
- температура Θ начинает оказывать заметное влияние на величину коэффициента f_m , начиная примерно с $450 ^\circ\text{C}$: при дальнейшем повышении температуры величина f_m повышается.

Это же видно из данных, приведенных в табл. 3.9. Сопоставление этих данных с данными табл 3.7 и 3.8 показывает, что нанесение покрытий на изучаемые керметы обеспечивает наименьшую величину фрикционного параметра β , т.е. для таких пар трения внешняя нагрузка оказывает наименьшее влияние на величину τ_n прочности адгезионных связей на срез, что существенно уменьшает силу трения (при заданном давлении). Следовательно, такая пара трения может обеспечить плотный фрикционный контакт с наименьшими энергетическими затратами.

3.4 Влияние нефтяной среды на показатели адгезии при трении

Известно, что запорная арматура работает в жидкой или газовой среде. Для нефтепроводной арматуры – это сырая нефть или ее смесь с водой. Поэтому представляет научный и практический вопрос, как влияет среда, в частности сырая нефть, на ранее полученные результаты по адгезионному взаимодействию изучаемых материалов при трении скольжения?

Чтобы ответить на этот вопрос, выполнены экспериментальные адгезионные исследования на образцах из стали 12Х18Н10Т и жаропрочного сплава ЖС6У с индентором из TiC-ЖС6У. Перед каждым опытом сырую нефть кисточкой наносили на образцы и индентор. После опыта исследуемые поверхности протирали спиртом для обезжиривания и опыты повторяли всухую (для сравнения результатов).

Данные, полученные в ходе этих экспериментов, представлены на рис.3.16 – 3.19 и в таблицах 3.10–3.11.

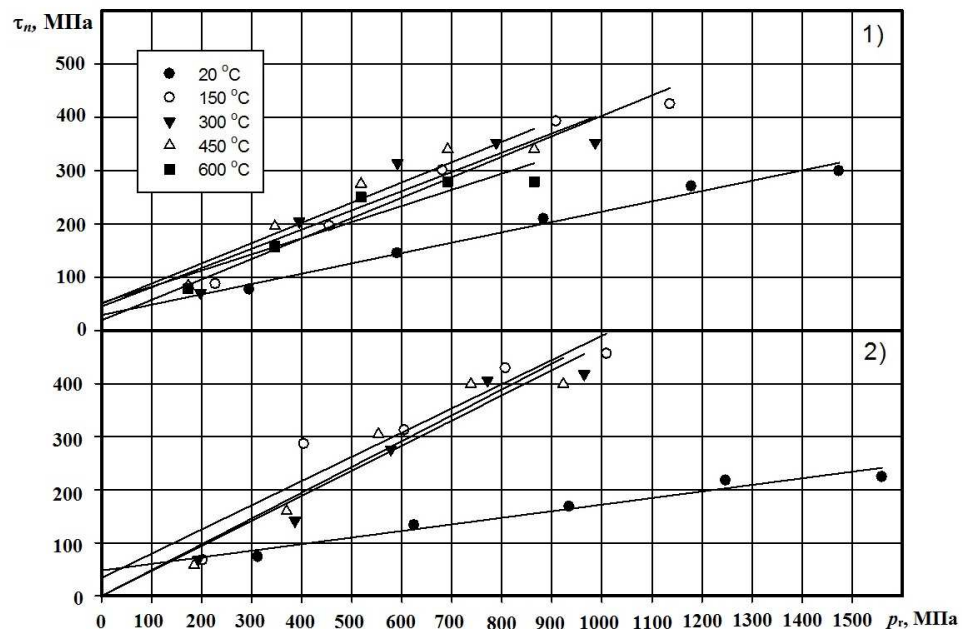


Рисунок 3.16 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта индентора TiC-ЖС6У с образцом 12Х18Н10Т: 1) без нефти; 2) с нефтью.

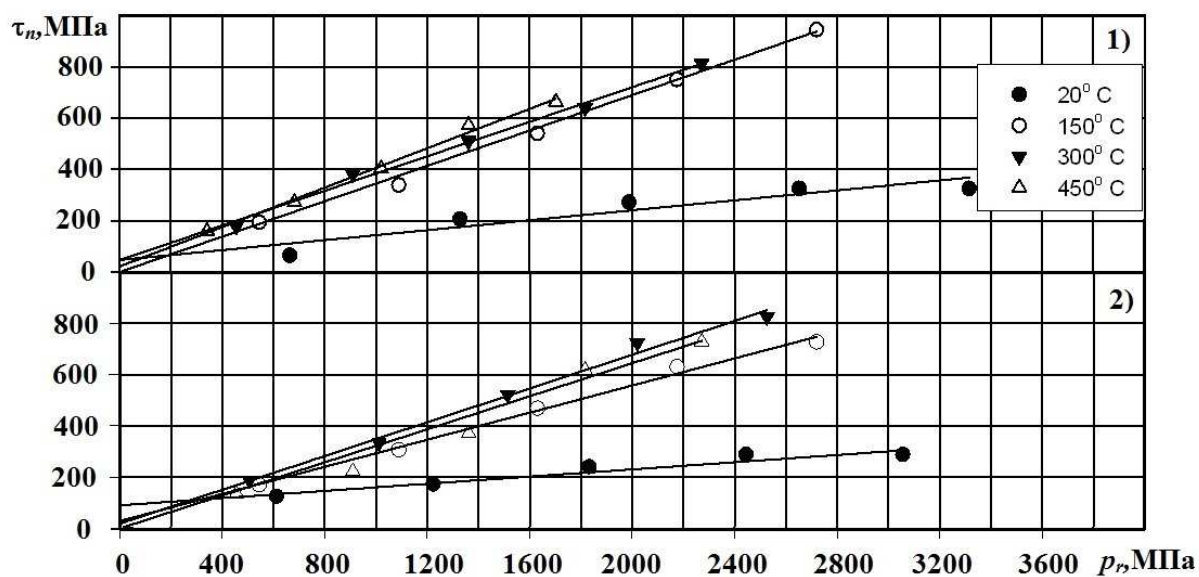


Рисунок 3.17 Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта индентора TiC-ЖС6У с образцами ЖС6У: 1) без нефти; 2) с нефтью.

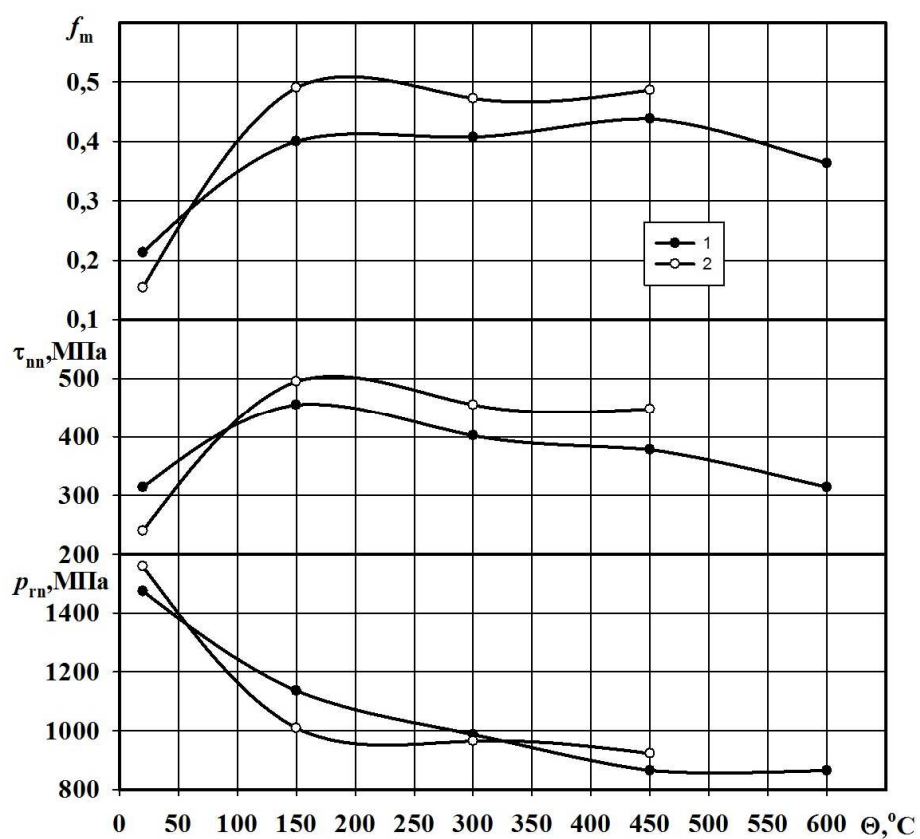


Рисунок 3.18 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта индентора TiC-ЖС6У с образцами 12X18H10T: 1) без нефти; 2) с нефтью.

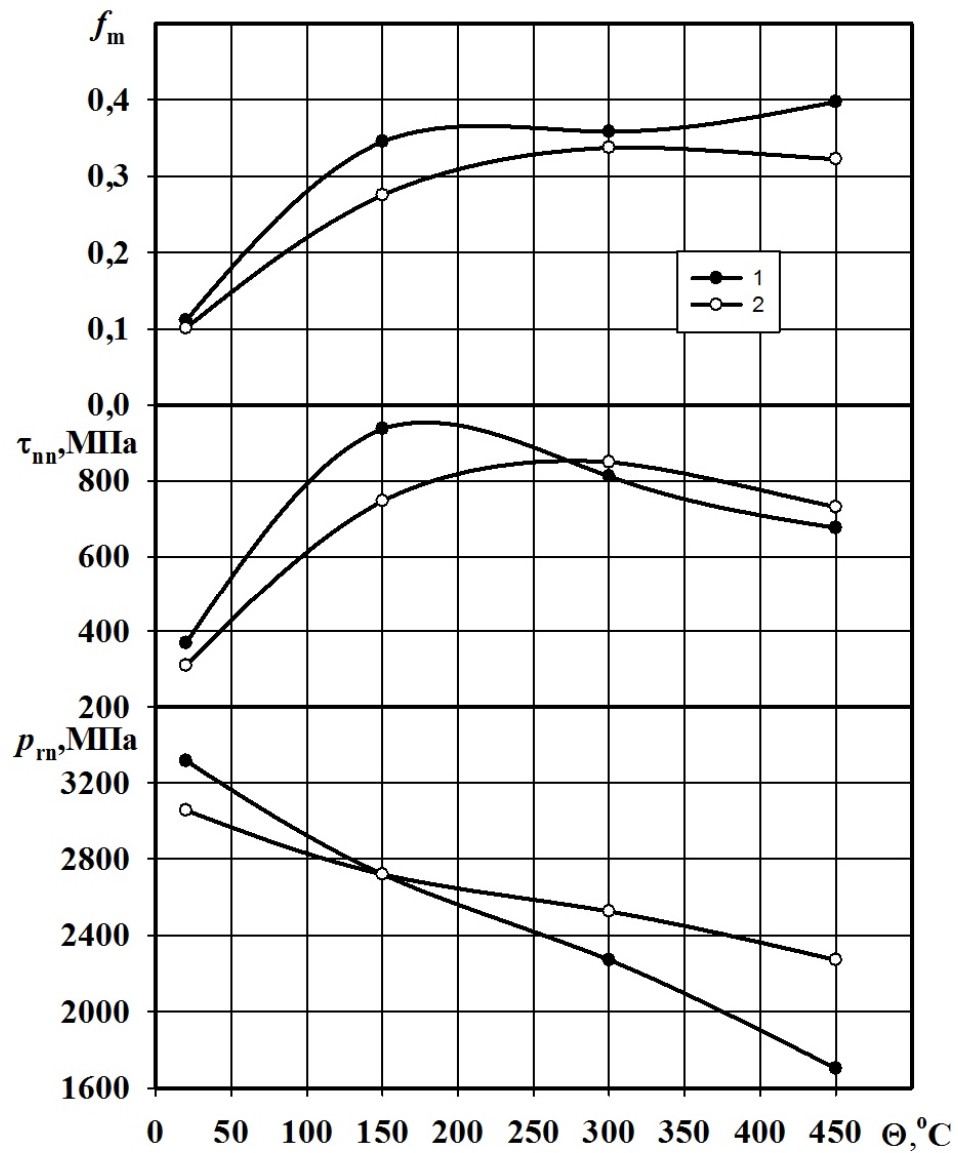


Рисунок 3.19 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта инденора TiC-ЖС6У с образцами ЖС6У: 1) без нефти; 2) с нефтью.

Из рис. 3.16 и 3.17 видно, что и в среде сырой нефти зависимость прочности τ_n адгезионных связей на срез имеет прямопропорциональный характер и описывается биномиальной функцией (3.1) со свободным членом τ_0 и коэффициентом β .

Как следует из табл. 3.10 и 3.11, наличие сырой нефти на исследуемых поверхностях не оказывает существенного влияния на триботехнические параметры изучаемых пар трения.

Таблица 3.10

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении стали
12X18H10T в нефтяной среде и всухую

	$\Theta, ^\circ \text{C}$	p_{mv} МПа	τ_{mv} МПа	f_m	β	τ_0 , МПа
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: 12X18H10T	20	1474	314	0,213	0,194	29
	150	1136	455	0,400	0,384	19
	300	987	402	0,407	0,361	45
	450	865	378	0,438	0,380	50
	600	865	314	0,363	0,303	52
Индентор: TiC-ЖС6У. Образец: 12X18H10T (нефть)	20	1559	240	0,154	0,124	48
	150	1009	495	0,490	0,456	34
	300	965	455	0,472	0,472	0
	450	923	448	0,486	0,486	0

Таблица 3.11

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении сплава
ЖС6У в нефтяной среде и всухую

	$\Theta, ^\circ \text{C}$	p_{mv} МПа	τ_{mv} МПа	f_m	β	τ_0 , МПа
Индентор: TiC- ЖС6У Образец: ЖС6У	20	3316	369	0,111	0,097	47
	150	2720	938	0,345	0,345	0
	300	2271	812	0,358	0,337	47
	450	1702	676	0,397	0,384	22
Индентор: TiC- ЖС6У Образец: ЖС6У (нефть)	20	3056	310	0,101	0,072	90
	150	2720	747	0,275	0,264	29
	300	2526	850	0,337	0,329	19
	450	2271	731	0,322	0,322	0

В результате этого при нагружении в экстремальных условиях (вырожденного пластического контакта – при давлении p_m) характеристики адгезионного взаимодействия при трении, полученные всухую и при наличии нефтяной среды, незначительно отличались по величине в исследованном диапазоне температур Θ контакта.

Полученные результаты можно объяснить тем, что сырая нефть из-за наличия в ней абразивных включений, соли, воды и прочее, по-существу, не

может быть смазочным материалом при трении. Кроме того, граничное трение в условиях высоких давлений и температур может перейти в сухое трение [64].

Следовательно, результаты исследований по адгезионному взаимодействию в условиях сухого трения вполне применимы для трения в среде сырой нефти.

3.5 Теоретический анализ результатов исследования адгезионного взаимодействия при трении

Здесь и в дальнейшем под адгезионным взаимодействием будем понимать все виды межатомного и молекулярного взаимодействий между твердыми телами при их контактировании и относительном перемещении, а под изнашиванием – процесс отделения частиц более твердого из контактирующих тел в приконтактной зоне в результате многократного нарушения фрикционных связей.

Силы адгезионного контактного взаимодействия между поверхностями твердых тел могут иметь физическую (Ван-дер-Ваальсовы силы) и химическую (хемосорбцию) природу [3,37].

Металлы имеют также так называемые металлические связи, обуславливаемые обобществлением валентных электронов [78,84]. Эти электроны могут взаимодействовать с ионизированными атомами в узлах кристаллической решетки, обеспечивая прочную связь между атомами металла. При сближении трущихся поверхностей на расстояния, соизмеримые с параметрами решетки, может происходить объединение валентных электронов и образование общего электронного облака, которое способно взаимодействовать с атомами обеих металлических поверхностей. В результате образуется прочное соединение двух тел, появление которого возможно в случае, если в контакт войдут чистые ювенильные поверхности. Такой контакт может иметь место при трении, например, обрабатываемого материала и сходящей стружки по поверхности инструмента. Высокое контактное давление приводит к сближению участков поверхностей трения на расстояния, соизмеримые с параметрами решетки. При

этом температура, возникающая от трения и деформации, повышает энергию атомов и создает дополнительную активность [12].

В этом случае может происходить обмен электронами между элементами трущейся пары. Результаты этого обмена можно объяснить, исходя из представления о модели твердого тела [31]. При образовании кристалла из изолированных атомов валентные электроны последних частично переходят в обобществленное состояние. Некоторая часть валентных электронов образует конфигурации различной энергетической устойчивости, статистический набор которых и энергетическая устойчивость определяют степень трудности возбуждения вещества при физических и химических процессах. Если контактируют поверхности, имеющие высокий статистический вес атомов со стабильными электронными конфигурациями, то потребуются большие энергетические затраты для термо-механического возбуждения. Образующееся при этом адгезионное соединение имеет высокую прочность и требует соответственно больших затрат и тепловой механической энергии для разрушения этого соединения.

Дополнительная механическая активация оказывает влияние на адгезию благодаря тому, что в местах концентрации дефектов на поверхности деформированных металлов имеются дополнительные ненасыщенные связи [20,21].

В настоящее время можно считать установленным, что существует физическая связь между характеристиками адгезионного взаимодействия и особенностями электронного строения поверхностей контактирующих пар металлов, а также параметрами термической и механической активации. Следует при этом иметь в виду, что поверхности твердых тел могут быть покрыты различными хемосорбционными слоями, экранирующими ювенильные участки контакта. Эти слои, вступая в адгезионное взаимодействие, защищают от схватывания лежащие под ними тела. Прочность образовавшейся адгезионной связи зависит в этом случае от свойств контактирующих слоев. Поэтому на адгезионное взаимодействие контактирующих тел должны оказывать влияние

плотность контакта, технологическая среда, температура, как фактор термической активации и как фактор, изменяющий скорость химического взаимодействия тела со средой, и пр.

Адгезионное взаимодействие может проявляться лишь на общей для двух тел поверхности соприкосновения. Применительно к жестким твердым телам (металлам) формирование общей поверхности контакта требует затрат значительной работы, связанной с деформированием неровностей. Что касается работы, затрачиваемой на образование самих металлических связей, то она много меньше (на 2-3 порядка), чем работа, необходимая для деформирования площади касания [57]. В связи с этим решающими факторами являются жесткость соприкасающихся тел, их упругие и другие объемные характеристики.

Следует различать сопротивление, создаваемое адгезионными связями в нормальном и тангенциальном направлениях [79]. При нормальном отрыве одной поверхности от другой происходит разрыв адгезионных связей, при сдвиге идет их рекомбинация – одновременно с разрушением происходит формирование новых связей. По существу, в тонком слое, соединяющем два тела, совершается процесс течения, который ограничен пределами, с одной стороны, обычного течения вязкой жидкости в плоском капилляре для достаточно подвижного слоя, а с другой – «смачиванием» в твердом состоянии, когда этот слой утрачивает текучесть, и механический срез в одних точках сопровождается формированием связей в других.

В настоящее время говорить об общей количественной теории адгезионного взаимодействия еще рано. В этой теории должно учитываться то, что переходный слой, разделяющий два соприкасающихся твердых тела, образуя в комплексе так называемое «третье тело» [57], может находиться в различном состоянии – от жидкого до твердого.

Следует также иметь в виду, что сложная система, образовавшаяся в местах контакта твердых тел, обладает специфическими, только ей присущими свойствами, отличными от свойств каждого из них, рассматриваемых отдельно, вне контакта при трении. Поэтому объемные физико-механические

характеристики контактирующих тел могут быть непригодны для оценки свойств «третьего тела».

Рассмотрим подвижность «третьего тела». Если время оседлой жизни атома [77]:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{w}{k \cdot \Theta}}, \quad (3.3)$$

где τ_0 – период колебания около положения равновесия,

w – энергия активации процесса перескока,

k – постоянная Больцмана,

Θ – абсолютная температура,

то средняя скорость перемещения атомов (или дырок):

$$V_a = C \cdot e^{-\frac{w}{k \cdot \Theta}}, \quad (3.4)$$

где C – постоянная контакта.

Можно предположить, что с этой скоростью идет процесс рекомбинации адгезионных связей во фрикционном контакте. В этом случае сопротивление сдвигу в «третьем теле» в первом приближении будет подчиняться уравнению Ньютона для двумерного параллельно-струйного течения вязкой жидкости:

$$\sigma_{\tau a} = \eta \cdot \frac{dV}{dz}, \quad (3.5)$$

где η – коэффициент внутреннего трения,

z – координата по толщине «третьего тела»,

V – скорость скольжения.

При трении на контактную зону накладываются сжимающие и сдвигающие силы. Они изменяют форму «третьего тела», нарушают равновесное состояние элементов рассматриваемой системы, соответствующее минимуму энергии. Детерминированная система стремится вернуться в равновесное состояние (релаксация напряжений, упругое и пластическое последствие), а затраченная на формоизменение работа рассеивается. Чем интенсивнее во времени формирование и меньше собственная подвижность системы (время релаксации), тем больше рассеивается энергии, т.е. тем больше потери на трение. Это выражает уравнение (3.5) Ньютона. Однако вязкость в этом уравнении не всегда

постоянна. Изменение напряженного состояния контактной зоны сказывается на энергии активации течения и соответственно – на вязкости.

Воспользуемся выражением Эйринга и Мура [36] для определения коэффициентов трения:

$$\eta = B_1 \cdot e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}} \quad (3.6)$$

где B_1 – константа, p – давление, ΔA – приращение объема, R – постоянная Больцмана, E_b – энергия активации вязкого течения.

Второй член в экспоненте учитывает то обстоятельство, что при образовании активированного состояния происходит приращение объема ΔA (зазора, который необходимо осуществить для разрыва связи) и затрачиваемая на это работа соответственно выразится через $p \cdot \Delta A$.

По аналогии представим сопротивление сдвигу, связанное с подвижностью «третьего тела», как:

$$\tau_n = B_1 \cdot e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}} \cdot \frac{dV}{dz} \quad (3.7)$$

При постоянной скорости считаем, что $\frac{dV}{dz} = \text{const} = A_1$.

Тогда приняв $A_1 \cdot B_1 = C_1$, получим:

$$\tau_n = C_1 \cdot e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}}. \quad (3.8)$$

Разложив $e^{\frac{E_b + p \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}}$ в ряд и отбросив из-за малости члена, начиная с третьего, получим:

$$\tau_n = C_1 \cdot \left(1 + \frac{E_b}{R \cdot \Theta} + \frac{p \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}\right), \quad (3.9)$$

Введем обозначения:

$$\tau_0 = C_1 \cdot \left(1 + \frac{E_b}{R \cdot \Theta}\right), \quad (3.10)$$

$$\beta = \frac{C_1 \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}, \quad (3.11)$$

Тогда

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p, \quad (3.12)$$

Из выражения следует, что если принять «третье тело» текущим в узком зазоре между телами, прижатыми и скользящими друг относительно друга, то согласно гидродинамической аналогии прочность адгезионной связи на срез прямо пропорциональна нормальным напряжениям и обратно пропорциональна температуре.

Линейный характер зависимости $\tau_n = f(p_r)$ подтверждает также кинетическая теория прочности твердых тел С.Н. Журкова [77] и термодинамическая теория металлов Я.И. Френкеля [89].

Результаты экспериментальных исследований, приведенные на рисунках 3.4–3.6; 3.10–3.12; 3.17 и 3.18, показали, что в условиях упругого подвижного контакта сухого и граничного трения с покрытиями и без покрытий величина τ_n прочности на срез адгезионных связей линейно зависит от давления p_r и строго подчиняется теоретическому уравнению (3.12), которое после введения соответствующих обозначений имеет вид (3.1):

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r,$$

где τ_0 – напряжение среза адгезионных связей при отсутствии нормальных напряжений на фрикционном контакте;

β – коэффициент упрочнения адгезионных связей от нормальных напряжений p_r .

Это позволило экстраполированием прямых $\tau_n = f(p_r)$ до $p_r = 0$ определить величину τ_0 , а также значение β – как тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс.

Полученные результаты приведены в табл. 3.4-3.11 и изображены на рис. 3.20-3.26. Установленные закономерности изменения фрикционных параметров можно объяснить следующими факторами.

Выше было показано, что соответствие с гидродинамической аналогией параметр β пропорционален отношению $\Delta A / (R \cdot \Theta)$, т.е.

$$\beta \approx \Delta A / (R \cdot \Theta), \quad (3.13)$$

где ΔA имеет размерность объёма, характеризующего величину зазора, необходимого для разрыва адгезионной связи. Очевидно, это величина

обуславливается пластичностью «третьего тела», образованного в местах фактического касания контактирующих поверхностей трения. Чем выше эта пластичность, тем больше величина ΔA и параметр β .

Известно [92], что пластичность металлических материалов с повышением температуры нагрева либо монотонно увеличивается, либо имеет некоторую инверсию, связанную с так называемым «провалом пластичности». Таким образом, как видно из выражения (3.13), температура Θ оказывает на величину параметра β как прямое, так и косвенное влияние. Причем направление этого влияния прямо противоположное: с повышением температуры увеличивается пластичность «третьего тела» (ΔA), т.е. увеличивается числитель в выражении (3.13), но одновременно и увеличивается и знаменатель – произведение $R \cdot \Theta$. Это может являться причиной немоного характера зависимости $\beta = f(\Theta)$ и сформировать экстремум на этой зависимости.

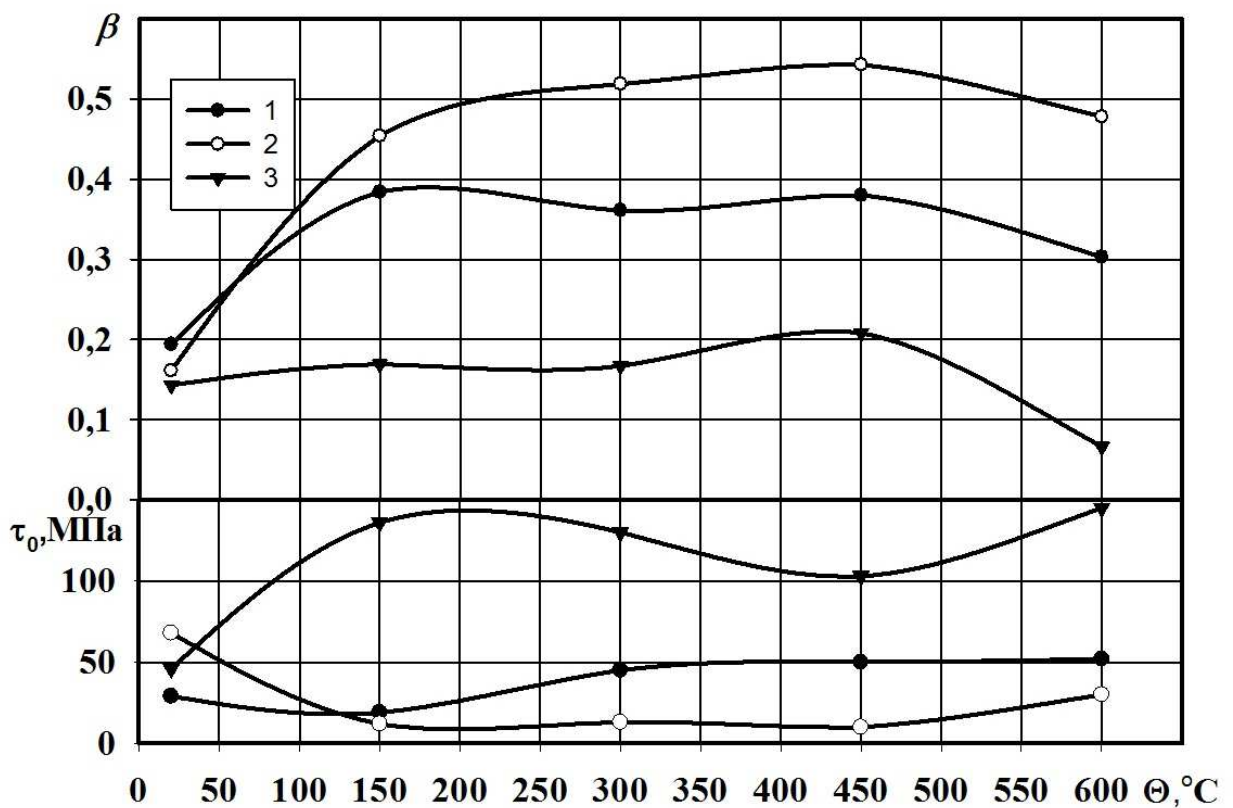


Рисунок 3.20 Влияние температуры контакта образцов 12Х18Н10Т с инденторами на триботехнические параметры β и τ_0 :
1) TiC-ЖС6У; 2) ЖС6У; 3) TiC-ВЖЛ14Н.

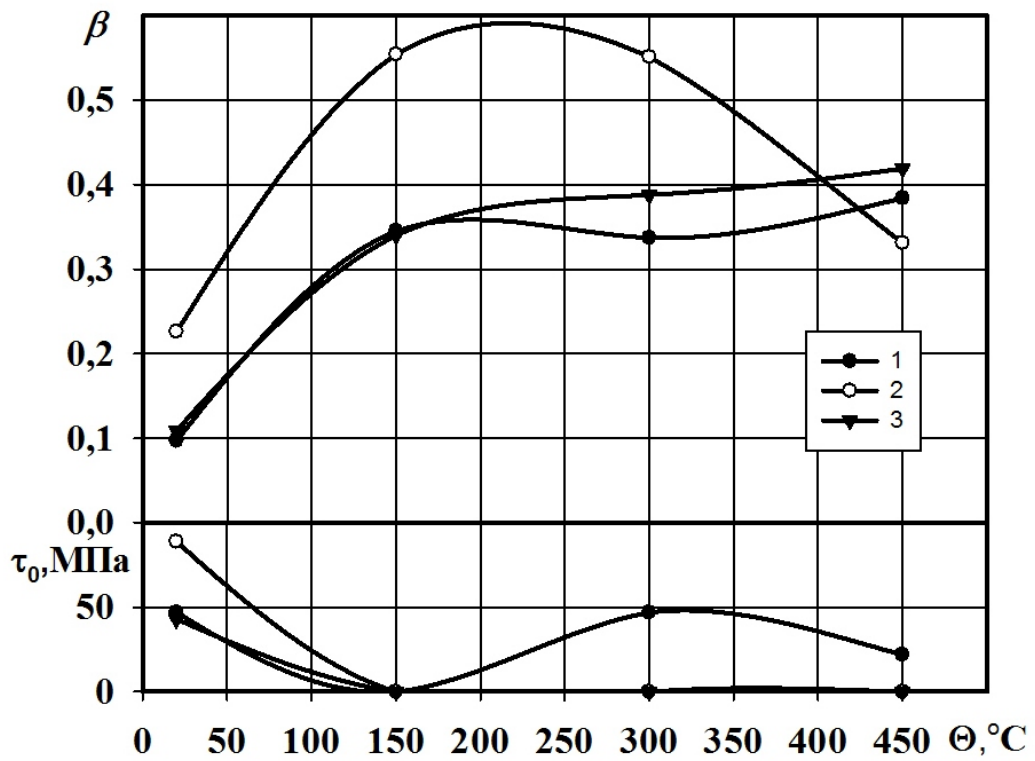


Рисунок 3.21 Влияние температуры контакта образцов ЖС6У с инденторами на триботехнические параметры β и τ_0 : 1) TiC-ЖС6У; 2) ЖС6У; 3) TiC-ВЖЛ14Н.

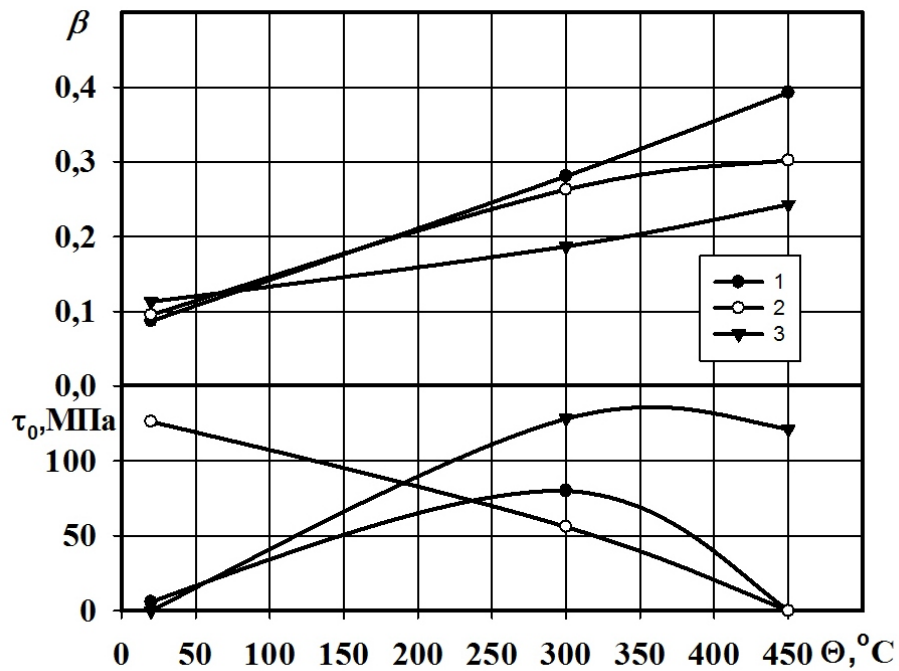


Рисунок 3.22 Влияние температуры контакта инденторов с образцами на триботехнические параметры β и τ_0 :

- 1) TiC-ЖС6У (TiC 55%) – TiC-ЖС6У (TiC 45-50%);
- 2) TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%) – TiC-ЖС6У (TiC 45-50%);
- 3) TiC-ВЖЛ14Н(TiC 64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%).

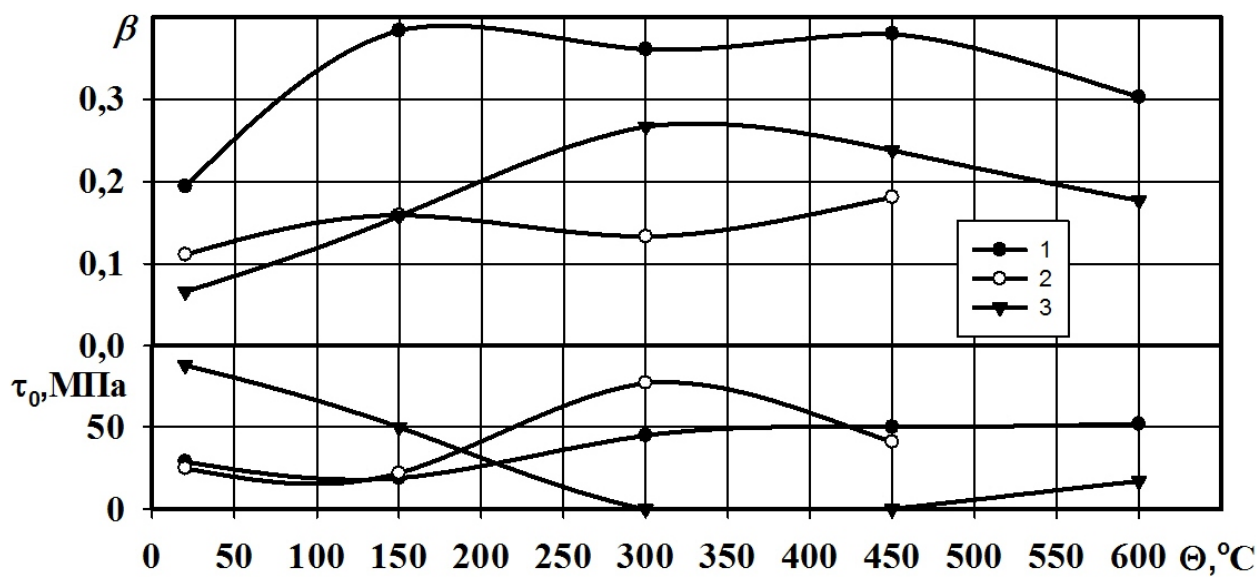


Рисунок 3.23 Влияние температуры контакта инденторов TiC-ЖС6У с образцами на триботехнические параметры β и τ_0 :

1) 12X18H10T; 2) 12X18H10T + Zr-Ti-N-C; 3) 12X18H10T+TiN.

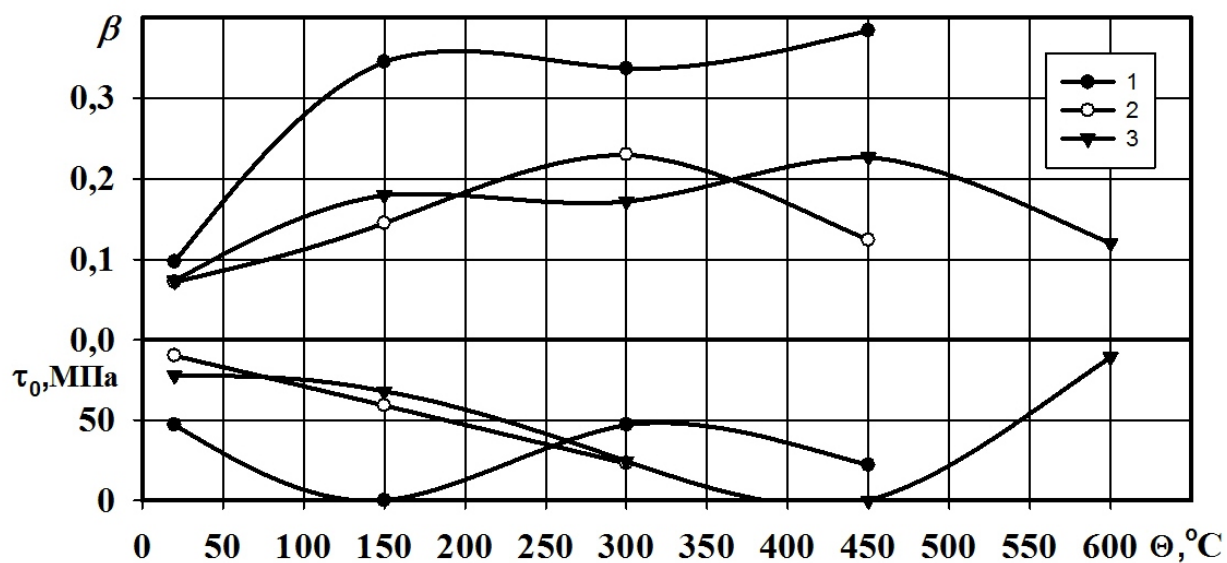


Рисунок 3.24 Влияние температуры контакта инденторов TiC-ЖС6У с образцами на триботехнические параметры β и τ_0 :

1) ЖС6У; 2) ЖС6У + Zr-Ti-N-C; 3) ЖС6У +TiN.

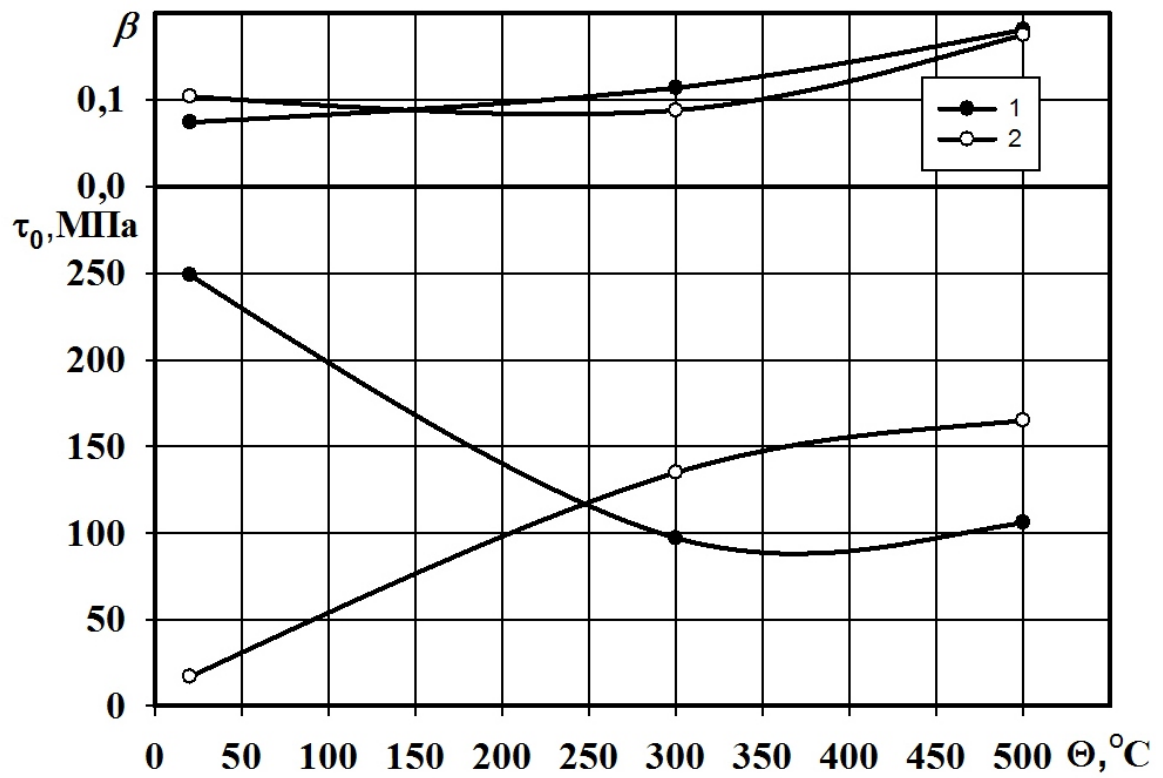


Рисунок 3.25 Влияние температуры контакта образцов TiC-ЖС6У + TiCrN с инденторами на триботехнические параметры β и τ_0 :
1) TiC-ВЖЛ14Н + TiCrN; 2) TiC-ЖС6У + TiCrN.

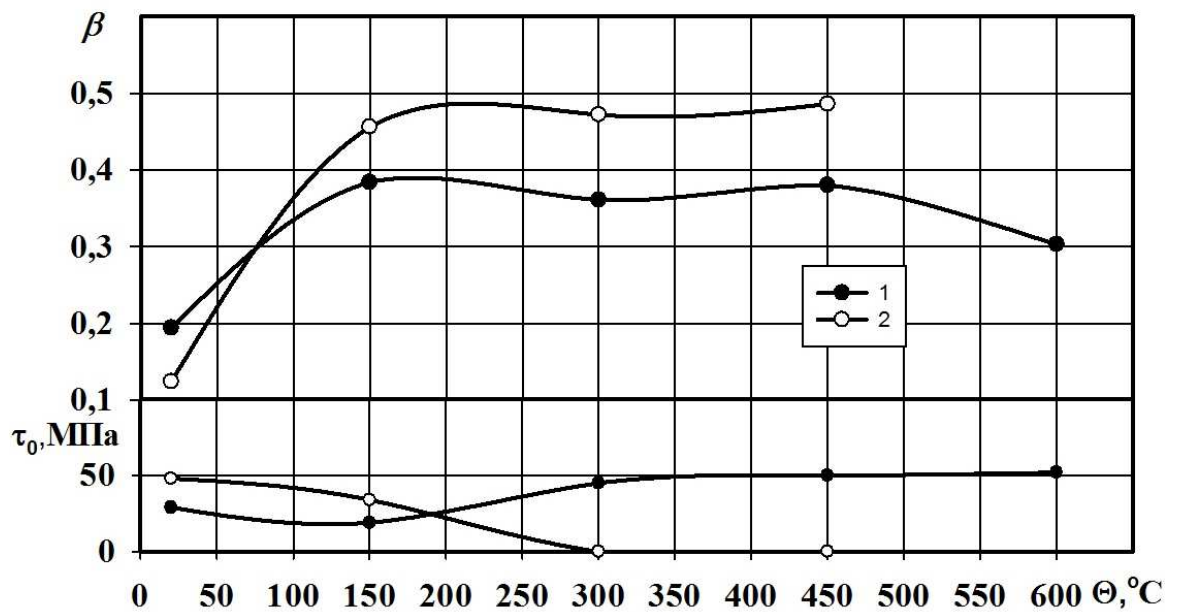


Рисунок 3.26 Влияние температуры контакта индентора TiC-ЖС6У с образцами 12X18H10T на триботехнические параметры β и τ_0 : 1) без нефти; 2) с нефтью.

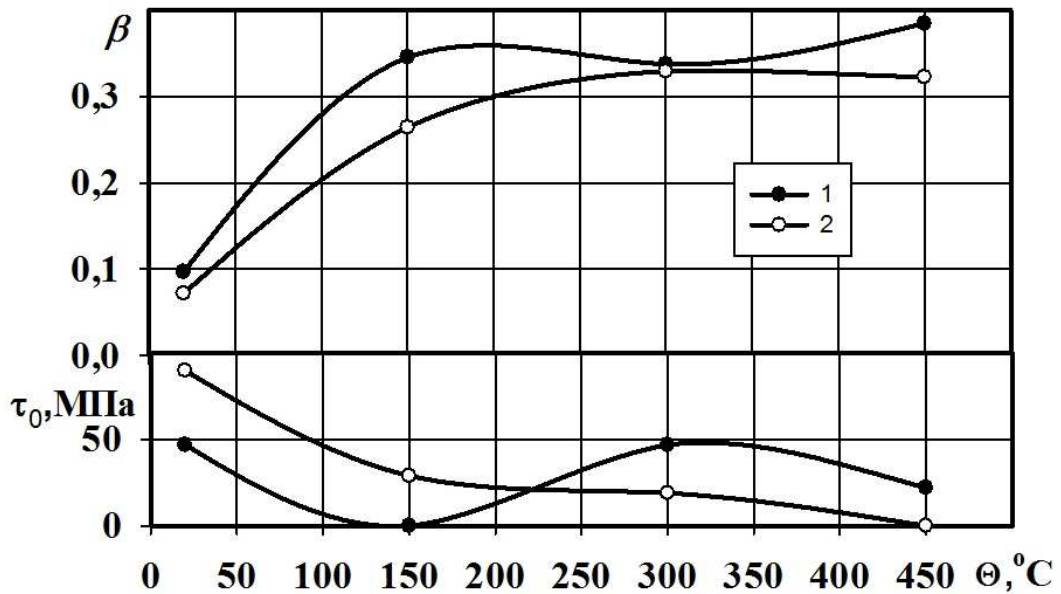


Рисунок 3.27 Влияние температуры контакта индентора TiC-ЖС6У с образцами ЖС6У на триботехнические параметры β и τ_0 : 1) без нефти; 2) с нефтью.

Как показали исследования, для пар трения инденторов из ЖС6У, керметов TiC-ВЖЛ14Н и TiC-ЖС6У по образцам из 12Х18Н10Т появление максимума на зависимости $\beta = f(\Theta)$ при температурах $\sim 150\text{--}450$ °С демонстрируют данные, приведенные на рис. 3.20.

Индентор из сплава ЖС6У при трении с образцами из этого же материала формирует ярко выраженный максимум параметра β при температуре ~ 200 °С, а инденторы из изучаемых керметов при повышении Θ , начиная с температуры ~ 150 °С, мало влияют на изменение параметра β (рис.3.21).

Нанесение износостойких покрытий на образцы (т.е. на **одну** из контактирующих поверхностей пары) (рис. 3.23 и 3.24) практически не изменяет немонотонный характер зависимости β от Θ , сдвигая точки максимума в область более высоких температур (~ 450 °С).

В то же время нанесение износостойких покрытий на поверхности **обеих** деталей пары трения обеспечивает более монотонное изменение параметра β с повышением температуры Θ контакта даже с неявным минимумом для пары из кермета TiC-ЖС6У с покрытием TiCrN (рис. 3.25).

Нефтяная среда, как показали эксперименты (рис. 3.26 и 3.27) практически не изменяет характер зависимости $\beta = f(\Theta)$ в исследованном диапазоне температур. Рассмотрим более подробно полученные результаты для различных пар трения.

Как видно из рис. 3.20 и 3.21 наибольшую величину параметра β формирует фрикционный контакт материалов, близких по химическому составу (ЖС6У по 12Х18Н10Т – рис. 3.20) Эти результаты можно объяснить химическим сродством [34,74], контактирующих материалов, которое формирует при трении достаточно прочное «третье тело».

Применение же изучаемых керметов в качестве материалов хотя бы **одной** из деталей фрикционной пары существенно снижает величину β (рис. 3.20 и 3.21), что, по-видимому, связано с уменьшением пластичности «третьего тела», т.е. с уменьшением значения ΔA в выражении (3.13). Очевидно, именно этот фактор приводит к дальнейшему уменьшению величины β , когда **обе** детали фрикционной пары выполнены из изучаемых керметов (рис. 3.22). Причем, когда контактируют поверхности из керамико-металлических материалов, формируется при трении «третье тело», которое имеет не только малую пластичность, но и способно сохранять её с повышением температуры Θ в исследованном интервале. Об этом свидетельствует отсутствие максимума на зависимости $\beta = f(\Theta)$ и меньшие значения β при одних и тех же сравниваемых условиях (рис. 3.20-3.22).

Из рис. 3.23 и 3.24 следует, что нанесение износостойких покрытий на поверхность хотя бы **одной** из деталей пары трения еще более уменьшает пластичность «третьего тела» и приводит к уменьшению значения параметра β . Еще больший эффект уменьшения величины β получается, когда на **обе** контактирующие поверхности нанесены износостойкие покрытия, а подложка выполнена из изучаемых керамико-металлических материалов (рис. 3.25). В Этом случае, как видно из рис. 3.25, сохранение малой пластичности «третьим телом» при повышении температуры Θ приводит к тому, что температура незначительно

влияет на величину β и даже является причиной появления минимума β при температуре $\sim 300^\circ\text{C}$ для пары TiC–ВЖЛ14Н с покрытием TiCrN.

Таким образом, детали из изучаемых керметов с нанесенными на их поверхности износостойкими покрытиями формируют при трении на контакте «третье тело» с наименьшей пластичностью, которая мало изменяется с повышением температуры Θ и которая объясняет наименьшее значение триботехнического параметра β , т.е. при этом потребуются наименьшие силы для создания герметичного контакта в запорной арматуре.

Наличие сырой нефти на фрикционном контакте может даже несколько повысить пластичность «третьего тела» и увеличить параметр β (для пары ЖС6У – 12Х18Н10Т – рис.3.26), или может незначительно понизить пластичность (для пары TiC–ЖС6У – ЖС6У – рис. 3.27). Эти данные свидетельствуют о том, что, если хотя бы **одна** из деталей фрикционной пары выполнена из изучаемого кермета, действие сырой нефти на величину фрикционного параметра β существенно уменьшается.

Выше – см. выражение (3.10) – было показано, что в соответствии с гидродинамической аналогией фрикционный параметр τ_0 зависит от отношения, т.е.

$$\tau_0 \sim E_b / (R \cdot \Theta), \quad (3.14)$$

где E_b – энергия активации вязкого течения «третьего тела».

Из выражения (3.14) видно, что если с повышением температуры Θ на фрикционном контакте не происходит изменения величины E_b , то параметр τ_0 при этом должен уменьшаться. В противном случае зависимость $\tau_0 = f(\Theta)$ может иметь точки экстремумов, что и подтверждают экспериментальные данные, приведенные на рис. 3.20 – 3.27. При анализе этих результатов необходимо иметь в виду, что метод экстраполяции, применяемый для оценки величины τ_0 , не дает высокой точности. Вместе с тем из рис. 3.22 и 3.25 явно видно, что, если во фрикционном контакте участвуют поверхности из керамики-металлических материалов без покрытий или с износостойкими покрытиями, значения параметра

τ_0 увеличиваются. Это может быть связано с повышением энергии E_b активации вязкого течения.

Наличие на фрикционном контакте сырой нефти незначительно изменяет величину параметра τ_0 по сравнению с трением в сухую (рис. 3.26 и 3.27).

3.6 Исследование коэффициента трения скольжения

В соответствии с механико-молекулярной теорией трения [40] коэффициент трения округляет двучлен:

$$f = f_\delta + f_m, \quad (3.15)$$

где f_δ - деформационная составляющая коэффициента трения;

f_m – молекулярная (адгезионная) составляющая коэффициента трения.

В настоящее время вычисление составляющей f_δ практически не представляет каких-либо трудностей [57,64] и рассчитывается по формуле, имеющей следующий обобщенный вид:

$$f_\delta = k \cdot p_c^m \quad (3.16)$$

где k и m – параметры, величины которых зависят от физико-механических свойств контактирующих поверхностей, наличия смазки и пр.;

p_c – контурное давление для множественного контакта; для контакта единичной микронеровности $p_c = p_r$.

Из выражения (3.16) следует, что с увеличением нагрузки (давления) деформационная составляющая f_δ коэффициента трения возрастает.

Как указывалось выше, адгезионная составляющая f_m коэффициента трения равна:

$$f_m = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta,$$

т.е. с увеличением нагрузки (давления) уменьшается. При этом величина коэффициента f_m существенно зависит от величин фрикционных параметров τ_0 и β . При $\tau_0 = 0$ величина f_m уменьшается при повышении давления p_r . Следовательно, и величина коэффициента f трения, равная:

$$f = k \cdot p_c^m + \frac{\tau_0}{p_r} + \beta, \quad (3.17)$$

тоже существенно зависит не только от давления p_r , но от величин фрикционных параметров τ_0 и β .

Из выражения (3.17) видно, что в общем случае коэффициент трения зависит не только от физико-механических и технологических свойств контактирующих поверхностей, но и от величины нагрузки (давления), а так же фрикционных параметров τ_0 и β . Величина параметра τ_0 оказывает существенное влияние на характер зависимости $f = f(p_r)$:

при $\tau_0 = 0$ коэффициент f увеличивается с увеличением p_r ;

$\tau_0 \neq 0$ зависимость $f = f(p_r)$ – немонотонная и может иметь максимальные и минимальные значения.

Поэтому для возможности сопоставления полученных результатов исследования коэффициента f трения следует проводить при одинаковых значениях p_r давления на фрикционном контакте.

В то же время необходимо иметь в виду следующее. Как было установлено выше, при переходе на детали из керамики-металлических материалов и на детали из керметов с износостойкими покрытиями, с одной стороны, уменьшается фрикционный параметр β , а, с другой стороны, увеличивается параметр τ_0 , т.е. молекулярная составляющая коэффициента трения, равная

$$f_m = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta,$$

при одних и тех же значениях давления p_r может, в принципе, изменяться в этом случае немонотонно. Кроме того, при контактировании поверхностей трения разной твердости микронеровности более твердой поверхности, внедряясь в более мягкую поверхность, повышают деформационную составляющую коэффициента f трения [40,64].

Проведенные на трибометре «NANOVEA TRB» исследования коэффициента трения полностью подтвердили эти предположения. Исследования проводили при нагрузке 2 Н, значения коэффициента f записывались автоматически по мере изнашивания изучаемой пары трения. Характерные записи

зависимости числа циклов N нагружения приведены на рис. 3.28-3.32, а средние значения коэффициента f трения, вычисленные трибометром автоматически, приведены в табл. 3.12.

К сожалению, выполнить полноценный объективный анализ полученных результатов по коэффициенту f трения не представляется возможным, так как в разных парах трения под действием постоянной нагрузки $P=2\text{Н}$ на контакте возникали разные давления (из-за разности физико-механических свойств контактирующих материалов и изменения площади контакта из-за износа).

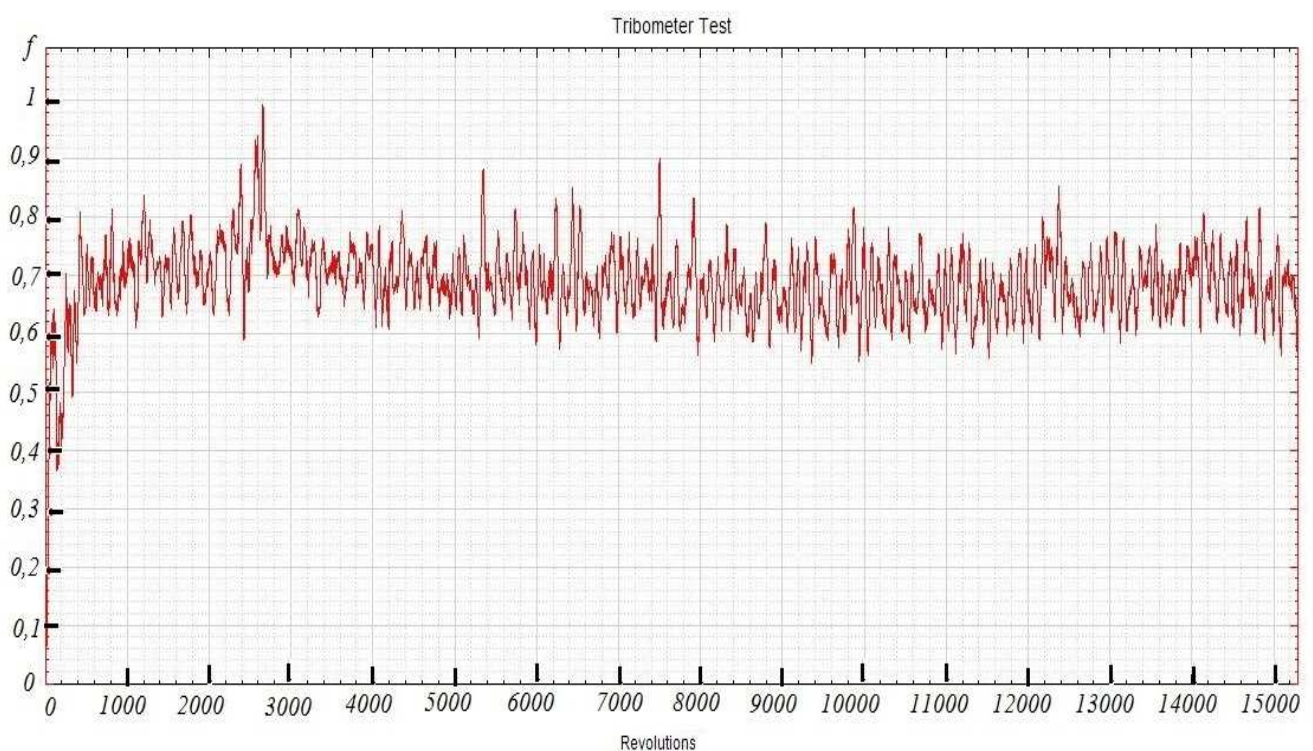


Рисунок 3.28 Влияние износа на коэффициент трения для пары:
Индентор ЖС6У – Образец ЖС6У

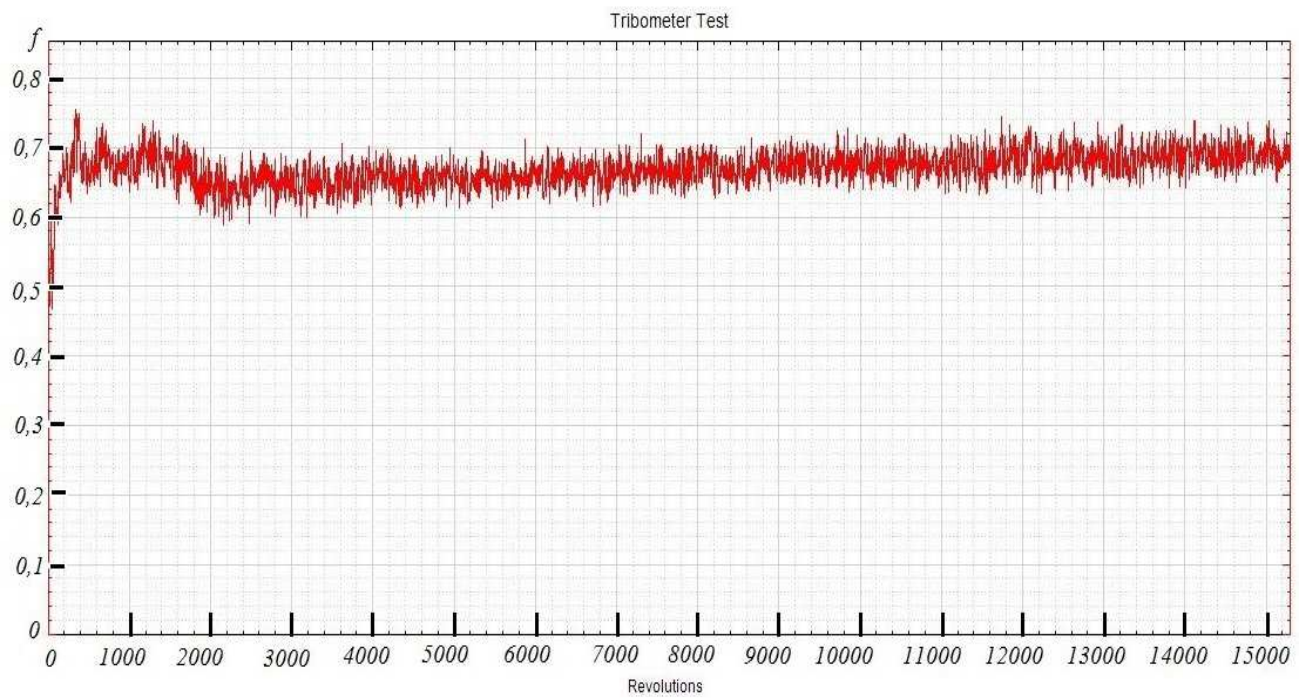


Рисунок 3.29 Влияние износа на коэффициент трения для пары:
Индентор TiC-ЖС6У – Образец ЖС6У

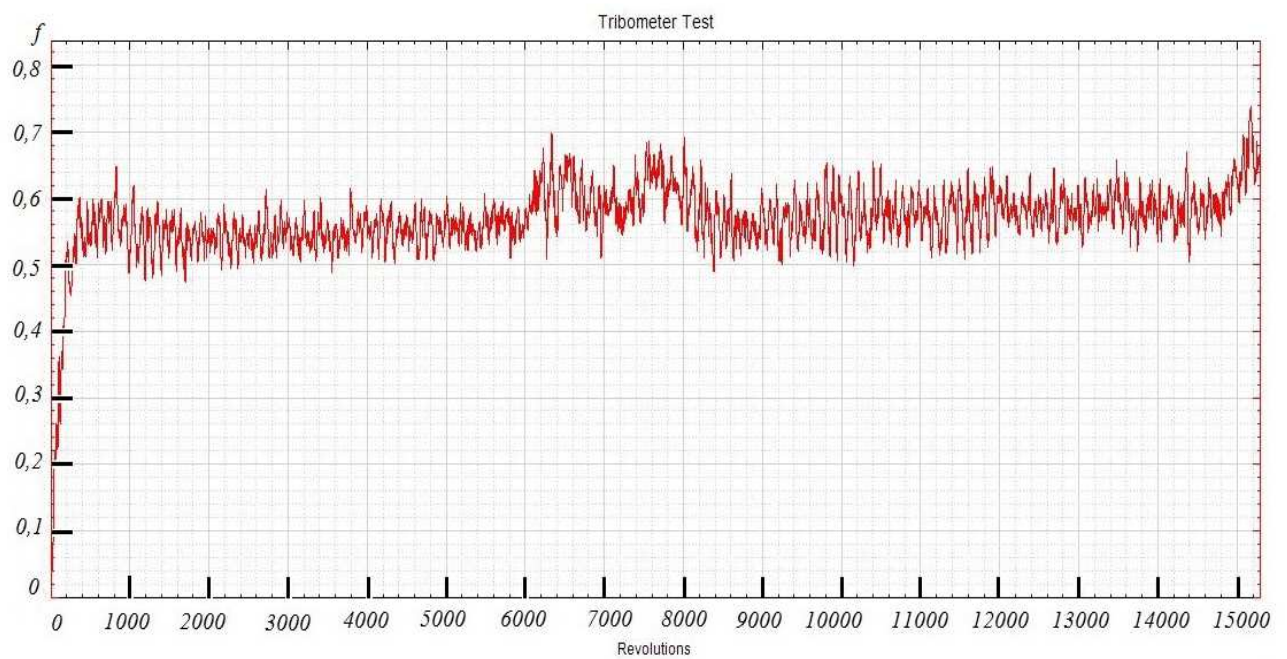


Рисунок 3.30 Влияние износа на коэффициент трения для пары:
Индентор TiC-ЖС6У – Образец TiC-ЖС6У

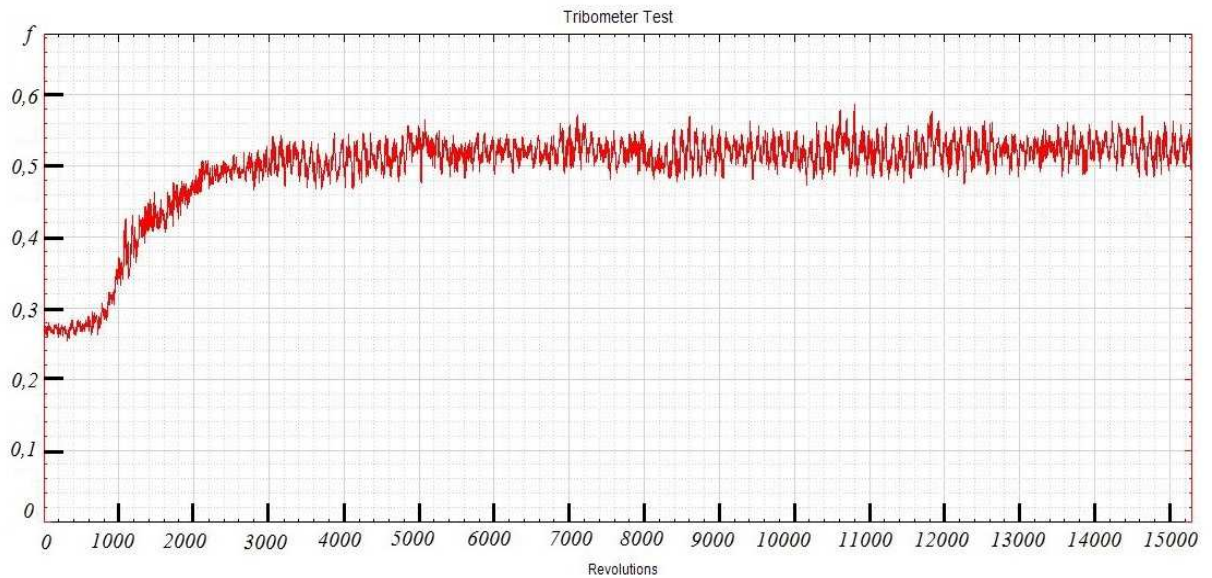


Рисунок 3.31 Влияние износа на коэффициент трения для пары:
Индентор TiC-ЖС6У – Образец ЖС6У + TiN

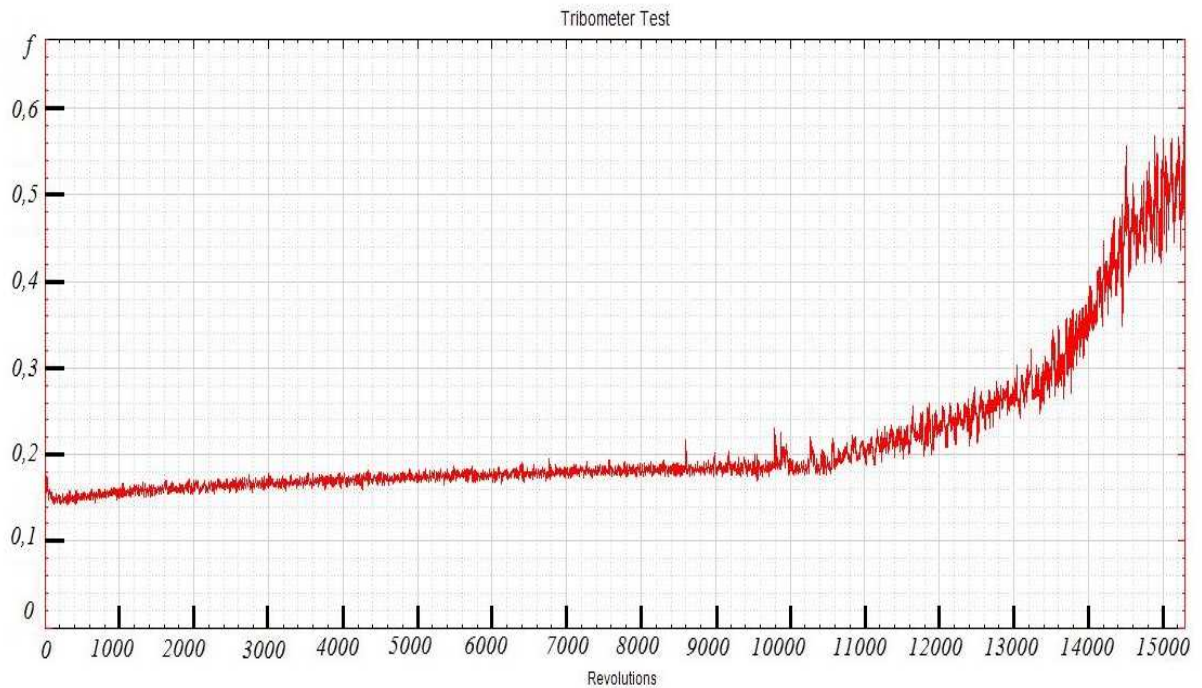


Рисунок 3.32 Влияние износа на коэффициент трения для пары:
Индентор TiC-ЖС6У+TiN – Образец ЖС6У + TiN

Из табл.3.12 следует, что фрикционный контакт одноименных металлических материалов (например, ЖС6У по ЖС6У), а также контакт мягкого металлического материала с керметом или с нанесенным покрытием (например, TiC-ЖС6У с покрытием TiN по ЖС6У) нежелателен, так как формирует большие значения коэффициентов f трения.

Таблица 3.12

Средние значения коэффициента трения для различных фрикционных пар трения. Нагрузка $P=2H$, путь трения $l=300m$.

Образцы	Средний коэффициент трения					
	Индензоры					
	ЖС6У	ЖС6У + TiN	ЖС6У + Zr-Ti-N-C	TiC-ЖС6У	TiC-ЖС6У + TiN	TiC-ЖС6У + Zr-Ti-N-C
TiC-ЖС6У	0,822	0,872	0,802	0,569	0,569	0,612
TiC-ВЖЛ14Н	0,727	0,736	0,856	0,653	0,386	0,679
ЖС6У	0,689	0,822	0,624	0,516	0,669	0,44
TiC-ЖС6У+TiN	0,556	0,269	0,2	0,496	0,214	0,306
TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C	0,6	0,263	0,55	0,53	0,209	0,47

В табл. 3.13 приведены диаметры пятна износа, измеренные по окончании экспериментов по изнашиванию различных пар трения. Из этой таблицы видно, что, если принять площадь касания равной площади износа, то для различных пар трения эта площадь различается в десятки раз. В соответствии с этим и давление на фрикционном контакте различалось в десятки (от 6 до 220 МПа). Поэтому по данным табл. 3.12 можно лишь обсудить некоторые тенденции изменения коэффициента f трения при переходе к использованию керамики-металлических материалов в запорной арматуре и нанесении на них износостойких покрытий.

Таблица 3.13

Результаты измерения диаметра пятна износа на индензоре после 300м, при нагрузке $P = 2 H$.

Пара трения	Диаметр пятна износа, мкм
Индензор ЖС6У - Образец ЖС6У	677
Индензор TiC-ЖС6У - Образец ЖС6У	834
Индензор TiC-ЖС6У - Образец TiC-ЖС6У	367
Индензор TiC-ЖС6У - Образец TiC-ЖС6У + Zr-Ti-N-C	290
Индензор TiC-ЖС6У - Образец TiC-ЖС6У + TiN	108
Индензор TiC-ЖС6У+TiN - Образец TiC-ЖС6У + TiN	265
Индензор TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C - Образец TiC-ЖС6У + TiN	427
Индензор TiC-ЖС6У+TiN - Образец TiC-ЖС6У	146
Индензор TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C - Образец TiC- ЖС6У	445

Вместе с тем, фрикционный контакт керамики-металлических материалов с нанесенными на их поверхности износостойкими покрытиями обеспечивает наименьшие значения коэффициента f трения. Очевидно, это связано с наименьшими значениями фрикционного параметра β (табл. 3.9). Обращает на себя еще внимание тот факт, что контактирование одноименных керамики-металлических материалов допустимо, так как формирует удовлетворительные значения коэффициента f трения. Необходимо при этом иметь в виду, что значения коэффициента f , приведенные в табл. 3.12, получены при сравнительно небольших давлениях p_r , когда превалирует адгезионная (молекулярная) составляющая трения [57]. В этих условиях наибольший вклад в величину f вносит составляющая τ_0/p_r : при приближении p_r к нулю значение отношения τ_0/p_r (если $\tau_0 \neq 0$) может стремиться к бесконечности. Поэтому полученные значения коэффициента f не годятся для расчета привода запорной арматуры. Для таких расчетов представляют практический интерес значения молекулярной составляющей f_m коэффициента трения, полученные в экстремальных условиях нагружения (при давлениях p_{rn} , близких к пределу текучести σ_T контактирующих материалов).

3.7 Выводы по главе

1. Установлено, что изучаемые керамики-металлические материалы на основе карбида титана и жаропрочных сплавов (TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н) имеют более высокую микротвердость и больший предел прочности на сжатие (2440 МПа) по сравнению с жаропрочным сплавом ЖС6У и сталью 12Х18Н10Т; еще большую микротвердость имеют изучаемые керметы при нанесении на их поверхности износостойких покрытий (1870 МПа), экранирующих небольшие технологические поры, образующиеся при инфильтрации расплава металла, и твердые добавки из карбида титана TiC.

2. Выявлено, что для всех изучаемых фрикционных пар при трении скольжения и в среде сырой нефти зависимость прочности τ_n адгезионных связей на срез от давления p_r на контакте в исследованном диапазоне температур имеет прямо пропорциональный характер и описывается биномиальной функцией со свободным членом τ_0 и коэффициентом пропорциональности β . Контактующие материалы и температура оказывает влияние на предельную несущую способность фрикционного контакта и адгезионные параметры τ_0 и β .

3. Показано, что применение изучаемых керметов в обеих деталях пары трения в 1,2-2 раза повышает несущую способность подвижного фрикционного контакта и в 1,5-2 раза уменьшает молекулярную составляющую коэффициента трения по сравнению с парами, в которых лишь одна деталь из кермета. При этом повышение температуры не оказывает значительного влияния на уменьшение несущей способности контакта.

4. Нанесение износостойких покрытий на изучаемые керметы в 1,3-2 раза уменьшает прочность адгезионных связей на срез и молекулярную составляющую коэффициента трения в экстремальных условиях нагружения (близких к пластическому деформированию).

5. Установлено, что сырая нефть из-за наличия в ней абразивных включений, грязи, воды и прочее не может быть смазочным материалом при трении, поэтому результаты по адгезионному взаимодействию и износу, полученные в условиях сухого трения, вполне применимы для трения в среде сырой нефти.

6. Как показал теоретический анализ полученных экспериментальных результатов исследования адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей в различных условиях трения, значительный вклад в улучшение триботехнических характеристик изучаемых керметов вносит уменьшение пластичности «третьего тела», формирующегося на фрикционном контакте, а также повышение энергии активации его вязкого течения.

7. Показано, что фрикционный контакт керамико-металлических материалов с нанесенными на их поверхности износостойкими покрытиями обеспечивает наименьшие значения коэффициента трения. Для повышения надежности расчета привода запорной арматуры рекомендуется использовать износостойкие керамико-металлические материалы с минимальными значениями молекулярной составляющей коэффициента трения.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ НА ИХ ИЗНОС

Как было выше отмечено, герметичность запорной арматуры трубопроводов (в том числе, шаровых кранов) в значительной мере зависит от степени износа сопрягаемых поверхностей деталей арматуры. Так, при работе шаровых кранов одновременно происходит изнашивание и шара, и седла. По существу, каждая из сопрягаемых деталей, является источником, причиной износа другой детали. При этом, в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, пары трения могут быть **прямыми** и **обратными** [28]. В случае **прямой** пары трения по большей поверхности скользит **более твердое** тело, а в случае **обратной** пары – **более мягкое** тело.

В данной работе исследования по изнашиванию пар трения выполняли на одношариковом трибометре «NANOVEA TRB». В качестве шарика использовали сферические концы, вырезанные из инденторов, которые участвовали в исследованиях по адгезионному взаимодействию, а в качестве образцов – те же образцы из этих исследований. Таким образом были выполнены исследования по изнашиванию прямых и обратных пар трения без покрытий и с покрытиями, с металлической или керамико-металлической подложками. Это позволило изучить не только изнашивание отдельных поверхностей трения, но и оценить суммарный износ различных трибосопряжений, а также установить и объяснить взаимосвязь этого износа с показателями адгезионного взаимодействия на фрикционном контакте.

Ниже излагаются полученные результаты.

При этом для определения «прямая» или «обратная» пара трения, полагали, что большая поверхность трения принадлежала образцам, а меньшая – инденторам.

4.1 Изнашивание образцов – большей поверхности пары трения

Образцы для исследования представляли собой диски диаметром 25 мм и толщиной 5-7 мм, изготовленные из материалов сплава: ЖС6У, кермета TiC-ЖС6У, кермета TiC-ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C. Изнашивающие эти образцы инденторы изготавливались из материалов: сплава ЖС6У, кермета TiC-ЖС6У, кермета TiC-ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C. Так как контактирующие материалы в большинстве своем имели разную исходную твердость, то, по-существу, исследовались как прямые, так и обратные пары трения. Интенсивность изнашивания оценивали относительной линейной величиной K , характеризующей изменение размера (углубление поверхности трения), приходящееся на 1 цикл воздействия. Напомним, что при испытаниях износ образцов определяли после 15000 циклов воздействия под нагрузкой 2 Н.

Полученные результаты с указанием микротвердости контактирующих поверхностей приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты исследования изнашивания образцов

Образцы		Интенсивность изнашивания образцов K , мкм/цикл* 10^{-3}			
		Индентор/ микротвердость, МПа			
Материалы	Микро- твердость, МПа	ЖС6У 550	TiC-ЖС6У 1597	TiC-ЖС6У +TiN 2083	TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C 3420
ЖС6У	567	0,32	0,699	0,091	0,0103
TiC-ЖС6У	1271	0,1	0,31	0,05	0,0023
TiC-ЖС6У+TiN	1388	0,089	0,188	0,0048	0,034
TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C	2060	0,078	0,088	0,043	0,051

Как видно из этой таблицы, при использовании индентора из ЖС6У все исследованные пары трения были **обратными**. При этом установлено, что по мере увеличения микротвердости образцов (в связи с переходом на керметы и покрытия на них) интенсивность изнашивания образцов уменьшается. Можно предположить, что износ образцов в обратных парах трения связан с адгезионно -

усталостными процессами на подвижном фрикционном контакте [98]. Это предположение подтверждается данными, приведенными на рис. 4.1, на котором показана функциональная связь интенсивности изнашивания исследуемых образцов при контактировании с более мягким индентором из сплава ЖС6У от величины фрикционного параметра β (при $\Theta = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). В эту же закономерность вписывается изнашивание образцов из TiC-ЖС6У плюс Zr-Ti-N-C в паре трения с более мягким индентором из кермета TiC-ЖС6У (табл. 4.1). При использовании индентора из кермета TiC-ЖС6У в качестве изнашивающего элемента пары трения (или кермета TiC-ЖС6У плюс покрытия) практически все исследуемые пары трения становятся **прямыми** (за исключением указанной выше). Как видно из данных, приведенных во втором столбце табл. 4.1, при использовании индентора из кермета TiC-ЖС6У (без покрытия), интенсивность изнашивания образцов уменьшается по мере увеличения их твердости так же, как у обратных пар трения. Но при этом уровень интенсивности изнашивания заметно выше (это видно из сравнения данных, приведенных в первом и втором столбцах табл. 4.1).

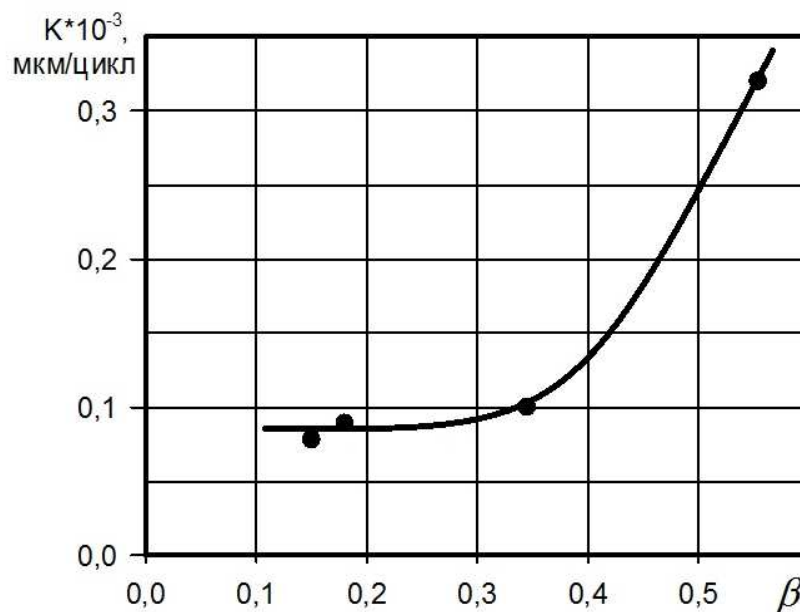


Рисунок 4.1 Влияние адгезионного параметра β на изнашивание образцов в обратных парах трения

Это свидетельствует, во-первых, об адгезионно-усталостном характере изнашивания образцов на подвижном фрикционном контакте и, во-вторых, что к этому виду изнашивания в этом случае прибавляется другой вид изнашивания, повышающий его интенсивность. Можно предположить, что это абразивно-механическое изнашивание [82]. Именно этим обстоятельством можно объяснить почти 2-х кратное повышение изнашивания образца ЖС6У при переходе от индентора из ЖС6У к индентору из кермета TiC-ЖС6У.

Как было показано выше (глава 3), кермет TiC-ЖС6У в отличие от сплава ЖС6У представляет с собой неоднородную структуру: с твердыми включениями из TiC. Очевидно, эти включения, внедряясь при трении в более мягкий образец из ЖС6У, не только повышают коэффициент трения (табл. 3.12), но и интенсифицируют абразивно-механическое изнашивание образцов.

Картина несколько изменяется, когда в качестве изнашивающих инденторов используются керметы с износостойкими покрытиями (см. в табл. 4.1 столбцы 3 и 4). В этом случае покрытия экранируют структуру керметов на поверхности трения. В результате этого практически исключается абразивно-механическая составляющая изнашивания, а малые значения адгезионного параметра β (табл. 3.9) снижают и адгезионно-усталостную составляющую изнашивания образцов. Этим можно объяснить сравнительно низкие значения интенсивности изнашивания исследуемых образцов при трении с инденторами из кермета с покрытием.

Наименьшую интенсивность изнашивания показали образцы из кермета TiC-ЖС6У в паре трения с индентором из TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C.

4.2 Изнашивание инденторов

Результаты изнашивания инденторов, представленные в данном параграфе, получены из экспериментов, описанных в предыдущем параграфе 4.1, т.е. при выполнении испытаний на изнашивание одновременно измеряли износ (потерю веса с последующим пересчетом на линейные параметры) и образцов, и

инденторов. Поэтому ниже рассматриваются результаты изнашивания инденторов из материалов: сплава ЖС6У, кермета TiC-ЖС6У, кермета TiC-ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C. Они прижимались к образцам (дискам) нагрузкой 2 Н, образцы совершали вращение вокруг собственной оси с эксцентриситетом относительно оси индентора 3 мм, т.е. диаметр дорожки износа был равен 6 мм. При числе циклов нагружения 15000 длина пути трения (истирания) составляла 288 м. При этом инденторы изнашивали образцы (диски) и сами изнашивались. Результаты изнашивания образцов описаны в предыдущем параграфе.

В соответствии с ГОСТ 27674-88 интенсивность изнашивания J_h инденторов оценивали как отношение износа к обусловленному пути, на котором произошло изнашивание (как объем выполненной работы). Интенсивность изнашивания определяли в мкм на м пути трения (изнашивания).

Полученные результаты с указанием микротвердости контактирующих поверхностей приведены в табл. 4.2. Из этой таблицы видно, что все исследуемые пары трения с индентором из сплава ЖС6У являются обратными, так как по большей поверхности (образцов) скользит более мягкое тело (индентор). Обратной парой трения является также пара «индентор TiC-ЖС6У – образец TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C».

Таблица 4.2

Результаты исследования изнашивания инденторов

Инденторы		Интенсивность изнашивания инденторов J_h , мкм/м			
		Образцы/ микротвердость, МПа			
Материалы	Микро- твердость, МПа	ЖС6У 567	TiC-ЖС6У 1271	TiC-ЖС6У+ TiN 1388	TiC-ЖС6У+ Zr-Ti-N-C 2060
ЖС6У	550	0,017	0,177	0,01	0,129
TiC-ЖС6У	1597	0,026	0,024	0,019	0,016
TiC-ЖС6У+TiN	2083	0,018	0,198	0,277	0,030
TiC-ЖС6У+ Zr-Ti-N-C	3420	0,033	0,113	0,093	0,048

Так как при этом рассматривается изнашивание более мягкого элемента обратной пары трения, то существенный вклад в его изнашивание, несомненно, вносит абразивно-механическая составляющая [82]. Именно этим обстоятельством можно объяснить практически десятикратное увеличение изнашивания при переходе от контактирования с образцами ЖС6У к образцам из кермета TiC-ЖС6У (сравнение первого и второго столбца первой строки в табл. 4.2). Как отмечалось выше, твердые включения TiC кермета TiC-ЖС6У, из которого был изготовлен образец, внедряясь в более мягкий материал индентора, интенсифицирует его изнашивание. То, что это именно так, свидетельствует уменьшение изнашивания при нанесении износостойких покрытий на поверхности трения кермета (см. 3 и 4 столбцы первой строки табл. 4.2), экранирующих на поверхности трения твердые включения кермета. Это же подтверждают данные по изнашиванию индентора TiC – ЖС6У (микротвердостью 1598 МПа) при контактировании с образцами из кермета TiC–ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C (микротвердостью 2060 МПа).

Можно предположить, что износ инденторов (более твердого тела) в прямых парах трения связан с адгезионно-усталостными явлениями на подвижном фрикционном контакте [98]. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 4.2, на котором приведена функциональная связь интенсивности изнашивания индентора из кермета TiC-ЖС6У с образцами (дисками) из исследуемых материалов ЖС6У, TiC-ЖС6У, TiC-ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C от коэффициента β упрочнения адгезионных связей при действии нормальных сил. Этот рисунок выполнен на основании данных, приведенных в табл. 3.7, 3.8 (при $\Theta = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) и табл. 4.2.

Из рис. 4.2 видно, что с увеличением фрикционного параметра β интенсивность изнашивания более твердого тела прямой пары трения увеличивается. Это является прямым доказательством адгезионно-усталостного характера изнашивания более твердого тела прямой пары трения при скольжении.

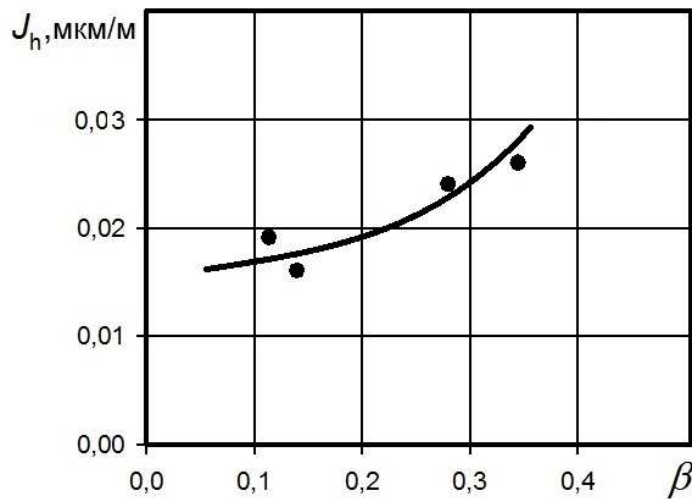


Рисунок 4.2 Влияние адгезионного параметра на изнашивание индентора из кермета TiC-ЖС6У в прямых парах трения

Установлено, что в исследуемых парах трения наименьшую интенсивность изнашивания имеет индентор из кермета TiC-ЖС6У, работающий в паре с образцами из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C.

4.3 Суммарный износ различных трибосопряжений

При работе запорной арматуры трубопроводов (в том числе, шаровых кранов) одновременно изнашиваются обе контактирующие детали (в шаровых кранах – это шар и седло). Герметичность запорной арматуры зависит от суммарного износа контактирующих деталей. Для определения суммарного износа трибосопряжения важно знать не только износ каждого элемента, входящего в трибосопряжение, но и направление относительного смещения этих элементов в процессе их изнашивания [87].

В данном исследовании решение этой задачи затрудняется еще и тем, что интенсивность изнашивания инденторов и образцов оценивалась по-разному, т.е. имела разную размерность. Это связано с тем, что для объективной оценки изнашивания образцов (дисков) невозможно применить линейную интенсивность изнашивания J_h , так как локальный износ образцов зависит не от длины пути трения, а от числа локальных воздействий. Поэтому для оценки изнашивания

сопряжений нельзя суммировать интенсивности изнашивания образцов и инденторов. С учетом того, что в данном исследовании все эксперименты выполнялись в идентичных условиях (при одинаковой нагрузке 2 Н, при одном и том же числе циклов нагружения 15000 и при одном и том же диаметре скольжения 6 мм) считаем, что объективным критерием для оценки суммарного износа трибосопряжений может служить суммарный объем V износа образца и индентора (в мм^3). Это позволяет сопоставить эффективности применения различных пар трения (в том числе, с использованием изучаемых керметов и износостойких покрытий) с точки зрения работоспособности по износу трибосопряжения.

Полученные результаты приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты исследования трибосопряжений

Инденторы		Суммарный износ, V , $\text{мм}^3 \cdot 10^{-2}$			
		Образцы / Микротвердость, МПа			
Материалы	Микро- твердость, МПа	ЖС6У 567	TiC-ЖС6У 1271	TiC-ЖС6У +TiN 1388	TiC-ЖС6У+ Zr-Ti-N-C 2060
ЖС6У	550	6,43	5,22	1,05	1,75
TiC-ЖС6У	1597	14,96	3,41	0,91	0,52
TiC-ЖС6У +TiN	2083	0,91	1,17	0,48	2,92
TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C	3420	0,35	0,54	0,81	0,32

Из табл. 4.3 видно, что суммарный износ исследуемых трибосопряжений изменяется в довольно широком диапазоне ($0,32 - 14,96 \text{ мм}^3 \cdot 10^{-2}$): более чем в 10 раз. Повышенный износ демонстрируют пары с участием мягкого жаропрочного сплава ЖС6У и кермета TiC-ЖС6У имеющего твердые включения карбида титана. Как было показано выше, именно в этих парах к адгезионно-усталостному изнашиванию прибавляется абразивно-механическое, что и увеличивает уровень суммарного износа пары трения. Картина кардинально изменяется, когда на поверхности трения наносятся покрытия, которые экранируют мягкую подложку и твердые включения кермета. Можно предположить, что именно это обстоятельство существенно уменьшает абразивно-механическую составляющую

изнашивания в парах трения, что и приводит к снижению уровня суммарного износа.

Очевидно, что в парах трения, в которых поверхности трения имели примерно одинаковую микротвердость, главную роль в изнашивании играют адгезионно-усталостные процессы. Чтобы проверить это предположение на рис. 4.3 в логарифмических координатах представлена зависимость суммарного износа V от адгезионного параметра β (при температуре $\Theta = 150$ °С) для одноименных пар трения из материалов ЖС6У, TiC-ЖС6У и TiC-ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C. Из рис. 4.3 видно, что эта зависимость может быть описана степенной функцией:

$$V = C \cdot \beta^m, \quad (4.1)$$

где C – коэффициент, зависящий от условий и режима работы пар трения (в данном конкретном случае $C = 27$);

m – показатель степени (в исследованиях получено $m = 2$),

β – коэффициент упрочнения адгезионных связей от действия нормальных напряжений (давлений) на подвижном фрикционном контакте.

Это по-существу, является прямым доказательством главенствующей роли адгезионных процессов в износе трибосопряжений, составленных из деталей из одноименных материалов на поверхностях трения.

Также предположение было высказано профессором Ю.Н. Васильевым в его теоретических исследованиях [16]. В данной работе это предположение впервые получило экспериментальное подтверждение.

Установленная зависимость (4.1) позволяет уже на стадии проектирования запорной арматуры трубопроводов давать оценку и прогнозировать работоспособность и надежность с учетом трибологических свойств материалов, из которых изготавливаются детали узла трения. Для этого достаточно располагать базой данных по коэффициенту β для различных материалов (в том числе керметов и износостойких покрытий), применяемых для изготовления деталей запорной арматуры, с учетом температуры фрикционного контакта.

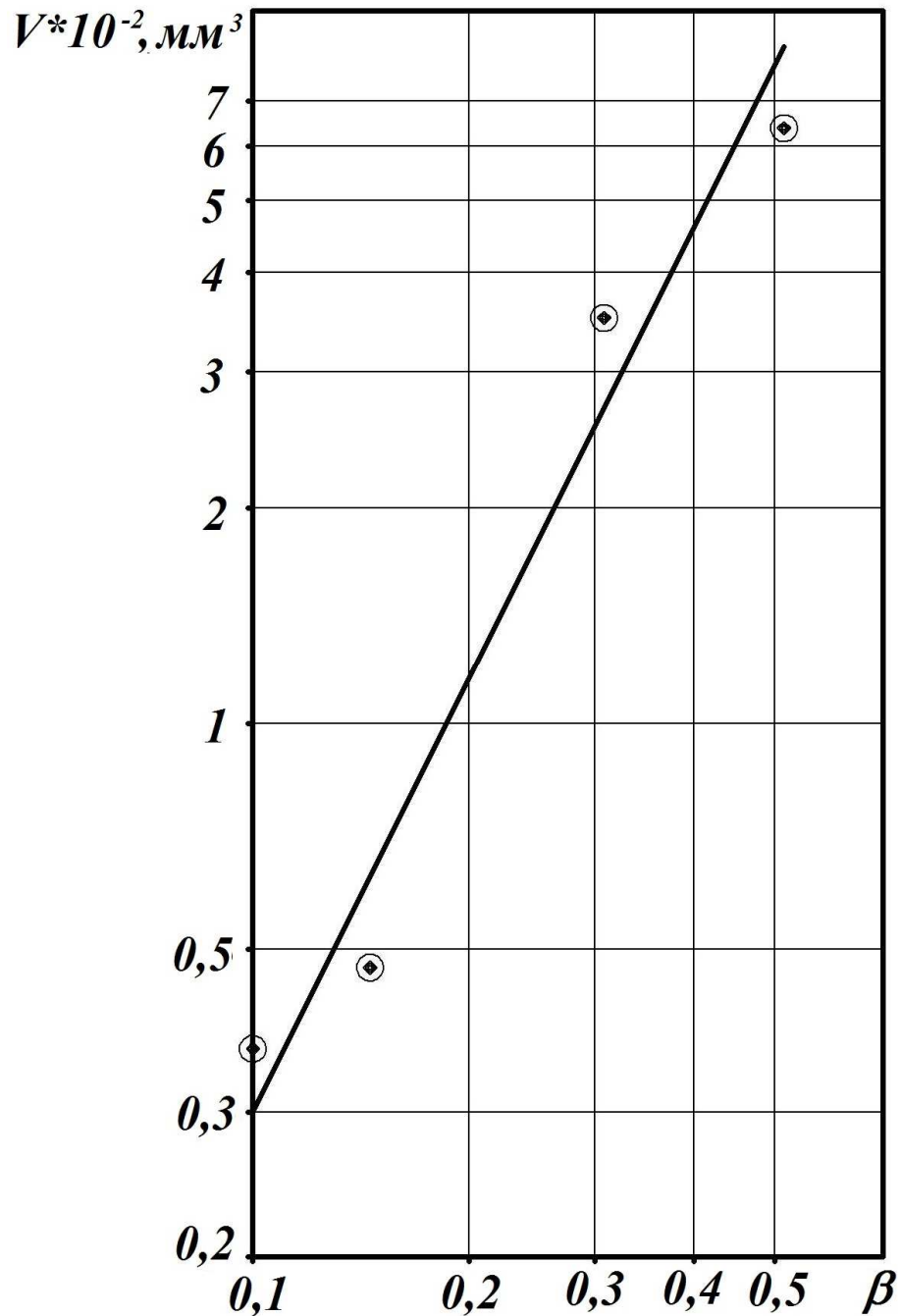


Рисунок 4.3 Зависимость суммарного износа трибосопряжений из одинаковых материалов (ЖС6У; TiC-ЖС6У и TiC-ЖС6У с покрытием из TiN и Zr-Ti-N-C) от адгезионного параметра β

Из табл. 4.3 видно, что из полученных пар трения наименьший суммарный износ ($0,32 \text{ мм}^3 \cdot 10^{-2}$) или наибольшую износостойкость обеспечивает пара, изготовленная из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C (с коэффициентом $\beta=0,11$).

4.4 Металлографические исследования изношенных поверхностей

Металлографические исследования изношенных поверхностей выполнены на растровом электронном микроскопе «JSM-6490LV» и оптическом микроскопе «Olympus GX51». Изношенные «дорожки» на образцах изучались на электронном микроскопе для получения электронного изображения и микрохимического состава поверхности. Установить изношенные инденторы в электронном микроскопе для исследования торцевой поверхности представляет значительную техническую трудность, поэтому изношенные поверхности инденторов рассматривали на оптическом микроскопе.

Ниже приведены некоторые наиболее характерные результаты металлографических исследований.

На рис.4.4 – 4.7 представлены виды изношенных поверхностей инденторов (при увеличении $\times 50$ и $\times 100$) при взаимодействии в условиях трения с образцами из разных материалов (без и с износостойкими покрытиями). Из рис. 4.4 хорошо видны следы абразивно-механического изнашивания мягкого сплава ЖС6У, из которого был изготовлен индентор, от взаимодействия с твердыми включениями TiC, входящими в состав кермета TiC-ЖС6У, из которого был изготовлен образец.

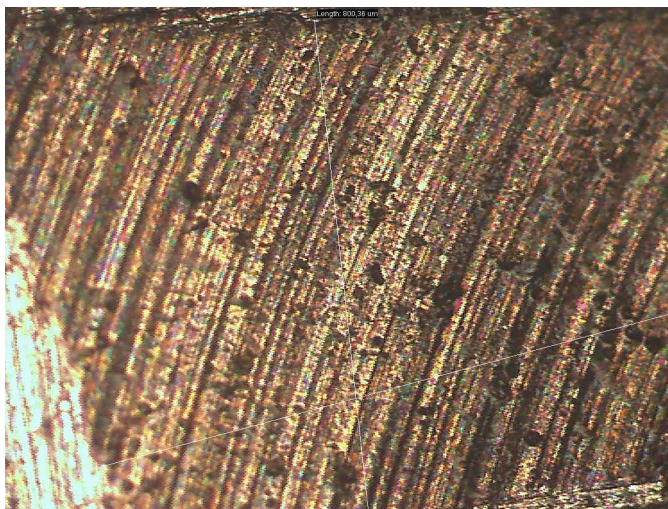


Рисунок 4.4 Вид изношенной поверхности индентора из ЖС6У при контактировании с образцами из кермета TiC-ЖС6У, $\times 20$



Рисунок 4.5 Вид изношенной поверхности индентора из кермета TiC–ЖС6У при контактировании с образцами из сплава ЖС6У, $\times 20$

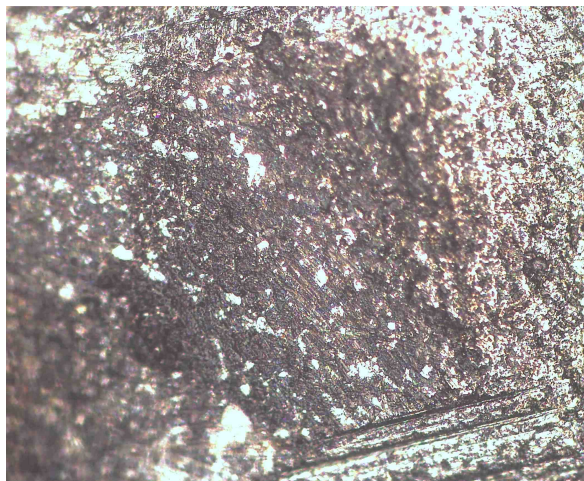


Рисунок 4.6 Вид изношенной поверхности индентора из кермета TiC–ЖС6У при контактировании с образцами из TiC-ЖС6У, $\times 20$



Рисунок 4.7 Вид изношенной поверхности индентора из кермета TiC–ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C при контактировании с образцами из кермета TiC – ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C, $\times 20$

Вид изношенной поверхности индентора существенно изменяется, когда пара трения прямая, т.е. когда индентор тверже образца (рис. 4.9). В этом случае, как видно на рис. 4.5, в результате адгезионного взаимодействия между контактирующими поверхностями происходит сцепление, схватывание и вырыв более твердых частиц индентора, что приводит к его изнашиванию. При этом следы схватывания и вырывов хорошо видны на рисунке, а вот следы в виде бороздок, царапин, характерных для абразивно-механического изнашивания, на рис. 4.5 не видно.

Очевидно, аналогичные явления приводят к изнашиванию инденторов из одноименных материалов с материалами образцов, имеющих примерно одинаковую твердость (рис. 4.6 и 4.7). Здесь тоже хорошо видны следы адгезионно-усталостного изнашивания.

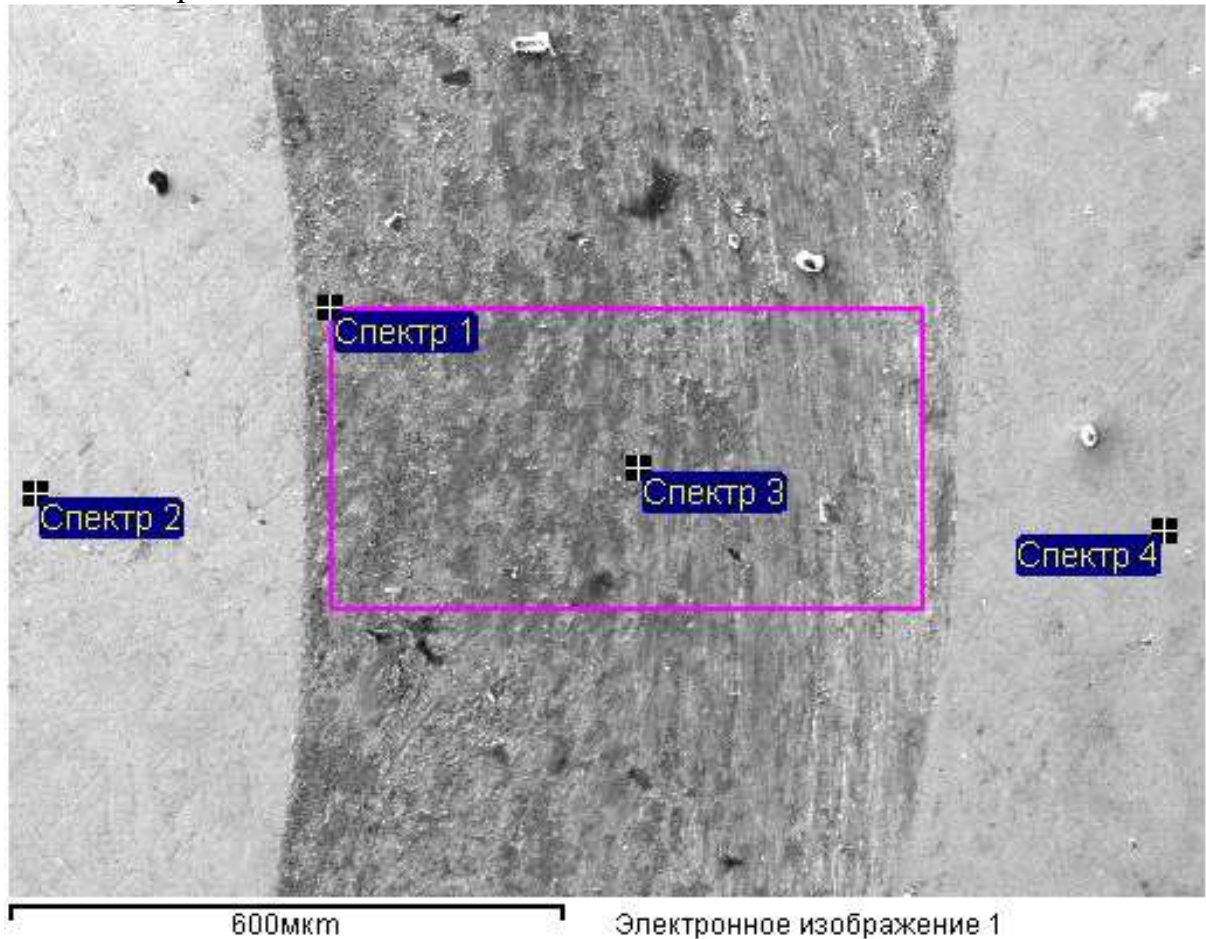
Следовательно, рис. 4.4-4.7 подтверждают ранее высказанное предположение, что в износ инденторов в обратных парах трения значительный вклад вносит абразивно-механическая составляющая изнашивания трибосопряжений. В прямых и в смешанных парах трения – значительный вклад вносит адгезионно-усталостная составляющая.

На рис. 4.8-4.12 представлены виды микрохимсостава изношенных поверхностей различных образцов при трении с инденторами из различных материалов. Данные по микрохимсоставу поверхностей трения позволяют шире и глубже рассмотреть изнашивание с учетом возможности появления при трении вторичных структур на этих поверхностях. Например, в прямых парах трения TiC-ЖС6У – ЖС6У и TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C – ЖС6У (рис. 4.8 и 4.9) не только хорошо видны следы (характерные полосы – углубления) абразивно-механического изнашивания мягкого образца из ЖС6У, но и появление на локальных участках поверхности трения кислорода (О) свидетельствует об образовании при трении и изнашивании окисных пленок. Оксидные пленки обнаружены также в смешанной паре трения TiC-ЖС6У – TiC-ЖС6У (рис. 4.11). В обоих случаях в контакт входил материал из кермета TiC-ЖС6У с твердыми

включениями TiC. Очевидно, эти включения, внедряясь при трении в более мягкие области контртела, осуществляют его микрорезание (с образованием оксида) и приводят к дополнительному износу.

Образец: **ЖС6У** - 515

Индентор: **TiC-ЖС6У** - 1597



Образец: **ЖС6У** – 515 с индентором **TiC-ЖС6У** - 1597

Состав	Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Fe	O
Спектр 1	47,29	10,22	7,03	7,63	7,59	3,25	2,21	-	14,78

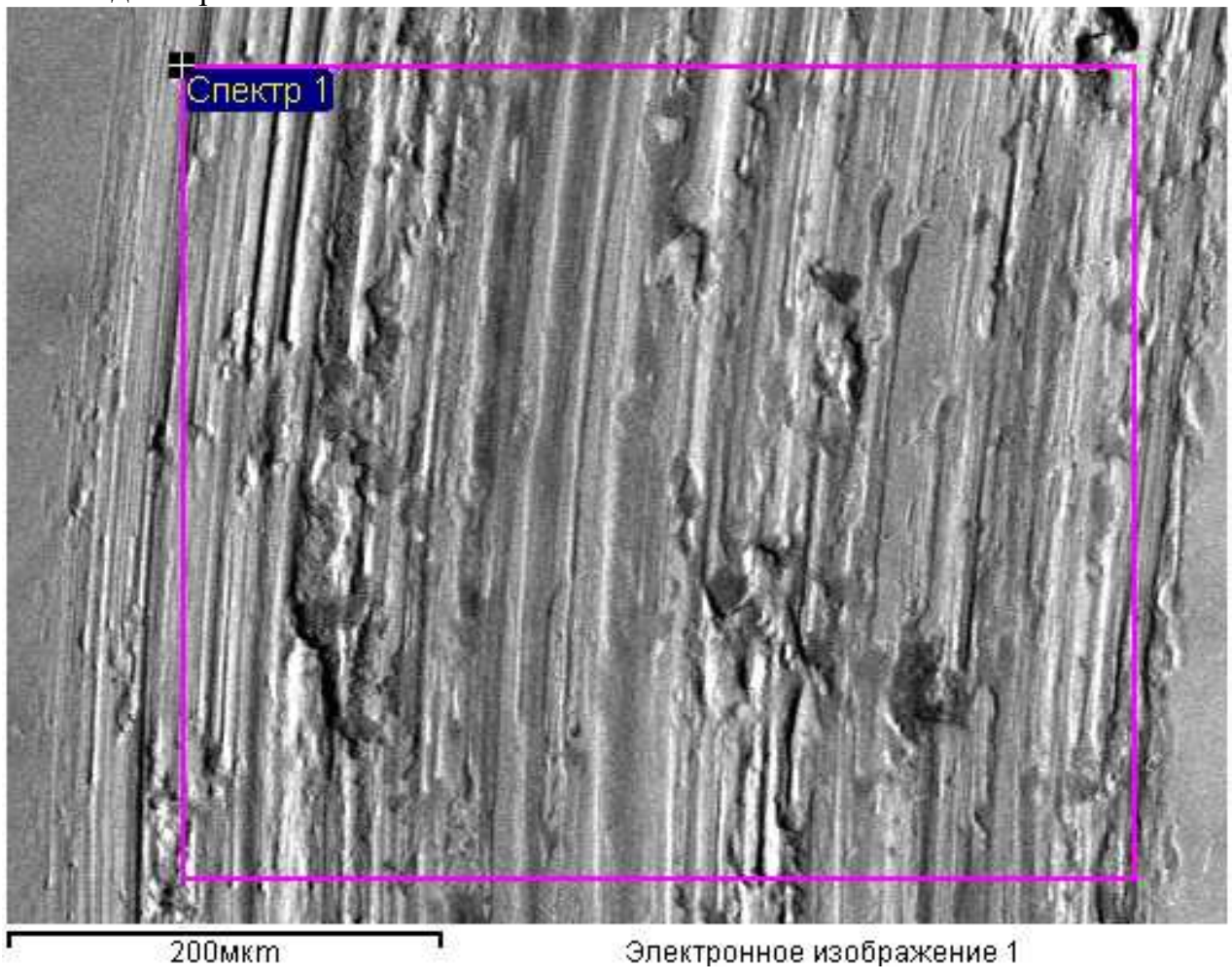
Образец: **ЖС6У** – 515 с индентором **TiC-ЖС6У** - 1597
(Точечное измерение)

Состав	Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Fe	O
Спектр 2 (чистая поверхность)	58,88	5,13	8,9	9,87	10,38	4,36	1,93	0,55	-
Спектр 3	43,81	7,29	6,8	7,53	7,82	3,08	2,34	0,45	20,89
Спектр 4 (чистая поверхность)	63,63	-	9,95	10,12	9,43	4,76	2,11	-	-

Рисунок 4.8 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из ЖС6У при контактировании с индентором из кермета TiC-ЖС6У

Образец: **ЖС6У** - 566

Индентор: **TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C** - 3420



Образец: **ЖС6У** – 566 с индентором **TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C** - 3420

Состав	Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Fe	O
Спектр 1	47,92	-	9,39	9,93	10,28	4,86	2,91	0,52	14,2

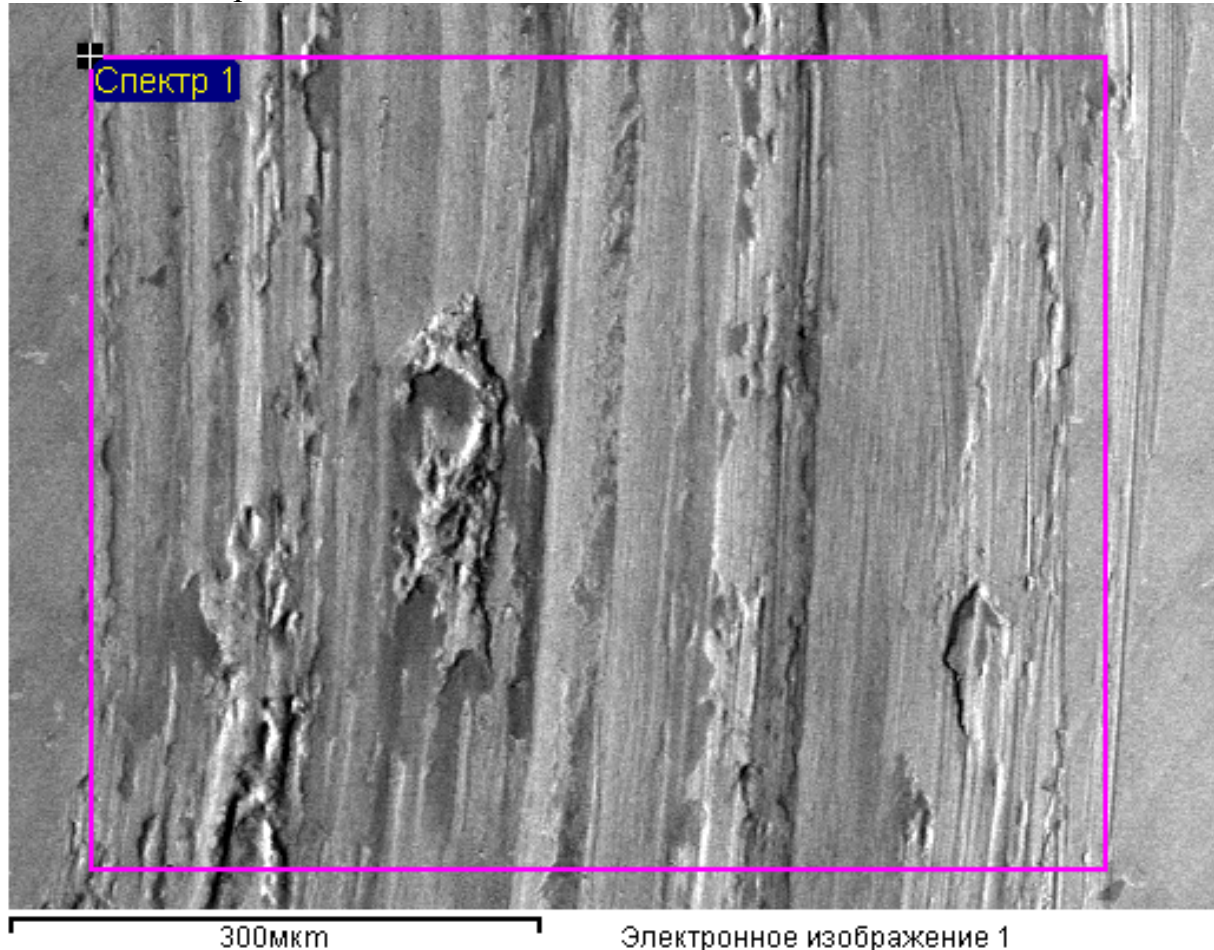
Рисунок 4.9 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из сплава ЖС6У при контактировании с индентором из кермета TiC-ЖС6У

Пленка из оксидов с одной стороны, может экранировать (предохранять) поверхности трения от износа, а, с другой стороны оторвавшиеся при износе твердые частицы оксидов являются хорошим абразивом, интенсифицирующим изнашивание при трении. Это видно, например, из рис. 4.10. В этом случае при обратной паре трения на более твердой поверхности помимо вырывов, характерных для адгезионно-усталостного изнашивания, хорошо видны углубления, полосы (царапины), являющие следом от микрорезания при

абразивно-механическом изнашивании. То же самое может происходить и смешанной паре трения.

Образец: **ЖС6У** - 567

Индентор: **ЖС6У** - 547



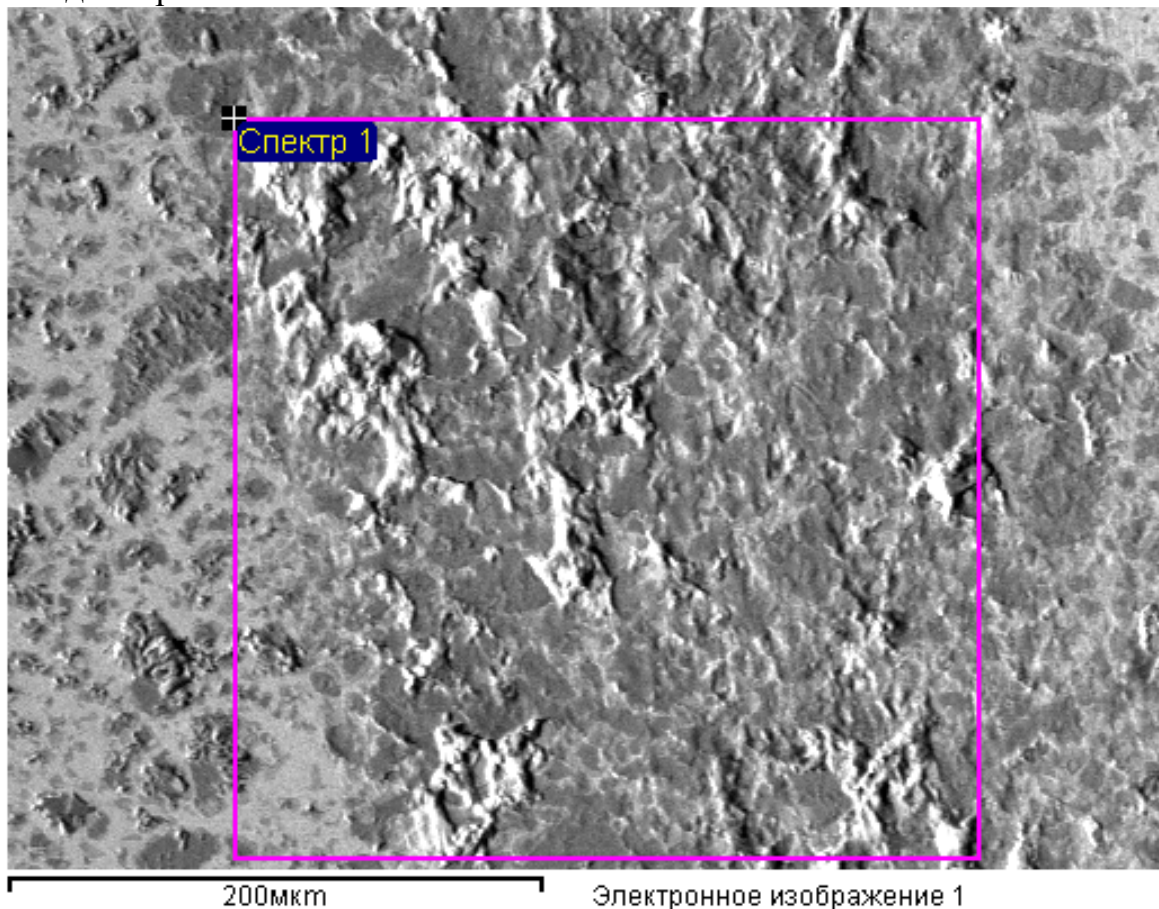
Образец: **ЖС6У** – 567 с индентором **ЖС6У** - 547

Состав	Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Fe	S	O
Спектр 1	48,8	-	9,42	10,32	10,28	4,94	2,78	0,67	0,68	12,11

Рисунок 4.10 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из сплава ЖС6У при контактировании с индентором из сплава ЖС6У

На рис. 4.10 хорошо видны и вырывы-налипы, характерные для адгезионно-усталостного изнашивания, и полосы-царапины абразивно-механического изнашивания.

Образец: **TiC-ЖС6У** - 1523
 Индентор: **TiC-ЖС6У** - 1597



Образец: **TiC-ЖС6У**- 1523 с индентором **TiC-ЖС6У** - 1597

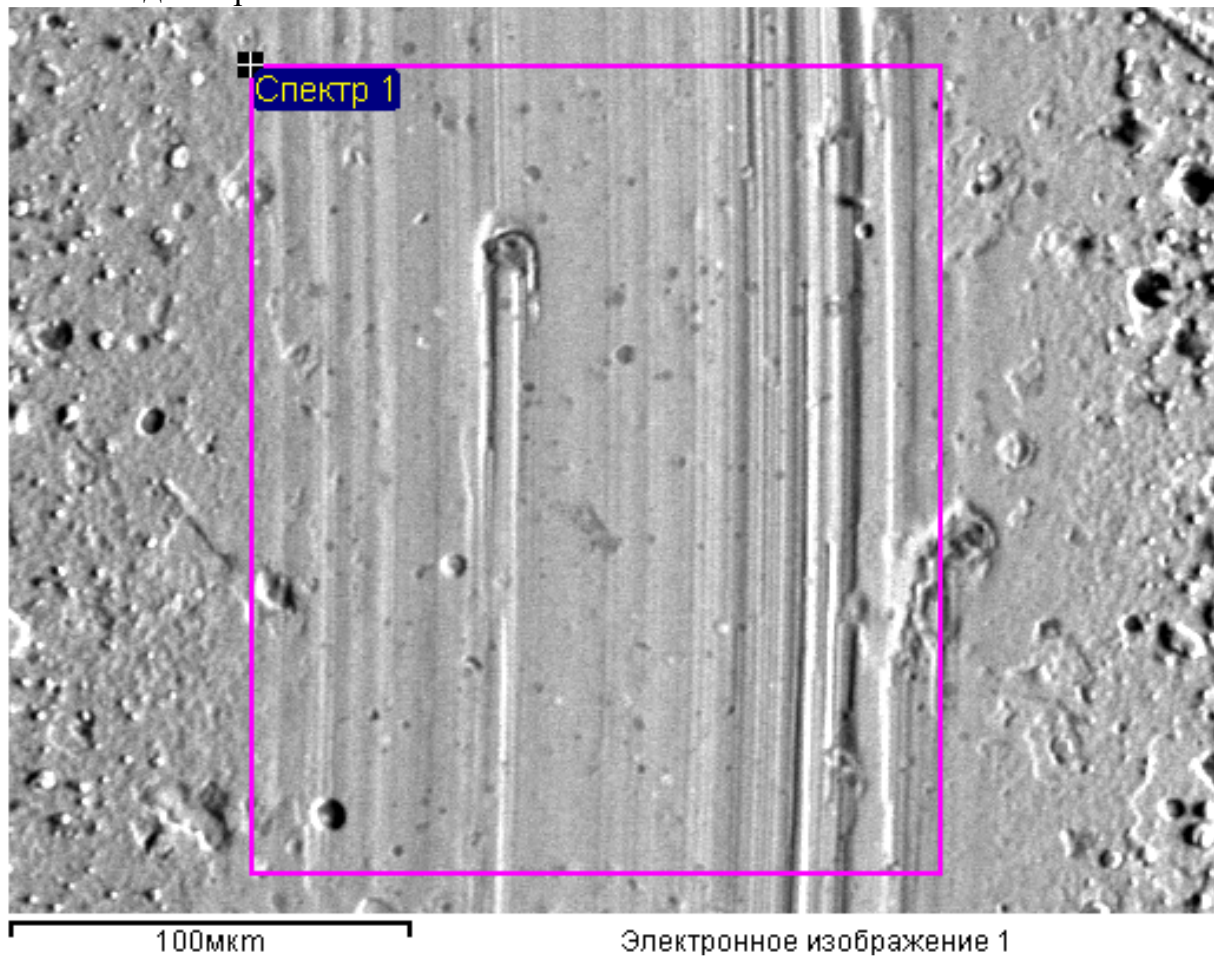
Состав	Ni	C	Cr	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	O
Спектр 1	22,83	10,27	6,48	2,04	0,54	32,17	3,43	1,54	20.7

Рисунок 4.11 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из кермета TiC-ЖС6У при контактировании с индентором из кермета TiC-ЖС6У

Вместе с тем в смешанной паре TiC-ЖС6У – TiC-ЖС6У (рис. 4.11) следы царапания на изношенной поверхности отсутствуют в связи с тем, что, очевидно, образовавшиеся оксиды по твердости уступали твердости кермета и, оторвавшись из поверхности при износе, не смогли внедриться в нее для абразивного изнашивания. Поэтому на изношенной поверхности видны в основном следы вырывов, характерные для адгезионно-усталостного изнашивания.

Образец: **TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C** - 2060

Индентор: **TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C** - 3420



Образец: **TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C** – 2060 с индентором
TiC-ЖС6У +Zr-Ti-N-C -3420

Состав	N	C	Zr	Ni	Ti
Спектр 1	5,44	8,41	62,54	0,47	23,14

Рисунок 4.12 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C при контактировании с индентором из кермета TiC- ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C

Нанесение на керметы износостойких покрытий экранирует выход в контакт твердых включений TiC, в результате этого микрорезание при трении практически отсутствует, что видно из рис. 4.12. На изношенной поверхности не видны характерные следы абразивного изнашивания и отсутствует кислород. На поверхности видны незначительные вырывы, происходящие при адгезионно-усталостном изнашивании.

Таким образом, проведенные металлографические исследования подтвердили абразивно-механический и адгезионно-усталостный характер изнашивания контактирующих поверхностей в изучаемых парах трения. Установлено, что на поверхностях трения могут образовываться вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей могут в них внедряться, повышая изнашивание. Нанесение износостойких покрытий на **обе** контактирующие поверхности из керметов практически полностью исключает их абразивно-механическое изнашивание. Для пар трения из одноименных материалов превалирующим является адгезионно-усталостное изнашивание.

4.5 Роль керметов в механизме формирования износа изучаемых трибосопряжений

На основании результатов металлографических исследований поверхностей трения, изложенных в предыдущем параграфе, можно представить следующие механизмы формирования износа для изученных пар трения, в которых применялись керметы.

На рис. 4.13 и 4.14 представлено предложенное нами формирование износа трибосопряжений с обратной (рис.4.13) и прямой (рис.4.14) парами трения, в которых в качестве твердого тела использовался кермет.

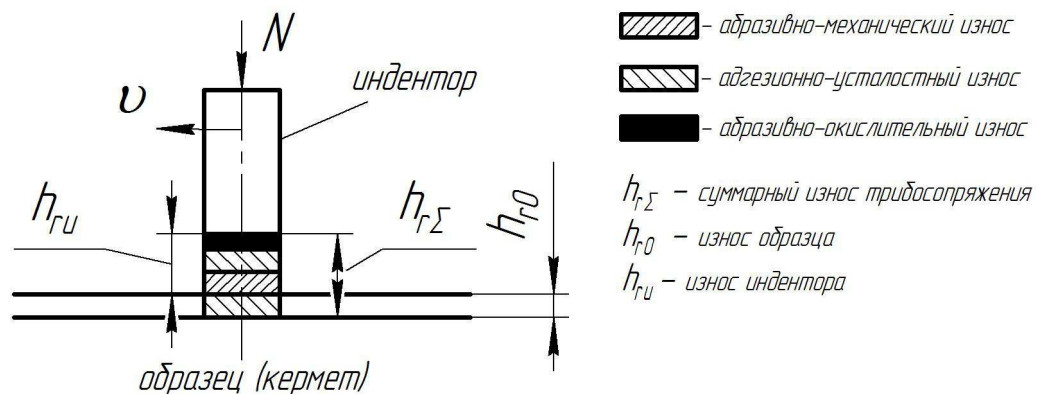


Рисунок 4.13 Формирование износа трибосопряжения, в котором твердым телом (образец) является кермет

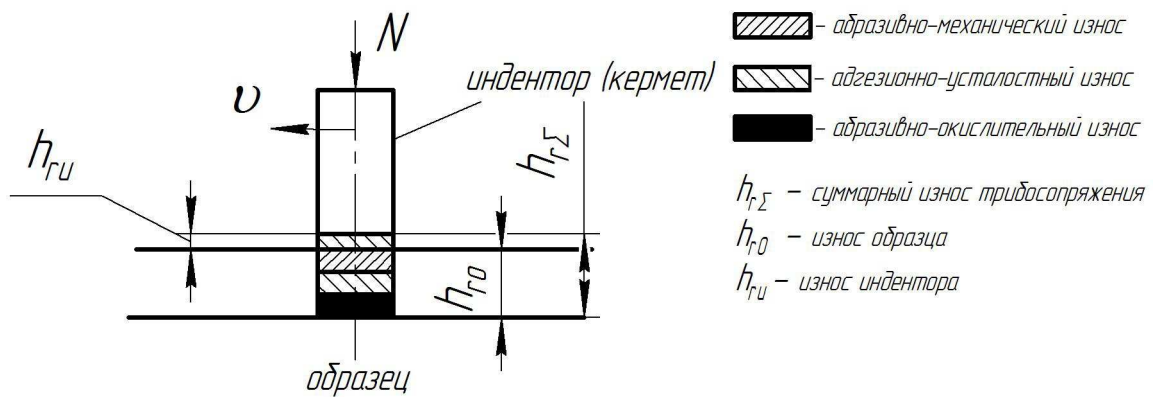


Рисунок 4.14 Формирование износа трибосопряжения, в котором твердым телом (индентор) является кермет

Из этих рисунков следует, что применение кермета в паре трения с более мягким материалом увеличивает износ трибосопряжения, так как при этом происходят все изученные виды изнашивания: абразивно-механический, адгезионно-усталостный и окислительный.

Для смешанных пар трения с участием кермета (с покрытием и без покрытия), как видно из рис. 4.15 и 4.16, практически исключается абразивно-механическое изнашивание, а для пар с покрытием исключается также окислительное изнашивание.

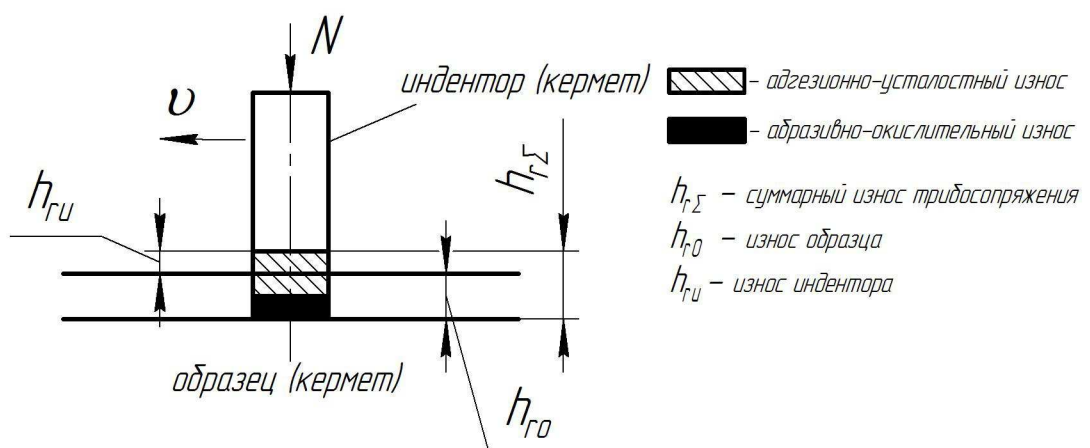


Рисунок 4.15 Формирование износа трибосопряжения, в котором оба контактирующих тела из кермета

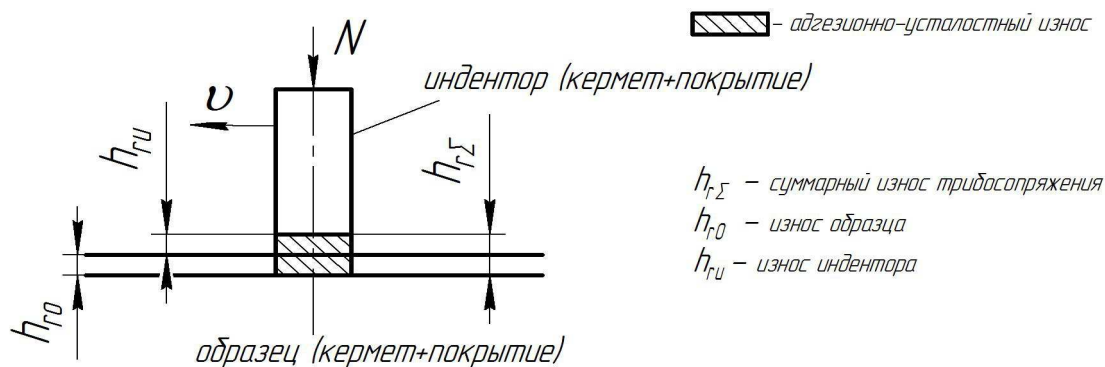


Рисунок 4.16 Формирование износа трибосопряжения, в котором оба контактирующих тела из кермета с износостойким покрытием.

Таким образом, износостойкие покрытия не только экранируют технологические поры в кермете, но и экранируют твердые включения, имеющиеся на поверхностях трения керметов, этим самым препятствуя абразивно-механическому и окислительному изнашиванию в парах трения.

Следовательно, для уменьшения износа трибосопряжений следует при изготовлении деталей запорной арматуры использовать керметы в обеих парах трения. Наибольший эффект по износостойкости можно получить, если на поверхности этих деталей нанести износостойкие покрытия.

Выводы по главе

1. Впервые установлено, что в обратных парах трения изнашивание более твердых больших поверхностей (образцов) функционально связано с адгезионно-усталостными процессами, происходящими на подвижном фрикционном контакте с мягким индентором, о чем свидетельствует впервые полученная степенная зависимость изнашивания от коэффициента β упрочнения адгезионных связей от действия нагрузки.

2. Показано, что в прямых парах трения уровень изнашивания более мягких больших поверхностей значительно повышается за счет дополнительного абразивно-механического изнашивания твердыми включениями TiC в кермете TiC-ЖС6У – материале индентора.

3. Впервые установлено, что износ более твердого тела (индентора) в прямой паре трения функционально связан с коэффициентом β упрочнения адгезионных связей. Это свидетельствует об адгезионно-усталостном характере изнашивания индентора в прямой и обратной паре трения.

4. Показано, что в обратных парах трения, уровень изнашивания более мягких тел (инденторов) повышается за счет дополнительного абразивно-механического изнашивания твердыми включениями TiC в кермете TiC - ЖС6У – материале образца (большей поверхности).

5. Впервые экспериментально установлено, что суммарный износ (объемный) трибосопряжений из смешанных пар (с близкой по величине микротвердостью) трения функционально зависит от коэффициента β упрочнения адгезионных связей от действия давления на подвижном фрикционном контакте и описывается уравнением:

$$V = C \cdot \beta^m.$$

Для полученных пар трения: $C = 27$; $m = 2$. Наибольшую износостойкость обеспечивает пара, изготовленная из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C.

6. Металлографические исследования подтвердили абразивно-механический и адгезионно-усталостный характер изнашивания контактирующих поверхностей в изучаемых парах трения. Установлено, что на поверхностях трения могут образовываться вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, повышая изнашивание. Нанесение износостойких покрытий на обе контактирующие поверхности из керметов практически полностью исключает их абразивно-механическое изнашивание. Для пар трения из одноименных материалов (с близкой микротвердостью) превалирующим является адгезионно-усталостное изнашивание.

7. Установлено, что для уменьшения износа трибосопряжений следует при изготовлении деталей запорной арматуры использовать керметы в обеих деталях пары трения. Наибольший эффект по износостойкости можно получить, если на поверхности этих деталей нанести износостойкие покрытия.

ГЛАВА 5 ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном разделе выполнен анализ полученных результатов исследований адгезионного взаимодействия и износа керметов (с износостойкими покрытиями и без покрытий) на скользящем фрикционном контакте с другими материалами, используемыми в деталях запорной арматуры нефтепроводов. Представлена методика и результаты стендовых испытаний на трение реальной пары шара и седла шарового крана, выполненных из керамико-металлического материала TiC-ЖС6У. Результаты стендовых испытаний сопоставлены с данными лабораторных исследований.

В этом разделе приведены также расчеты экономической целесообразности применения керметов в запорной арматуре нефтепроводов, а также практические рекомендации.

5.1 Обобщение результатов исследований по трению и износу трибосопряжений из керамико-металлических материалов

Как указывалось выше, важными показателями качества работы запорной арматуры трубопроводов являются:

- Энергетические затраты на трение при относительном перемещении элементов трибосопряжения (например, «шар-седло» в шаровом кране), которые напрямую влияют на габариты и работоспособность привода;
- Герметичность запорной арматуры, которая в значительной мере зависит от износа сопрягаемых поверхностей деталей арматуры.

К сожалению, материалы, используемые до недавнего времени для изготовления запорной арматуры, не всегда отвечали одновременно этим важнейшим показателям качества работы арматуры.

В данном исследовании необходимо было ответить на следующие вопросы:

1. Годятся ли керамико-металлические материалы на основе карбида титана для изготовления основных деталей запорной арматуры нефтепроводов (например, шара и седла)?
2. Имеют ли эти керметы преимущества перед другими материалами, используемыми для изготовления деталей запорной арматуры?
3. Каковы условия получения наибольшего качества работы запорной арматуры, изготовленной из керамико-металлических материалов на основе карбида титана?

В третьей главе данной работы представлены результаты исследования адгезионного взаимодействия при скольжении различных пар трения, в том числе на основе TiC (с износостойкими покрытиями и без покрытий). При этом установлено, что применение кермета даже в **одной** из деталей пары трения повышает нагрузочную способность фрикционного контакта, снижает молекулярную составляющую коэффициента трения и коэффициента β упрочнения адгезионных связей. Но наибольший эффект по снижению энергетических затрат на трение достигается, когда **обе** детали фрикционной пары изготавливаются из кермета с износостойким покрытием.

В четвертой главе приведены результаты исследования износа трибосопряжений, в том числе, изготовленных из керметов на основе TiC (с покрытиями и без покрытий). Эти исследования показали, что наличие твердых включений TiC в керметах, с одной стороны, увеличивает среднюю микротвердость поверхностей трения и этим самым увеличивает их износостойкость, но, с другой стороны, эти твердые включения могут участвовать в износе как абразив, повышая интенсивность изнашивания в трибопарах. Поэтому наибольшую износостойкость показали трибосопряжения, в которых **обе** контактирующие детали изготавливаются из кермета с износостойким покрытием, экранирующим твердые включения TiC и исключаящим абразивно-механическое и окислительное изнашивание.

Необходимо при этом отметить, что износостойкие покрытия повышают герметичность запорной арматуры не только в связи с повышением

износостойкости контактирующих деталей, но и в связи с экранированием технологических пор в изучаемых керметах.

Удовлетворительные результаты по изнашиванию демонстрируют пары трения, у которых обе детали изготавливаются из керметов на основе TiC (без покрытий).

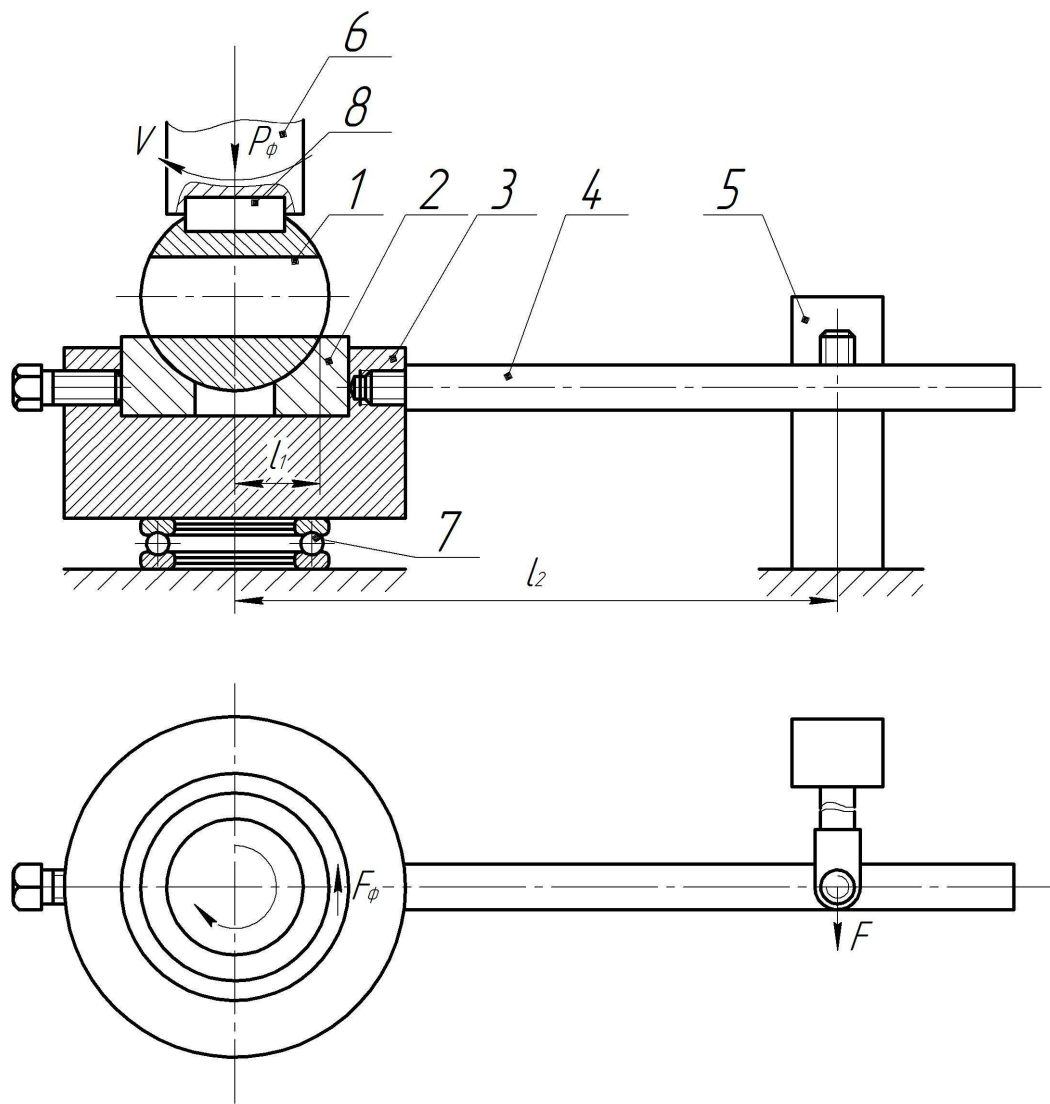
Таким образом, исследования показали, что применение керметов на основе карбида титана TiC и жаропрочного сплава ЖС6У (или ВЖЛ14Н) должно обеспечивать более высокие показатели качества работы запорной арматуры по сравнению с другими материалами. Для достижения наибольшего эффекта необходимо, чтобы **обе** детали пары трения изготавливались из кермета и, желательно, на их поверхности нанести износостойкое покрытие.

Основные преимущества таких трибосопряжений: высокая несущая способность (увеличенные предельные нормальные напряжения); незначительное влияние на качество работы арматуры температуры и среды сырой нефти; высокая герметичность и малые энергетические затраты на преодоление сил трения при открытии и закрытии запорной арматуры.

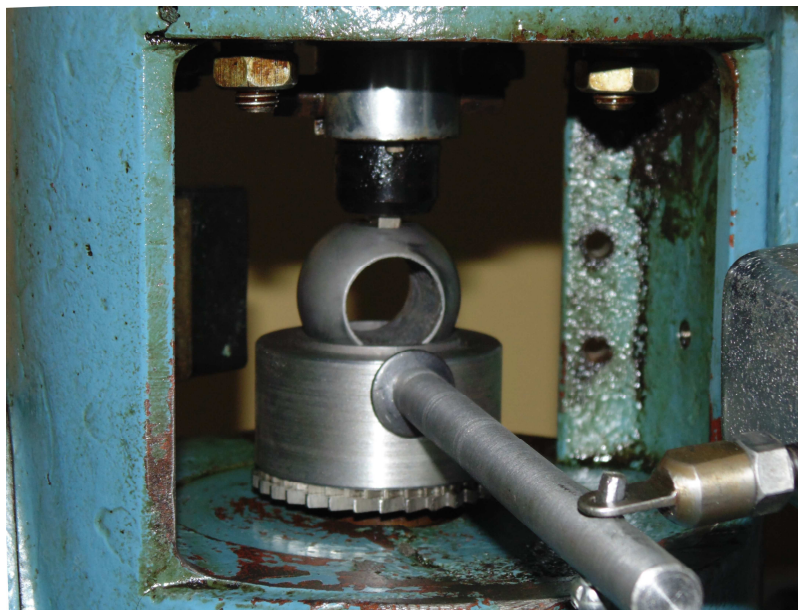
5.2 Оборудование, методика и результаты стендовых испытаний

Исследования проводили на модернизированной четырехшариковой машине трения (ЧМТ-1) ГОСТ 9490-75 (рис. 5.1) при ступенчатом изменении осевой нагрузки P от 400 до 2500 Н на узел трения «шар-седло» реального шарового крана из кермета TiC-ЖС6У. В качестве вращающегося элемента использовался шар-головка диаметром 40 мм, который прижимался к седлу соответствующего размера силой P .

Во время вращения шара сила P изменялась за счет ступенчатого изменения веса нагрузок на рычаге ЧМТ-1: $P=400$ Н; 800 Н; 1000 Н; 1600 Н; 2000 Н; 2500 Н.



a)



б)

Рисунок 5.1 Схема работы а) и общий вид ЧМТ-1 б) при исследовании трения пары «шар-седло» шарового крана: 1 – шар; 2 – седло; 3 – чаша; 4 – рычаг; 5 – датчик фиксирования силы трения F ; 6 – приводной вал; 7 – упорный подшипник качения; 8 – шпонка.

Для оценки влияния сырой нефти ее предварительно наносили на испытываемые поверхности шара и седла с помощью кисточки.

Фактическую площадь касания шара и седла определяли с помощью метода красок.

После модернизации ЧМТ-1 за счет постановки планетарного редуктора и частотного электропреобразователя частота вращения приводного вала равнялась 1 об/мин. На ЧМТ-1 была установлена тензометрическая силоизмерительная система с датчиком 1925ИС-М $P_{\text{ном}} = 0,5 \text{ кН}$ с дальнейшим преобразованием через АЦП (аналого-цифровой преобразователь) и выходом на компьютер в виде графика «сила трения F – время перемещения записывающего устройства».

На рис. 5.2 и 5.3 приведены характерные графики, полученные при исследовании трения-скольжения в среде сырой нефти и всухую. По данным этих графиков определялась величина F_{ϕ} трения (с учетом соотношения длин l_1 и l_2 рычага 4 – рис. 5.2), действующая на фактической площади касания и соответствующая приложенной нормальной нагрузке P .

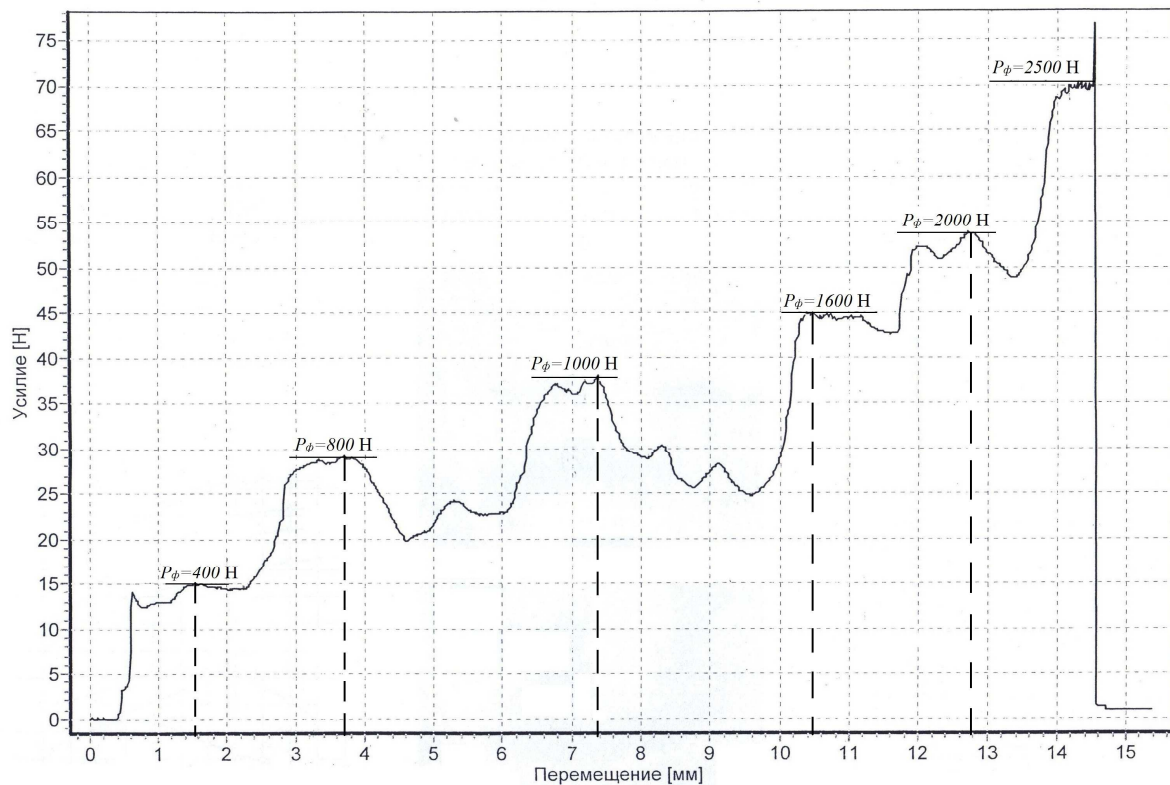


Рисунок 5.2 Зависимость силы F трения (на рычаге) от нагрузки P при скольжении в среде сырой нефти

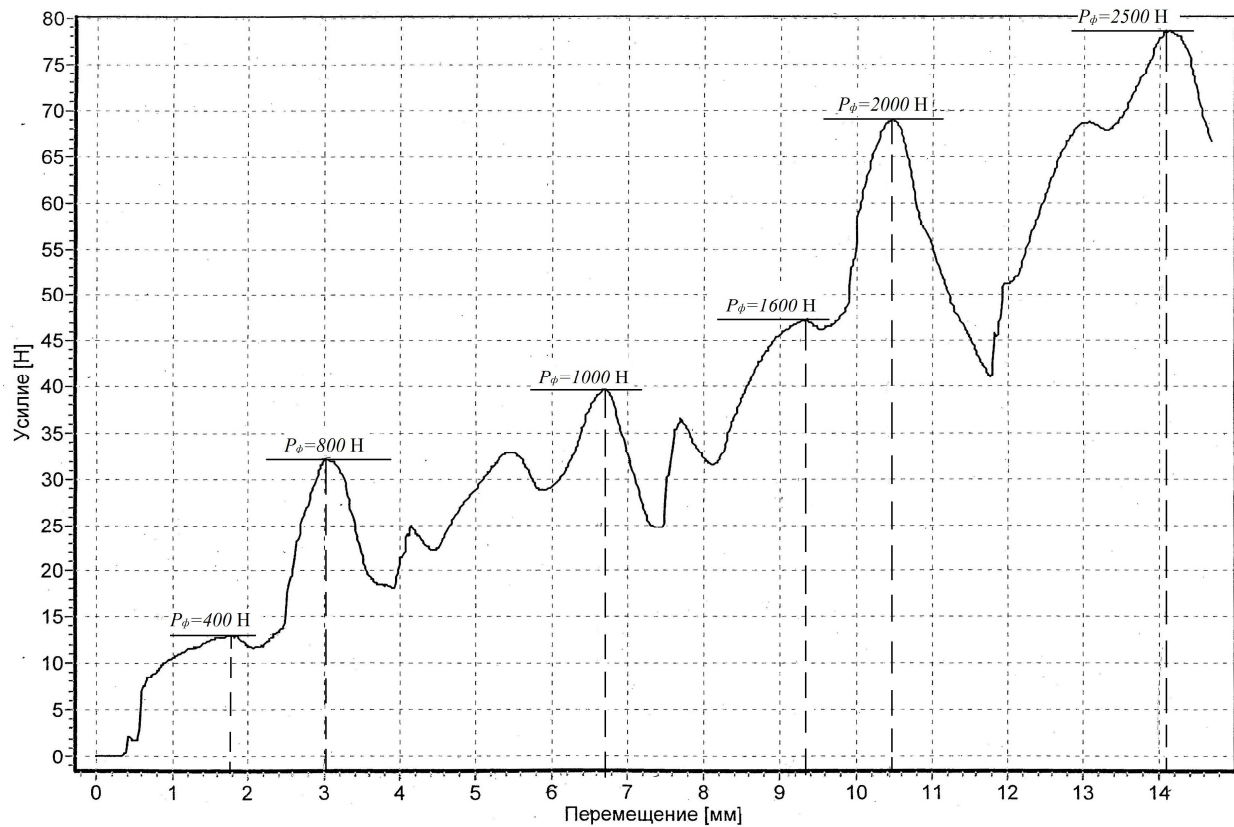


Рисунок 5.3 Зависимость силы F трения (на рычаге) от нагрузки P при скольжении без смазки

По величинам P , F_ϕ и фактической площади касания вычислялись: давления p_r на фрикционном контакте, прочность τ_n адгезионных связей на срез, а также величина f_m , характеризующая молекулярную (адгезионную) составляющую коэффициента трения. Таким образом, были получены зависимости τ_n от p_r для изучаемой пар трения в условиях присутствия и отсутствия сырой нефти, что позволило определить в этих условиях величину коэффициента f_m и ее изменение (рис. 5.4 и табл. 5.1).

Из сопоставления, а также из данных табл. 5.1, приведенных на рис. 5.4 а и 5.4 б, видно, что действительно так же, как и в лабораторных исследованиях, сырая нефть не оказывает существенного влияния на триботехнические характеристики трибосопряжения «шар-седло» из кермета TiC-ЖС6У. Касательные напряжения τ_n так же, как в лабораторных исследованиях (рис. 3.6), прямопропорционально зависят от давления p_r на подвижном фрикционном контакте. При этом из сопоставления данных, приведенных на рис. 5.4 и 3.6,

видно, что диапазон давлений p_r в лабораторных исследованиях включал в себя диапазон давлений в стендовых испытаниях.

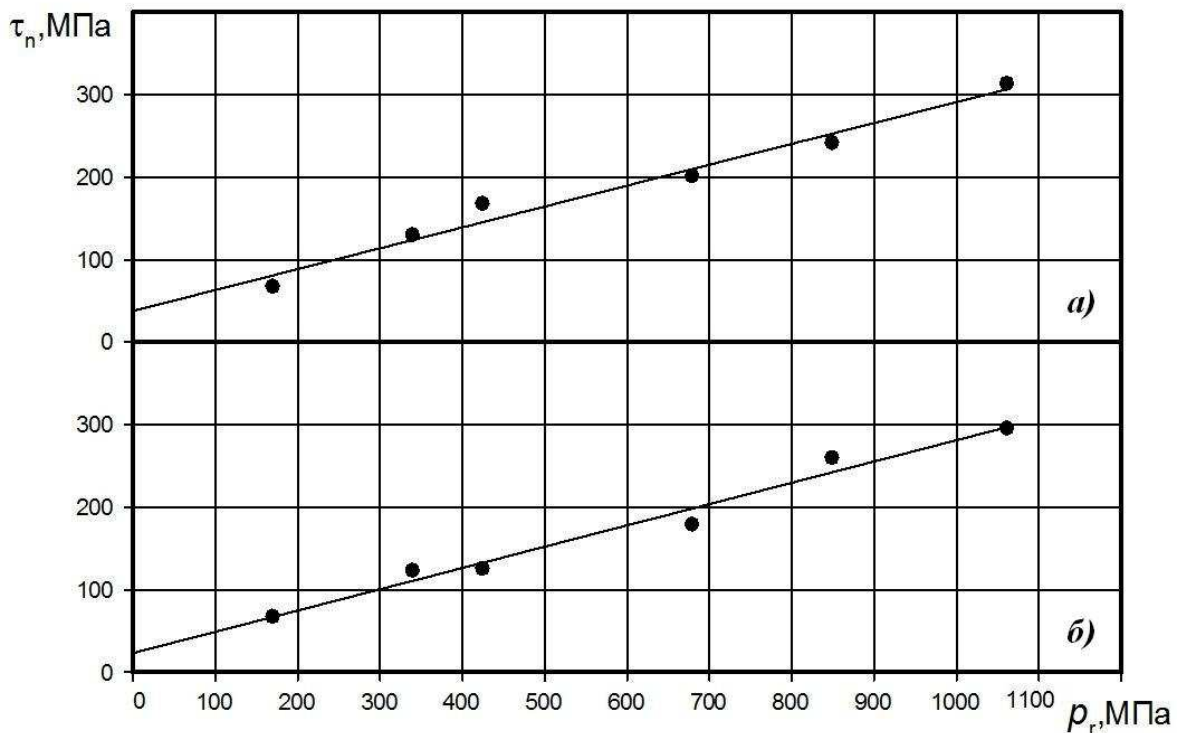


Рисунок 5.4 Влияние p_r на прочность τ_n адгезионных связей на срез подвижного фрикционного контакта «шар-седло» из кермета TiC-ЖС6У:
а) в среде сырой нефти; б) в сухую.

Таблица 5.1

Влияние давления и среды на триботехнические характеристики подвижного контакта «шар-седло» из кермета TiC-ЖС6У

Вид трибосопряжения	Давление p_r , МПа	Коэффициента трения, f	τ_0 , МПа	β
Шар-седло +сырая нефть	169,85	0,395	40	0,253
	339,70	0,382		
	424,63	0,395		
	679,41	0,296		
	849,26	0,284		
	1061,57	0,295		
Шар-седло	169,85	0,395	30	0,258
	339,70	0,362		
	424,63	0,295		
	679,41	0,263		
	849,26	0,305		
	1061,57	0,278		

При сопоставлении триботехнических характеристик трибосопряжений из кермета TiC-ЖС6У, которые были получены в лабораторных испытаниях (табл. 3.6) с данными стендовых испытаний (табл. 5.1) необходимо принять во внимание, что во время стендовых испытаний узел трения «шар-седло» заметно разогревался (из-за значительной площади трения). Поэтому в табл. 3.6 следует рассматривать результаты, полученные при температуре около 300 °С. Тогда видно, что проведенные стендовые испытания практически подтвердили результаты, полученные в лабораторных исследованиях триботехнических характеристик трибосопряжений из керметов TiC-ЖС6У (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Сравнение триботехнических характеристик, полученных в лабораторных и стендовых испытаниях трибосопряжений из керметов TiC-ЖС6У

Сравниваемые параметры	Лабораторные исследования	Стендовые испытания
Коэффициент трения	0,31	0,278-0,395
τ_0 , МПа	50	30
β	0,281	0,258

Из данных табл. 5.2 видно, что коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из кермета на основе TiC определяется в основном величиной молекулярной (адгезионной) составляющей этого коэффициента. Следовательно, для повышения качества работы шаровых кранов необходимо обратить особое внимание на мероприятия по снижению параметров адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей, в том числе путем нанесения на них износостойких покрытий.

5.3 Преимущества применения керметов на основе карбида титана в запорной арматуре

В нефтеперерабатывающей отрасли произошло много изменений - от способов переработки до количества времени, расходуемого на эксплуатацию очистных установок. Эти изменения наряду с появлением требований о низком содержании серы в топливе, требований к очистке низкосортной сырой нефти и необходимости переработки большого количества осадочных нефтепродуктов создали крайне высокий спрос на изоляционные краны и регулирующие клапаны.

Ненадежные и непредсказуемые краны в чрезвычайных обстоятельствах могут нанести огромные материальные убытки и иметь разрушающие последствия для оборудования и персонала. Поэтому остро стоит проблема разработка конфигураций материалов и высококачественных покрытий для использования их при высоких температурах, высоком давлении, в эрозионной, коррозионной, вязкой среде и в условиях коксования и асфальтизации.

Так при гидропереработке нефтепродуктов и гидрокрекинге температура может достигать 540 °С, а давление до 240 бар с высокой кислотной коррозией. При деасфальтизации нефти температура достигает 480°С в тяжелых эрозионных условиях.

Колонна вакуумной перегонки производит отделение атмосферного остатка сырой нефти для производства тяжелого, среднего и легкого вакуумного газойля и таких продуктов, не являющихся результатом дистилляции, как вакуумный остаток.

Огонь на нефтеперерабатывающем заводе всегда опасен, но если огонь достигнет большого количества сырой нефти, содержащейся в основной башне и прилегающих боковых отпарных колоннах, ситуация может перерасти в катастрофу.

В случае критической ситуации, вызванной пожаром, эта система изолирует башню и прилегающие колонны — и, соответственно, воспламеняющийся

продукт, который в них содержится, — от остальной части нефтеперерабатывающего завода.

Типичные эксплуатационные условия:

- Высокая температура (500 – 900°F / 260 – 480°C);
- Коксование и тяжелая асфальтизация;
- Температурное циклирование;
- Эрозийные условия.

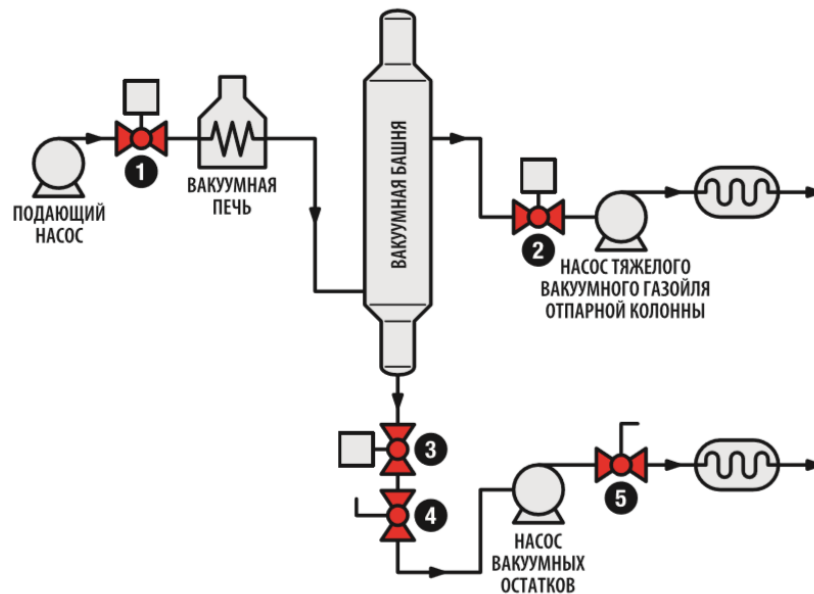


Рисунок 5.5 Схема вакуумной дистилляции

Таблица 5.3

Технические требования для кранов

№	Описание крана	Диапазон температур		Диапазон давления		Диаметр трубы	
		°F	°C	фунт/дюйм ² изб	бар и.д.	дюйм	номин. диаметр
1.	Изоляция подающего насоса	400 – 800	205 – 430	100 – 200	5 – 15	6 – 10	150 – 250
2.	Аварийная клиновая задвижка для насоса тяжелого вакуумного газойля	400 – 800	205 – 430	0 – 20	0 – 1	4 – 8	100 – 200
3.	Аварийная клиновая задвижка для донного осадка вакуумной башни	700 – 900	370 – 480	0 – 20	0 – 1	8 – 14	200 – 350
4.	Изоляция насоса вакуумных осадков	700 – 900	370 – 480	0 – 20	0 – 1	6 – 10	150 – 250
5.	Изоляция обменника вакуумных осадков	700 – 900	370 – 480	150	10	6 – 10	150 – 250

Полученные результаты данного исследования были переданы для практического использования изготовителю шаровых кранов ООО «МАРОМА Технологии» (г. Уфа). Совместно с этим предприятием составлено следующее описание инновационного подхода по применению керметов на основе карбида титана в шаровых кранах запорной арматуры трубопроводов.

Предлагаемая технология является новой (имеются патенты на изобретения) и устраняет недостатки, присущие существующим продуктам:

- использование виброформования порошка карбида титана, спекание и инфильтрация расплавом металла за одну операцию в одной и той же керамической форме обеспечивает однородность химического состава и физико-механических свойств во всех зонах изделия;

- изготовление шарового затвора полностью из кермета обеспечивает высокую твердость по всей глубине изделия и исключает отслаивание поверхностного слоя в связи с его отсутствием в отличие от изделий с многослойными керметными покрытиями;

- наличие пластичной металлической связки обеспечивает высокую стойкость против термических и механических ударов и высокую надежность при эксплуатации шарового затвора и крана в целом, независимо от величины температурных перепадов в отличие от изделий из керамики;

- достаточная простота и управляемость технологии позволяет обеспечить стабильность качества в процессе производства и значительно снизить себестоимость изделий;

- тонкие керамические покрытия из нитрида и карбида титана, нитрида и карбида хрома и т.д. модифицирование («Ноблексирование», “Noblex®”-изделия) изделий, толщиной до 20 мкм на очень твердой керметной основе, имеющих близкие физико-механические характеристики позволяют обеспечить наивысшие эксплуатационные характеристики изделий. При «Ноблексировании» поверхностный слой, содержащий хром, насыщается веществами из газовой среды и с обеспечением высокой твердости (1200 HV или более 75 HRC) на

глубину до 30 мкм, поэтому отслоение исключено. А твердость зерен карбида титана и так высока – 3000-3200 HV.

- нанесение износостойких покрытий на обе контактирующие поверхности (шара и седла) существенно уменьшает их адгезионно-усталостное и практически исключает абразивно-механическое изнашивание. Это повышает эксплуатационную надежность и снижает энергетические затраты привода шаровых кранов.

Предложенное применение керметов для изготовления шаровых кранов направлено на замещение двух видов имеющихся как на российском, так и глобальным рынках кранов используемых в технологических средах, содержащих абразивные частицы и имеющих высокие температуры:

а) дорогостоящих, но высокоресурсных шаровых кранов (только зарубежного производства)

б) дешевых, но малоресурсных и неэффективных задвижки и запорных клапанов.

По сравнению с высокоресурсными шаровыми кранами зарубежного производства новые шаровые краны будут не менее чем в три раза дешевле.

Следует также отметить, что даже существующие высокоресурсные шаровые затворы с многослойными керметными покрытиями по некоторым характеристикам определенно уступают шаровому затвору, изготовленному полностью из кермета.

По сравнению с задвижками новые шаровые краны будут иметь более высокую эффективность в расчете на период эксплуатации в течение 10-15 лет с учетом ежегодного ремонта и закупки новых задвижек – расчет приведен ниже в таблице 5.4.

Экономическая эффективность применения шарового крана из кермета

Экономия от использования нового шарового крана взамен задвижек								
<i>Расчетный период, лет</i>							15	
Тип арматуры	Цена с НДС, тыс. руб	Ресурс, лет	Межремонтный цикл, лет	Затраты на ремонт, тыс.руб	Кол-во потребной арматуры, шт.	Кол-во потребных ремонтов	Всего затрат на ремонт, тыс.руб	Общие затраты за 15 лет, тыс.руб
Задвижка ЗКЛ2 50-63 (БАЗ, РФ) DN50 мм	40	3	1	30	5	10	300	500
Новый шаровой кран "МАРОМА", DN50мм	175	15	5	30	1	2	60	235
Экономия от использования одного нового шарового крана взамен задвижек за 15 лет							тыс. руб	265
Степень снижения затрат, от использования одного нового шарового крана взамен задвижек за 15 лет							%	213%

Примечания к табл. 5.3:

1. В расчете не учтены потери от простоя оборудования при ежегодных регламентных работах (один месяц) задвижек и вентилей и экономия от снижения затрат энергии на транспортировку рабочих сред.

2. В расчете не учтены вред окружающей среде нефтепродуктами от течей задвижек и экономия от повышения пожаро- и взрывобезопасности при использовании шарового крана.

3. В расчете не учтена возможность перешлифовки шарового затвора, изготовленного полностью из кермета, на следующий размер при износе и увеличении срока службы шарового крана.

5.4 Выводы по главе

1. Исследования показали, что применение керметов на основе карбида титана TiC и жаропрочного сплава ЖС6У (или ВЖЛ14Н) может обеспечить более высокие показатели качества работы запорной арматуры по сравнению с другими

материалами. Для достижения наибольшего эффекта необходимо, чтобы обе детали пары трения изготавливались из кермета и, желательно, на их поверхности нанести износостойкие покрытия.

2. Как показали расчеты, экономия от использования одного нового шарового крана из кермета TiC-ЖС6У взамен существующих задвижек за 15 лет составляет 265 тыс.руб. (за счет повышения эксплуатационной надежности и снижения энергетических затрат привода).

3. Стендовые и натурные испытания шаровых кранов из керамико-металлического материала TiC-ЖС6У или TiC-ВЖЛ14Н подтвердили результаты и рекомендации диссертации.

4. Установлено, что коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из кермета TiC-ЖС6У определяется в основном величиной молекулярной (адгезионной) составляющей этого коэффициента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы

1. Показано, что применение изучаемых керметов в обеих деталях пары трения (шара и седла) в 1,2-2 раза повышает несущую способность (предельные давления) подвижного фрикционного контакта и в 1,5-2 раза уменьшает молекулярную составляющую коэффициента трения по сравнению с парами, в которых лишь одна деталь из кермета. При этом повышение температуры не оказывает значительного влияния на уменьшение несущей способности контакта.

2. Проведенные экспериментальные исследования по определению прочности адгезионной связи на срез и молекулярной составляющей коэффициента трения показали, что эти значения для сопряжения «шар-седло» при наличии нефти несущественно отличаются от результатов при трении без нее.

3. На основании теоретического анализа полученных экспериментальных результатов исследования адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей в различных условиях трения, показано, что значительный вклад в улучшение триботехнических характеристик изучаемых керметов вносит уменьшение пластичности «третьего тела», формирующегося на фрикционном контакте.

4. Установлено, что в обратных парах трения (когда шар мягче седла) изнашивание более твердых поверхностей (седла) функционально связано с адгезионно-усталостными процессами, происходящими на подвижном фрикционном контакте с мягким телом, о чем свидетельствует впервые экспериментально полученная степенная зависимость изнашивания от коэффициента β упрочнения адгезионных связей от действия нагрузки.

5. Показано, что в прямых парах трения (когда шар тверже) уровень изнашивания более мягких больших поверхностей (седла) значительно повышается за счет дополнительного абразивно-механического изнашивания твердыми включениями TiC в кермете TiC-ЖС6У – материале более твердого тела (шара).

6. Износостойкие покрытия не только экранируют поры в керметах на основе карбида титана, но и препятствуют выходу на поверхности трения твердых включений TiC, этим самым снижая абразивно-механическое и окислительное изнашивание в порах трения и уменьшая суммарный износ трибосопряжений.

7. Впервые экспериментально установлено, что суммарный износ (объемный) трибосопряжений из пар трения (с близкой по величине микротвердостью) функционально зависит от коэффициента β упрочнения адгезионных связей на подвижном фрикционном контакте и описывается уравнением:

$$V = C \cdot \beta^m.$$

Для полученных пар трения: $C = 27$; $m = 2$. Наибольшую износостойкость обеспечивает пара, изготовленная из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C.

8. Металлографические исследования подтвердили абразивно-механический и адгезионно-усталостный характер изнашивания контактирующих поверхностей в изучаемых парах трения. Установлено, что на поверхностях трения формируются вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, повышая изнашивание. Нанесение износостойких покрытий на обе контактирующие поверхности из керметов практически полностью исключает их абразивно-механическое изнашивание. Для пар трения из одноименных материалов (с близкой микротвердостью) превалирующим является адгезионно-усталостное изнашивание.

9. Установлено, что коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из керметов на основе TiC определяется в основном величиной молекулярной (адгезионной) составляющей этого коэффициента, поэтому для повышения качества работы шаровых кранов сформулированы обобщенные рекомендации по уменьшению параметров адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей, путем нанесения на них износостойких покрытий.

10. Стендовые и натурные испытания шаровых кранов из керамико-металлического материала TiC-ЖС6У подтвердили результаты лабораторных исследований. Осуществлено внедрение шарового крана из кермета TiC-ЖС6У в реальную эксплуатируемую задвижку и экономия от использования только одного шарового крана составляет 265 тыс.руб. (за счет повышения эксплуатационной надежности и снижения энергетических затрат привода).

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы:

1. Представленные в работе результаты по исследованию применения керметов на основе карбида титана являются перспективными для последующего изучения в сопряжениях с применением полимерных материалов.

2. Установленные результаты по повышению надежности применения керамико-металлических материалов открывают возможности по их использованию в широком классе тяжело нагруженных узлов трибосопряжений: пресс-формы для литья под давлением, пуансоны, матрицы, раскатные ролики для раскатки дисковых турбин, лопатки газотурбинных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абузин, Ю.А.** Функциональные металлические композиционные материалы и технологии в машиностроении / Ю.А. Абузин // Арматуростроение. – 2010. – № 6(69) – С. 52 – 54.
2. **Артемов, А.В.** Разработка и производство узлов запорной арматуры из технической керамики / А.В. Артемов // Арматуростроение. – 2012. – № 6(81). – С. 66 – 68.
3. **Ахметов, А.С.** Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахметов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. **Бакли, Д.** Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986. – 359 с.
5. **Батаев, А.А.** Композиционные материалы: строение, получение, применение : учебник. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 384 с.
6. **Беккерт, М.** Способы металлографического травления : справочное изд. / М. Беккерт, Х. Клемм ; пер. с нем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
7. **Беркович, И.И.** Трибология. Физические основы, механика и технические приложения : учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский ; под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
8. **Богданович, П.Н.** Трение и износ в машинах : учебник для технических вузов / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск : Высшая школа, 1999. – 374 с.
9. **Боуден, Ф.П.** Трение и смазка / Ф.П. Боуден ; пер. с англ. Ю.Н. Востропятого ; под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машгиз, 1960. – 151 с.
10. **Браун, Э.Д.** Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
11. **Бурков, П.В.** Структурообразование, фазовый состав и свойства композиционных материалов на основе карбида титана : учебное пособие /

- П.В. Бурков ; Юргинский технологический институт. – Томск: Томского политехнического университета, 2011. – 190 с.
12. **Бурыкина, А.Л.** К вопросу о механизме адгезионного взаимодействия металлов и металлоподобных соединений / А.Л. Бурыкина, П.В. Самсонов // Машиностроение. – 1970. – № 3. – С. 45–58.
 13. **Буше, Н.А.** Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
 14. **Буше, Н.А.** Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника : учебник для вузов / Н.А. Буше. – М.: Транспорт, 1987. – 223 с.
 15. **Буяновский, И.А.** Граничная смазка: этапы развития трибологии / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина. – М.: Нефть и газ, 2002. – 230 с.
 16. **Васильев, Ю.Н.** Структурно-энергетическая теория трения твердых тел / Ю.Н. Васильев, В.А. Фуголь // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 2. – С. 155–156.
 17. **Владимиров, В.И.** Проблемы физики трения и изнашивания / В.И. Владимиров // Трение, износ, смазка. – 2008 – Т. 10, № 2. – С. 7-31.
 18. **Власов, А.И.** Электронная микроскопия : учеб. пособие / А.И. Власов, К.А. Елсуков, И.А. Косолапов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 168 с.
 19. **Высокотемпературные карбиды** / Г.В. Самсонов, Т.Я. Косолапова и др. – Киев: Наукова думка, 1975. – 192 с.
 20. **Гаркунов, Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность) / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. – 616 с.
 21. **Гаркунов, Д.Н.** Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424с.
 22. **Гаршин, А.П.** Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семенов. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 348 с.
 23. **Гаршин, А.П.** Абразивные материалы / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Ю.В. Лагунов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 231 с.

24. **Гершман, И.С.** Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гершман, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 1. – С. 61–70.
25. **Гершман, И.С.** Синергетика процессов трения / И.С. Гершман // Трение, износ, смазка. – 2006. – Т. 8, № 4(29). – С. 71–80.
26. **Горячева, И.Г.** Контактные задачи в трибологии / И.Г. Горячева, М.Н. Добычин. – М.: Машиностроение, 1988. – 253 с.
27. **Горячева, И.Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
28. **ГОСТ 27674-88:** Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – М.: Госкомиздат, 1988. – 21 с.
29. **ГОСТ 356 – 80:** Арматура и детали трубопроводов. Давления условные, пробные и рабочие. – Взамен ГОСТ 356 – 68; введен 1981-01-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 21 с.
30. **ГОСТ 55509-2013:** Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Основные требования к выбору материалов – Введен 2014-02-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 70 с.
31. **Григорович, В.К.** Электронное строение и термодинамика сплавов железа / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1970. – 72 с.
32. **Гуревич, Д.Ф.** Трубопроводная арматура : справочное пособие / Д.Ф. Гуревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 268 с.
33. **Гуревич, Д.Ф.** Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. Расчет трубопроводной арматуры / Д.Ф. Гуревич. – 5-е изд. – М.: ЛКИ, 2008. – 480 с.
34. **Гутман, Э.М.** Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. – М.: Металлургия, 1974. – 230 с.
35. **Гутман, Э.М.** Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1981. – 270 с.
36. **Дейли, Дж.** Механика жидкости / Дж. Дейли, Д. Харлеман. – М.: Энергия, 1971. – 276 с.

37. **Дерягин, Б.В.** Что такое трение? / Б.В. Дерягин. – М.: Издательство Академии Наук СССР, 1963. – 230 с.
38. **Детали машин.** Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Т.IV – 1 / Д.Н. Решетов, А.П. Гусенков, Ю.Н. Дроздов и др., под общей ред. Д.Н. Решетова – М.: Машиностроение, 1995 г. – 864 с.
39. **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон ; пер. с англ. – М.: Мир, 1989 – 510 с.
40. **Доценко, А.И.** Основы триботехники : учебник / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. – М.: Инфра-М, 2014. – 335 с.
41. **Дроздов, Ю.Н.** Расчет коэффициента трения в тяжело нагруженном контакте при скольжении / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Арчegov // Машиноведение. – 1975. – № 6. – С. 81–83.
42. **Дроздов, Ю.Н.** Трение и износ в экстремальных условиях : справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
43. **Зозуля, В.Д.** Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, В.Л. Шведков. – Киев: Наукова думка, 1990. – 264 с.
44. **Кальнер, В.Д.** Практика микронных методов исследования металлов и сплавов / В.Д. Кальнер, А.Г. Зильберман. – М.: Металлургия, 1981. – 216 с.
45. **Камалетдинова, Р.Р.** Вопросы применения керметов на основе карбида титана в трубопроводной запорной арматуре / Р.Р. Камалетдинова, Рустам Ф.Мамлеев, Рафиль Ф.Мамлеев, С.В.Чертовских, Л.Ш.Шустер // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 2(11). – С. 3–6.
46. **Камалетдинова, Р.Р.** Исследование изнашивания металлокерамических материалов на основе карбида титана / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, С.В. Чертовских // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий : межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2015. – С. 109–113.
47. **Камалетдинова, Р.Р.** Проблемы создания и применения высокотемпературных композиционных износостойких материалов / Р.Р. Камалетдинова, Рустам Ф. Мамлеев, Рафиль Ф. Мамлеев, Л.Ш Шустер //

Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2015. – С. 151–154.

48. **Камалетдинова, Р.Р.** Триботехнические характеристики керметов на основе карбида титана в экстремальных условиях нагружения / Р.Р. Камалетдинова, Рустам Ф.Мамлеев, Рафиль Ф.Мамлеев, С.В.Чертовских, Л.Ш.Шустер // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 1. – С. 31–33.
49. **Кашеев, В.Н.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В.Н. Кашеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
50. **Кижнер, А.Х.** Ремонт трубопроводной арматуры электростанций : учеб. пособие для профессионального обучения рабочих на производстве / А.Х. Кижнер. – М.: Высшая школа, 1986. – 144 с.
51. **Кислый, П.С.** Керметы / П.С. Кислый, Н.И. Боднарук, М.С. Боровикова и др. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272 с.
52. **Коннова, Г.В.** Оборудование транспорта и хранения нефти и газа : учеб. пособие для вузов / Г.В. Коннова. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 128 с.
53. **Костецкий, Б.И.** Механико-химические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. – М.: Наука, 1972. – 170 с.
54. **Костецкий, Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев: Техника, 1970. – 395 с.
55. **Костецкий, Б.И.** Фундаментальные основы поверхностной прочности материалов при трении / Б.И. Костецкий. – Киев: Знание, 1980. – 26 с.
56. **Котелевский, Ю.М.** Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа : справочное пособие / Ю.М. Котелевский, Г.В. Мамонтов, Л.Н. Кисман и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 497 с.
57. **Крагельский, И.В.** Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
58. **Магалиф, В.Я.** Монтажное проектирование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств / В.Я. Магалиф, Д.М. Иткина, Л.Б. Корельштейн. – Москва, 2010. – 346 с.

59. **Мамлеев, Р.Ф.** Износостойкие керметы на основе карбида титана – материал для затворов трубопроводной арматуры и других высокоресурсных изделий / Р.Ф. Мамлеев // Арматуростроение. – 2014. – № 6(93). – С. 47–52.
60. **Мухин, В.С.** Методология созданий покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами и технологии их нанесения на лопатки компрессора ГТД / В.С. Мухин, В.В. Будилов, С.Р. Шехман // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 15, №5(50). – С. 149–153.
61. **Мухин, В.С.** Технология нанесения вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий Ti – TiN / В.С. Мухин, Р.М. Киреев, С.Р. Шехман // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 16, №4 (44). – С. 212–214.
62. **Новиков, В.Т.** Основы проектирования и оборудование предприятий органического синтеза : учебное пособие. Ч. 1. Трубопроводная арматура / В.Т. Новиков. – Томск: Томский политехнический ун-т, 2013. – 292 с.
63. Новые материалы / В.Н. Анциферов, Ф.Ф. Бездудный и др. ; под науч. ред. Ю.С. Каробасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
64. Основы трибологии (трение, износ и смазка) : учебник для техн. вузов / Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др. ; под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
65. **Пат. 2299788 Российская Федерация, В 22 F 3/26, В 22 F 5/10.** Способ изготовления сложнопрофильных твердосплавных изделий / А.А. Ганеев, Рус. Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет. - № 2005132764/02 ; заявл. 24.10.2005 ; опубл. 27.05.07. – Бюл. № 15. – 6 с. : ил. 2.
66. **Пат. 2401719 Российская Федерация, В 22 F 3/26, С 22 С 29/10.** Способ изготовления изделий из композита на основе карбида титана / Р.Ф. Мамлеев ; заявитель и патентообладатель Р.Ф. Мамлеев. – № 2008141985/02 ; заявл. 22.10.08 ; опубл. 27.04.10. – Бюл. № 29. – 11 с. : ил. 4.

67. **Пенкин, Н.С.** Основы трибологии и триботехники : учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2008. – 206 с.
68. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.И. Бершадский, Н.Б. Костецкая, В.А. Ляшко, М.Ф. Сагач ; под общей ред. Б.И. Костецкого. – Киев: Техніка, 1976. – 296 с.
69. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / под ред. Л.А. Хворостухина, С.В. Шишкина, А.П. Ковалева, Р.А. Ишмакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 141 с.
70. **Поздняков, В.А.** Структурные механизмы пластической деформации нанокристаллических материалов / В.А. Поздняков, А.М. Глезер // Физика твердого тела. – 2002. – № 4. – С. 705–709.
71. Практическая трибология. Мировой опыт / под ред. А.В. Чичинадзе. – Т. 1. – – М.: Наука и техника, 1994. – 247 с.
72. Практическая трибология. Мировой опыт / Под ред. А.В.Чичинадзе. – Т.2. – М.: Наука и техника, 1994. – С. 255 – 451.
73. **Пригожин, И.** Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин. – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 1960. – 127 с.
74. **Пригожин, И.** Современная термодинамика / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
75. **Пригожин, И.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. М. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
76. Проведение аналитических исследований на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV с интегрированным энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-АСТ. – Калининград, 2012. – 54 с.
77. **Регель, В.В.** Кинетическая природа прочности твердых тел / В.В. Регель, А.И. Слуцкая, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

78. **Самсонов, Г.В.** Электронная локализация в твердом теле / Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 339 с.
79. **Семёнов, А.П.** Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах / А.П. Семенов. – М.: Наука, 1972. – 160 с.
80. **Скороход, В.В.** Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений. – К.: Техніка, 1982. – 167 с.
81. **Смыслов, А.М.** Нанослойное покрытие для лопаток турбомашин из титановых сплавов / А.М. Смыслов, А.Д. Мингажев, М.К. Смыслова, К.С. Селиванов, А.А. Мингажева // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, №1(41). – С. 109–112.
82. **Сорокин, Г.М.** Основы механического изнашивания сталей и сплавов : учебное пособие / Г.М. Сорокин, В.Н. Молышев. – М.: Логос, 2014. – 308 с.
83. Справочник по композиционным материалам. В 2-х кн. Кн.2 / под ред. Дж. Любина, Б.Э. Геллера ; пер. с англ. А.Б. Геллера и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.
84. **Справочник по триботехнике** / под ред. М.Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, Варшава ВКЛ, 1989. – Т. 1. – 400 с.
85. **Тавастшерна, Р.И.** Изготовление и монтаж технологических трубопроводов : учебное пособие для проф.-техн. училищ индивидуального и бригадного обучения рабочих на производстве / Р.И. Тавастшерна. – М.: Высшая школа, 1967. – 282 с.
86. **Тененбаум, М.М.** Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
87. Трение, изнашивание и смазка : справочник. В 2-х кн. Кн. 2 / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
88. **Тучинский, Л.И.** Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л.И. Тучинский. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
89. Физико-химическая механика сцепления / под ред. И.П. Исаева. – М.: МИИЖДТ, 1973. – 183 с.

90. **Фролов, К.В.** Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения / К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
91. **Фукс, И.Г.** Введение в трибологию / И.Г. Фукс, И.А. Буяновский. – М.: Нефть и газ, 1995. – 278 с.
92. **Химушин, Ф.Ф.** Жаропрочные стали и сплавы / Ф.Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969. – 749 с.
93. **Хрущев, М.М.** Исследование изнашивания металлов / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. – М.: Наука, 1960. – 352 с.
94. **Черноштан, В.И.** Трубопроводная арматура ТЭС : справочное пособие / В.И. Черноштан, В.А. Кузнецов. – М.: МЭИ, 2001. – 368 с.
95. **Шпаков, О.Н.** Диагностирование – важнейшее направление повышения конкурентоспособности приводов для арматуры / О.Н. Шпаков // Арматуростроение – 2005 – № 3(35) – С. 50–52.
96. **Шустер, Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л.Ш. Шустер. – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.
97. **Шустер, Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.
98. **Шустер, Л.Ш.** Покрyтия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л.Ш. Шустер, Н.К. Криони, В.Ю. Шолом, М.Ш. Мигранов. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.
99. Adaptive nanocomposite coating with a titanium nitride diffusion barrier mask for high-temperature tribological application / C. Muratore, J.J. Hu, A.A. Voevodin // Thin Solid Films– 2007 – Vol. 515. – PP. 3638-3643.
100. Adhesive wear behaviour of carbide composites and tool steels / H. Annuka, H. Klaasen, J. Kübarsepp, V. Suvi // Industrial engineering – innovation as competitive edge for SME : 4th International DAAAM conference. Tallinn, 2004 – PP. 167–168.
101. Behaviour of TiC-base cermets in different wear conditions / Jakob Kübarsepp*, Heinrich Klaasen, Jüri Pirso // Wear – 2001. – Vol. 249 – PP. 229–234.

102. Characterization of TiC-FeCrMn cermets produced by powder metallurgy method / Märt Kolnes, Jakob Kübarsepp, Lauri Kollo, Mart Viljus // Materials science (Medžiagotyra). – 2015. – Vol. 21, № 3. – PP. 353–357.
103. Engineering tribology / G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor – ELSEVIER, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1993. – 910 p.
104. Friction and dry sliding wear behavior of cermets / Juri Pirso, Mart Vijus, Sergei Letunovits // Wear – 2006. – Vol. 260 – PP. 815–824.
105. Microstructure and erosive wear in ceramic based composites / Irina Hussainova // Wear – 2005. – Vol. 258 – PP. 357–365.
106. **Shuster, L.Sh.** Self-Organization During Friction. Advanced Surface-Engineered Materials and Systems Design / Shuster, L.Sh. ; edited by German S. Fox-Rabinovich, George E. Totten. – Taylor & Francis, 2006. – 458 p.
107. Study on tribology, microstructure and mechanical properties of metal matrix composites – a review and advanced applications / S. Prabakaran, G. Chandramohan, P. Shanmugasundaram // Engineering. – 2014. – Vol. 3, Issue 3, № 2277-8179. – PP. 106–109.
108. The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings / Frederik Svahn, Asa Kassman-Rudolphi, Erik Wallen // Wear – 2003. – Vol. 254 – PP. 1092–1098.
109. The sliding wear of TiC and Ti(C,N) cermets prepared with a stoichiometric Ni₃Al binder / Tyler L. Stewart, Kevin P. Plucknett // Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science. 2014. – PP. 54–93.
110. Tribological and micro/nano-structural characterization of some Fe-based sintered composites/ Violeta Merie, Marius Pustan, Corina Bîrleanu, Viorel Cîndea and Cătălin Popa // International Journal of Materials Research. 2014. – Vol. 105, No. 8. – PP. 786–792.
111. Tribological properties of hybrid composites containing two carbide phases / A. Dolata – Grosz, J. Wiecek // Archives of materials science and engineering. – 2007. – Vol. 28, Issue. 3. – PP. 149–155.

112. Tribology of ceramics and composites: a materials science perspective / Bikramjit Basu, Mutjan Kalin. – Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey – 522 p.
113. Two-body dry abrasive wear of cermets / J. Pirsoa, M. Viljusb, K. Juhania, S. Letunovit˘ // Wear – 2009. – Vol. 266 – PP. 21–29.
114. Ways of deteriorating the balls with structural gradient from the valves used in the oil extraction industry / Ionel Popescu, Radu Mihai Negriu, Sorin George Badea, Cristinel Besleaga, Mihai Stefanescu // Structural integrity and life Wear – 2013. – Vol. 13, № 1 – PP. 17–22.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник топливного производства
Филиала АНК «Башнефть»
«Башнефть-УНПЗ»

Жигалов С.П.

2015г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам производственных испытаний шаровых кранов КШТ-50*2,5-600
В филиале АНК «Башнефть» «Башнефть-УНПЗ» (г. Уфа)

Изготовитель шаровых кранов – ООО «МАРОМА Технологии» (г. Уфа).

На испытания были представлены:

1. Шаровые краны DN50, PN25, кол-во 2 шт., заводские номера 1 и 3.
2. Сопроводительная документация на шаровые краны:
 - паспорт КШТ-50*2,5-600.000 ПС;
 - руководство по эксплуатации КШТ-50*2,5-600.000 РЭ;
 - сертификат соответствия №С-RU.АЯ36.В.02809.

Место монтажа шаровых кранов – установка ЭЛОУ-АВТ-6.

Начало испытаний - 01.11.2012г, конец испытаний - 10.08.2015г.

Условия испытаний:

- рабочая среда – нефть, содержание абразивных частиц (Al_2O_3 , SiO_2 и т.д.) до 5 %;
- температура 350-400 °С;
- давление 16...20 кгс/см².

Через каждые 10 дней шаровые краны контролировались на герметичность, наличие течей и падения давления в системе.

Число выполненных циклов «открыто-закрыто» - 6450.

При испытаниях нарушение герметичности, наличие течей не обнаружены.

После проведения производственных испытаний шаровые краны были сняты с установки, разобраны и проведен визуальный контроль затворного узла – шаровой пробки седел.

Повреждения сопрягаемых рабочих поверхностей (деформации, задиры, сколы и т.д.) не обнаружены.

Заключение:

1. Шаровые краны выдержали производственные испытания на установке ЭЛОУ-АВТ-6 продолжительностью 32 месяца без замечаний:
 - течи на шаровом затворе не появились, герметичность затвора не нарушена;
 - технические характеристики соответствуют паспортным данным.
2. Решено повторно смонтировать шаровые краны на установке ЭЛОУ-АВТ-6 для продолжения эксплуатации в режиме испытаний.
3. Шаровые краны ООО «МАРОМА Технологии» показали высокую эффективность и рекомендуются для замены используемых в настоящее время задвижек и запорных клапанов при температурах эксплуатации до 400 °С.

Руководитель сектора технического отдела

по производственной площадке «Башнефть УНПЗ»

Качкаев В.В.

Начальник установки ЭЛОУ-АВТ-6

Ганиев И.Х.

ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От характеристик запорной арматуры, эксплуатирующейся в абразивных, химически активных и высокотемпературных средах во многом зависит эффективность технологических процессов и себестоимость выпускаемой продукции. Для обеспечения высокого ресурса материалы затворных узлов, используемых в указанных условиях, должны отвечать следующим основным требованиям:

- высокая механическая прочность, твердость и износостойкость элементов затвора во всем объеме изделия;
- высокая стойкость против термических и механических ударов;
- высокая коррозионная стойкость.

По комплексу свойств новые керамико-металлические материалы (керметы) на основе карбида титана, разработанные ООО «МАРОМА Технологии», наиболее полно удовлетворяют указанным требованиям. Образцы шаровых кранов DN50 с затворами из керметов успешно прошли стендовые и производственные испытания (заклучения представлены).

Преимущества шаровых кранов с затворами из керметов по сравнению с задвижками и запорными клапанами:

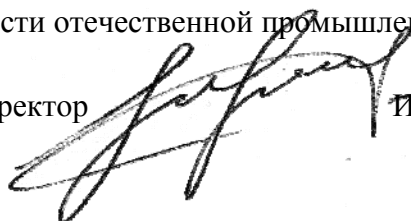
1. В энергетике и перерабатывающих отраслях промышленности, использующих большое количество трубопроводной арматуры, около 50% потребляемой электроэнергии затрачивается на преодоление гидравлического сопротивления при перекачке технологических сред. При этом в шаровых кранах, в отличие от запорных клапанов, практически отсутствует гидравлическое сопротивление в полностью открытом состоянии, что позволяет значительно снизить затраты на перекачку сред и себестоимость выпускаемой продукции.
2. Высокий ресурс, обеспечивающий снижение производственных издержек на ремонтные работы (в т.ч. и на замену арматуры) и потерь от простоев.
3. Возможность мгновенного перекрытия затвора и снижение риска чрезвычайных происшествий, что особенно актуально в пожаро- и взрывоопасных производствах.
4. Позволяют за счет герметичности снизить течи через уплотнения, повысить культуру производства и снизить вредные выбросы в окружающую среду.
5. Компактность и снижение материалоемкости запорной арматуры, затрат на ее транспортировку.

Керметы апробированы также в затворах задвижек и запорных клапанов (заклучения представлены).

Технология универсальна и позволяет изготавливать другие изделия из труднообрабатываемых керметов с минимальными припусками на механообработку, например, рабочие колеса центробежных насосов, лопатки паровых турбин и т.д.

Новое для России производство позволит не только заменить дорогостоящие импортные аналоги за счет значительного удешевления при сопоставимом качестве, но и дополнительно загрузить мощности отечественной промышленности.

Исполнительный директор



И.Т. Тер-Матеосянц