

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Российский государственный университет
нефти и газа имени И. М. Губкина**

На правах рукописи

УДК 621.891: 621.822

Пичугин Сергей Дмитриевич

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРЫ МЕДНЫЙ СПЛАВ-СТАЛЬ В СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д. т. н., профессор Малышев В.Н.

Москва 2015 год

Содержание

Введение.....	5
Цель исследования.....	6
Задачи исследования.....	6
Методы исследования.....	6
Научная новизна.....	7
Практическая ценность.....	8
Апробация работы.....	9
1 Современные представления о механизме избирательного переноса при трении.....	10
1.1 Роль смазочных материалов в процессе формирования медьсодержащих пленок на поверхностях трения пары медный сплав – сталь.....	10
1.2 Факторы, влияющие на реализацию избирательного переноса в узлах трения.....	13
1.3 Особенности взаимодействия пары медный сплав – сталь в глицерине при трении.....	16
2 Методика исследования процессов трения и изнашивания пары медный сплав – сталь в смазочных материалах.....	26
2.1 Выбор схемы и установки для лабораторных исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь.....	26
2.2 Выбор материалов и смазочных сред для исследования триботехнических характеристик подвижных сопряжений.....	31
2.3 Обоснование выбора режимных параметров испытаний пары медный сплав – сталь.....	32
2.4 Последовательность подготовки и проведения экспериментальных исследований на машине трения СМЦ-2.....	34
2.5 Методы изучения механо-физико-химических процессов при	35

взаимодействии пары медный сплав – сталь.....

3	Исследование процессов трения и изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь в смазочных материалах.....	39
3.1	Изменение коэффициента трения пары медный сплав-сталь от пути трения.....	39
3.2	Влияние смазочных материалов на износостойкость подвижных сопряжений.....	41
3.3.	Влияние химического состава антифрикционного сплава на триботехнические характеристики пары колодка-ролик.....	43
3.4	Математическая модель взаимодействия пары трения медный сплав – сталь в смазочной среде.....	46
4	Изучение процессов взаимодействия триады трения.....	51
4.1	Влияние пути трения пары антифрикционный сплав-сталь на изменение микрогеометрии поверхностного слоя трибосопряжений... ..	51
4.2	Рентгеноспектральные исследования зоны трения пары медный сплав-сталь.....	57
4.3	Послойные рентгенофотоэлектронные и Оже-спектральные исследования поверхностного слоя пары медный сплав-сталь изношенных в глицерине.....	85
4.4	Исследование дисперсного состава частиц продуктов изнашивания пары медный сплав-сталь.....	136
4.5	Спектральный анализ качественного и количественного содержания элементов в продуктах изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине	139
4.6	ИК – спектральные исследования металлосодержащей пленки на стальном образце.....	141
5	Механо-физико-химические процессы при взаимодействии пары	145

медный сплав – сталь в глицерине.....	
5.1 Особенности взаимодействия триады трения в условиях эффекта безызносности.....	145
5.2 Разработка практических рекомендаций по составу смазочных материалов, обеспечивающих образование высокомолекулярных металлосодержащих пленок на поверхностях трения подвижных сопряжений.....	155
5.2.1 Разработка состава антифрикционной присадки к смазочным материалам	158
5.3 Исследование процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений в разработанных смазочных материалах.....	160
Выводы.....	163
Список литературы.....	164
Приложение к главе 4.....	174
Приложение А	198
Приложение Б	199

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения износостойкости подвижных сопряжений машин и оборудования, снижения расходов на их эксплуатацию является важной технической задачей. Большая часть этих затрат обусловлена преждевременным выходом узлов трения из строя в результате изнашивания.

Одним из направлений увеличения срока службы трибосопряжений машин и оборудования является использование достижений триботехники на основе эффекта безызносности. Изнашивание пары медный сплав-сталь в глицерине или спиртоглицериновой среде ведет к образованию на поверхностях трения защитной пленки особой структуры и свойств, которая обеспечивает низкий коэффициент трения и высокую износостойкость подвижных сопряжений.

Большой вклад в изучение механизма эффекта безызносности внесли отечественные ученые Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А., Поляков С.А., Симаков Ю.С., Михин Н.М., Рыбакова Л.М., Кужаров А.С., Куксенова Л.И., Прокопенко А.К., Пичугин В.Ф., Балабанов В.И., Бурлакова В.Э. и др.

Избирательному переносу посвящено значительное число работ, однако единого подхода к процессам, обеспечивающим формирование на поверхностях трения антифрикционной и противоизносной пленки, до настоящего времени не существует, что связано с трудностями экспериментального исследования взаимодействия подвижных сопряжений непосредственно в процессе трения.

Дальнейшее создание и внедрение новых смазочных материалов, разработка технологических процессов и конструкций трибосопряжений на основе эффекта безызносности связано с изучением процессов, протекающих как на поверхностях трения пары медный сплав-сталь, так и в смазочном материале.

Цель исследования.

Целью работы является установление закономерностей формирования структуры и свойств металлсодержащей пленки в приповерхностном микрообъеме при контактном взаимодействии пары медный сплав-сталь в поверхностно-активных смазочных материалах.

Задачи исследования.

1. Выполнение экспериментальных исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в зависимости от выбранного пути трения.
2. Исследование изменений характеристик микрогеометрии поверхностных слоев подвижных сопряжений.
3. Проведение рентгеноспектральных и послойных рентгенофотоэлектронных исследований элементного состава, строения и толщины защитных пленок на поверхностях трения трибосопряжений.
4. Изучение элементного состава и содержания продуктов изнашивания в смазочных материалах, размеров частиц методом атомно-эмиссионной спектроскопии, с привлечением лазерного анализатора.
5. ИК-спектральные исследования медьсодержащей пленки.
6. Разработка практических рекомендаций по составу смазочных материалов, обеспечивающих низкие триботехнические характеристики подвижных сопряжений.

Методы исследований.

Исследование процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь выполнялись на модернизированной машине трения СМЦ-2 по схеме вал – колодка (частичный вкладыш). Изменение характеристик микрогеометрии поверхностных слоев трибосопряжений изучали с использованием профилографа-профилометра завода «Калибр».

Изучение элементного состава, строения и толщин металлсодержащих пленок на поверхностях трения подвижных сопряжений выполнялось с привлечением методов рентгеноспектрального анализа и рентгенофотоэлектронной и Оже-спектральной спектроскопии путем послойного анализа.

Исследование состава и содержания продуктов изнашивания в смазочных материалах проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии, а размера частиц с использованием лазерного анализатора.

Изучение состава и структуры металлсодержащей пленки проводилось с привлечением ИК-спектроскопии.

Научная новизна.

1. Установлено, что процесс образования металлсодержащей пленки в приповерхностном микрообъеме пары антифрикционный сплав-сталь в среде глицерина сопровождается микросхватыванием поверхностного слоя медного сплава, его механическим, абразивным и коррозионно-механическим изнашиванием.
2. Проведенными рентгеноспектральными, рентгенофотоэлектронными, а также ИК-спектральными исследованиями подтверждено наличие диффузионного макроскопического потока цинка на пути трения 700 м пары медный сплав-сталь в глицерине, а также присутствие на поверхностях трения подвижных сопряжений высокомолекулярной пленки, содержащей медь и цинк.
3. Экспериментально показана возможность формирования металлсодержащих защитных пленок и реализация условий избирательного переноса при контактном взаимодействии со сталью медных сплавов в условиях образования стехиометрических составов с интерметаллическими связями.
4. Выявлена структура металлсодержащей пленки, которая представлена композиционным материалом толщиной порядка 0,6 мкм, состоящим из оксидных соединений, медной и высокомолекулярной пленок, которые

взаимосвязано образуются на поверхностях трения трибосопряжения медный сплав-сталь.

Практическая значимость.

1. Экспериментально обосновано повышение износостойкости подвижных сопряжений машин и оборудования за счет образования на поверхностях трения композиционных металлоорганических защитных пленок.
2. Показано, что при контактном взаимодействии со сталью в поверхностно-активных смазочных материалах двухфазных антифрикционных сплавов на поверхностях трения подвижных сопряжений формируются металлосодержащие защитные пленки.
3. Сформулированы практические рекомендации по составу смазочных материалов, реализующих явление избирательного переноса, которые используются для повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосопряжений на Опытном заводе смазок и оборудования (г. Уфа) и в ООО «Рабика – энергосбережение» (г. Набережные Челны).

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация выполнена в соответствии с требованиями паспорта научной специальности 05.02.04- «Трение и износ в машинах» в пунктах: 2. Механика контактного взаимодействия при трении скольжения, трении качения и качения с проскальзыванием с учетом качества поверхностного слоя. 4. Смазочное действие: гидро – и газодинамическая смазка, гидро – и газостатическая смазка, эластогидродинамическая смазка, граничная смазка. 7. Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоев.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации прошли апробацию в виде выступлений автора на международных научно-технических конференциях и совещаниях,

в частности: на 66-ой международной молодежной научной конференции, М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2012, 68-ой международной научной конференции М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2014, Юбилейной 10-ой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности». М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013, Международной научно-технической конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения». М.: ИМАШ им. А.А. Благоднарова, 2013, 3-ей Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М.: ИМАШ им. А. А. Благоднарова, 2014, 10-ой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Трибология – машиностроению». М.: ИМАШ им. А. А. Благоднарова, 2014.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ТРЕНИИ.

1.1 Роль смазочных материалов в процессе формирования медьсодержащих пленок в паре медный сплав-сталь.

На формирование медной пленки на поверхностях трения пары антифрикционной сплав-сталь оказывают влияние различные факторы, однако, на реализацию эффекта избирательного переноса в значительной степени влияет природа смазочного материала. Меняя состав смазочной среды, мы меняем параметры трения [7].

Классическая жидкость – глицерин, которая используется, в основном, для исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в лабораторных условиях, применяется в реальных подвижных сопряжениях крайне редко.

С целью реализации избирательного переноса в паре медный сплав-сталь в работе [56] были выполнены исследования по влиянию углеводородных масел изопарафиновой и ароматической природы, а также сложных эфиров и их комбинаций. Эксперименты показали, что синтетические углеводородные масла не обеспечивают формирование медной пленки на поверхностях трения пары антифрикционный сплав-сталь. Авторы работы [56] отмечают, что эффект избирательного переноса наблюдается при использовании в качестве смазочных материалов сложных эфиров и спиртов. Для возбуждения эффекта безызносности в работе [2] использованы эфиры органических кислот. При изнашивании пары медный сплав-сталь в эфирах масляной кислоты на поверхностях трения имела медная пленка, но коэффициент трения имел высокие значения, которые не характерны для условий избирательного переноса.

Медьсодержащая пленка образуется на поверхностях трения пары медный сплав-сталь при использовании в качестве смазочных материалов многоатомных спиртов и сложных эфиров [3, 28, 89, 63]. Эти органические

соединения не являются товарными маслами и крайне редко используются в качестве присадок к смазочным материалам. В то же время выявление промышленных смазочных материалов, обеспечивающих избирательный перенос в паре медный сплав-сталь, представляет определенный интерес.

На основании экспериментальных исследований было установлено, что при изнашивании пары медный сплав-сталь с использованием эфиров пентаэритрита с увеличением длины алкильного радикала наблюдалось повышение эффективности сложноэфирных смазочных масел [11]. Эти результаты хорошо согласуются с классическими представлениями о смазочной способности этих товарных масел в условиях трения при граничной смазке.

Выполнены лабораторные исследования по влиянию промышленно производимой присадки «Хлорэф-40» (дибутиловый эфир трихлорметилфосфоновой кислоты) на процессы трения и изнашивания пары медный сплав-сталь. Установлено, что введение «Хлорэф-40» в минеральное масло не только обеспечивает формирование медной пленки на поверхностях трения, но и приводит к значительному снижению величин коэффициента трения и интенсивности изнашивания пары медный сплав-сталь по сравнению с работой узла трения в базовом смазочном материале. Показано, что триботехнические характеристики трибосопряжений, работающих в масле с присадкой «Хлорэф-40», превосходят аналогичные показатели пары медный сплав-сталь в глицерине [9]. В настоящее время высокоэффективная присадка не производится.

В работе [67] по изучению процессов трения и изнашивания медных сплавов со стальными образцами показано, что многоатомные спирты по эффективности триботехнических характеристик можно расположить в следующий ряд: этиленгликоль <глицерин <ксилотан (пятиатомный спирт).

Установлен факт образования медьсодержащей пленки на поверхностях трения пары медный сплав-сталь при изнашивании в средах, содержащих простые и сложные эфиры, альдегиды и комплексообразующие

органические соединения. При реализации избирательного переноса большую роль играют поверхностно-активные свойства органических соединений с оптимальной длиной цепи радикала 8-16 атомов углерода [96].

Так как процессы комплексообразования и хемосорбции на поверхностях трения пары медный сплав-сталь с последующим образованием защитной пленки более эффективно протекают на ювенильных поверхностях, то разрабатываемые для реализации эффекта избирательного переноса присадки должны обладать окислительно-восстановительными свойствами.

Выполнены ИК-спектральные исследования смазочных материалов с различными физико-химическими свойствами, которые обеспечивают формирование медьсодержащей пленки на поверхностях пары медный сплав-сталь. Показано, что предложенные соединения (глицерин, «Хлорэф-40», АМГ-10, олеиновая кислота (приводящая в процессе хранения к образованию окиссоединений [13]) и т.д.) не содержат одинаковых функциональных группировок в молекулах органических соединений. Большое влияние на процессы трения и изнашивания пары медный сплав-сталь оказывает химическая чистота органических соединений. На основании выполненных ИК-спектральных исследований ряда органических соединений и товарных продуктов показано, что массоперенос в паре медный сплав-сталь могут обеспечивать многоатомные спирты, карбоновые кислоты, простые и сложные эфиры, а также нефтяные углеводороды [12].

В технической литературе также имеются сведения о том, что при изнашивании пары медный сплав-сталь смазочный материал должен обеспечить протекание ионных процессов, которые, по-видимому, являются основой для образования антифрикционной и противоизносной пленки на поверхностях трения подвижных сопряжений [97].

1.2 Факторы, влияющие на реализацию избирательного переноса в узлах трения

Наряду с определяющим влиянием свойств смазочного материала на триботехнические характеристики пары медный сплав-сталь, большое значение имеют факторы, которые можно отнести к технологическим, конструкционным и нагрузочно-скоростным.

Технологические факторы характеризуются микрогеометрией как стальной детали, так и детали из медного сплава [85, 92]. К конструкционным факторам относятся геометрия подвижных сопряжений, кинематика движения, химический состав медного сплава, а также положение образцов в паре трения.

Исходная шероховатость контактирующих материалов оказывает существенное влияние на характеристики процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь. В реальных узлах трения поверхностный слой как стального образца, так и медного сплава имеет определенную шероховатость после технологической обработки. В работе [54] выполнены экспериментальные исследования по определению оптимальной величины исходной шероховатости стального образца, как истирающего элемента. Образцы из медных сплавов имели величину среднего арифметического отклонения неровностей профиля от средней линии $R_a = 0,32-0,16$ мкм, а исходная шероховатость стальных образцов изменялась в диапазоне R_a от 2,5 до 0,02 мкм. Авторами исследований установлено, что при исходной шероховатости стального образца с параметрами $R_a = 0,32-0,16$ мкм достигаются оптимальные условия для реализации режима избирательного переноса в паре медный сплав - сталь в глицерине. Кроме того, показано, что в возникновении избирательного переноса существенную роль играет многократное деформирование поверхностного слоя образца из медного сплава более жесткими микронеровностями стального образца, а сформировавшаяся на поверхностях трения медная пленка при изнашивании

в глицерине не является необходимым и достаточным условием получения аномально низких значений коэффициента трения [54].

Проведены эксперименты по влиянию скорости скольжения на реализацию избирательного переноса в паре медный сплав-сталь в глицерине в диапазоне скоростей от $3,3 \cdot 10^{-4}$ до 10 м/с на различных типах испытательных машин [54]. В зависимости от скорости скольжения коэффициент трения в паре медный сплав-сталь существенно изменяется. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения характеризовалась тремя зонами. В первой зоне, при скорости скольжения до 0,1 м/с отмечалось снижение величины коэффициента трения, а во второй – при скорости до 2 м/с коэффициент трения в установившемся режиме практически не зависит от скорости скольжения. При увеличении скорости скольжения более 2 м/с отмечается резкое повышение коэффициента трения и возрастание температуры поверхностей трения. Увеличение коэффициента трения с повышением скорости скольжения обусловлено изменением характера взаимодействия контактирующих тел и влиянием кислорода из окружающей среды [10].

Наряду со скоростью скольжения большое влияние на работоспособность пары медный сплав-сталь оказывает удельное давление. Испытания выполнялись на машине трения МИ-1, а в качестве смазочных материалов были приняты гидравлическая жидкость АМГ-10 и пластичная смазка ЦИАТИМ-201, которые обеспечивают образование медной пленки на поверхностях трения пары медный сплав-сталь. Установлено [38], что сформировавшаяся на поверхностях трения медьсодержащая пленка обеспечивает нормальную работу трибосопряжений до удельных давлений порядка 30 МПа. Дальнейшее увеличение удельного давления ведет к резкому возрастанию коэффициента трения в паре бронза-сталь.

В работе [65] были выполнены эксперименты по влиянию многоатомных спиртов на образование медной пленки в паре медный сплав-сталь на 4-х шариковой машине трения в режиме скольжения. С этой целью

были изготовлены шары диаметром 12,7 мм из бериллиевой бронзы Бр.Б-2, которая обеспечивает необходимые механические свойства. Эксперименты показали, что независимо от расположения бронзовых шаров (нижние, верхний) с шарами из долотной стали 55СМ5ФА на поверхностях трения формируется медьсодержащая пленка, которая визуально видна в зоне трения стальных шаров после работы узла трения в течение 1-2 минут. Если в условиях точечного контакта в паре медный сплав-сталь в режиме трения скольжения имеет место образование медьсодержащей пленки, то в режиме трения качения в среде многоатомных спиртов она не формируется.

Изучение влияния кинематических и геометрических параметров на реализацию избирательного переноса при трении выполнялось на различных машинах трения. Курлов О.Н. [51] предложил классифицировать трибосопряжения по характеру трения: качение, одностороннее скольжение (прерывистое, непрерывное) и реверсивное скольжение. По его мнению, в режиме качения избирательный перенос практически не возможен. При одностороннем скольжении избирательный перенос неустойчив в условиях эксплуатации, а при реверсивном скольжении легко возбудим и работоспособен.

Схема работы пары медный сплав-сталь (прямая или обратная) существенно влияет на триботехнические характеристики трибосопряжений. Избирательный перенос в парах трения бронза-сталь проявляется только в обратных парах, так как в прямых парах медная пленка изнашивается микронеровностями поверхностного слоя стального образца. При работе подвижных сопряжений, состоящих из медных сплавов, избирательный перенос возникает в разноименных прямых парах (контртело из оловянистой бронзы, образец – из безоловянистой) [50].

Большое влияние на проявление эффекта избирательного переноса оказывает химический состав антифрикционного сплава при изнашивании в паре со стальным образцом в глицерине и других смазочных материалах, обеспечивающих образование на поверхностях трения медьсодержащей

пленки. Выполненные исследования по влиянию химического состава медного сплава (М1, Л-63, БрАЖ9-4) показали, что чем меньше число легирующих элементов в медном сплаве, тем эффективнее процесс избирательного переноса в сложноэфирных маслах [11]. При испытании образца М1-сталь эффект безызносности не появлялся. Однако, при работе трибосистемы М1-глицерин-сталь на поверхностях трения медьсодержащая пленка формируется [42].

При работе подвижных сопряжений в условиях избирательного переноса необходимо учитывать возможность образования на поверхностях трения пары медный сплав-сталь антифрикционной пленки в смазочном материале, содержащем абразивные частицы. Считается, что в начальный период взаимодействия пары медный сплав-сталь в глицерине абразивные частицы способствуют формированию микрорельефа поверхностного слоя с однородными по размерам и форме микронеровностями, чем обеспечивается малая величина коэффициента трения [5]. Показано, что при содержании 1% абразивных частиц размером до 3 мкм в гидравлической жидкости АМГ-10 коэффициент трения пары БрОЦС5-5-5 - сталь 40Х был ниже, чем в базовом смазочном материале. Увеличение зернистости и содержания абразивных частиц в смазочном материале ведет к резкому повышению температуры в зоне трения и схватыванию поверхностей при незначительных удельных нагрузках.

1.3 Особенности взаимодействия пары медный сплав-сталь в глицерине при трении

Трение в условиях граничной смазки и изнашивание трибосопряжений являются процессами механического и физико-химического взаимодействия контактирующих поверхностей твердых тел и смазочного материала. Окружающая среда оказывает самое существенное влияние на процессы деформации и разрушения поверхностных слоев при трении. В свою очередь, эти процессы вызывают активацию поверхностных слоев твердых тел и

смазочного материала, определяющую их физико-химическое взаимодействие и химические превращения.

В результате исследований, проведенных в области физикохимии контактных взаимодействий, Гаркуновым Д.Н. и Крагельским И.В. обнаружено явление избирательного переноса при трении. Сущность его состоит в том, что при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, исключающей окисление меди, происходит явление избирательного переноса меди из твердого раствора медного сплава на сталь и обратного ее переноса со стали на медный сплав, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения до жидкостного и приводящее к значительному снижению износа пары трения [33].

Симаковым Ю.С. была предпринята попытка рассмотреть механизм избирательного переноса с позиций физико-химической механики и механохимии [87]. Установлено, что в начальный период взаимодействия пары латунь-сталь в глицерине имеется свободная медь, следы железа и цинка. Кроме того, обнаружены ионы железа, цинка и меди. В дальнейшем в процессе работы наблюдалось исчезновение свободного железа и цинка, а также ионов меди и железа. Химические превращения глицерина на фрикционном контакте приводят к образованию как низкомолекулярных, так и высокомолекулярных соединений. Из низкомолекулярных соединений идентифицированы практически все классы органических соединений: спирты, альдегиды, кетоны и карбоновые кислоты, как предельные, так и с двойными связями. Высокомолекулярные соединения, видимо, образуются в результате механо- и термоокислительных процессов. Методом электронной микроскопии Симаковым Ю.С. было установлено, что размер частиц меди соответствует коллоидной дисперсности, а методом электрофореза показано, что мицеллы несут отрицательный заряд.

Симаковым Ю.Н. на основании проведенных исследований механизм безызносности при трении объясняется возникающей разностью потенциалов. При изнашивании пары медный сплав-сталь происходит

направленное движение заряженных мицелл к положительно заряженному металлу, на поверхности которого они разрушаются с выделением свободной меди, вблизи этой поверхности возникает квазиожиженный слой, представляющий собой высококонцентрированную суспензию меди в глицерине. При установившемся режиме разность потенциалов практически равна нулю, а процесс мицеллообразования находится в динамическом равновесии с разрушением [87].

Авторы работы [19] отмечают, что процесс избирательного переноса в паре медный сплав-сталь в глицерине характеризуется процессами, связанными с эффектами избирательного растворения (коррозионный), Ребиндера П.А. (адсорбционный) и Киркендала (диффузионный). Интенсивность протекания механо-физико-химических процессов определяется характером напряженного состояния и свойствами смазочного материала при взаимодействии пары антифрикционный сплав-сталь.

В начальный период работы пары медный сплав-сталь, - в результате многократного деформирования, проявления эффекта адсорбционного понижения прочности, а также электрохимических процессов, - имеет место адсорбционно-коррозионно-усталостное изнашивание поверхностного слоя антифрикционного сплава и образование частиц коллоидной дисперсности в глицерине [58].

В работе [99] рассмотрены основные особенности процесса избирательного переноса в паре медный сплав-сталь. Автор считает, что при трении глицерин восстанавливает окись меди до меди, создается условие безокислительного трения в паре антифрикционный сплав-сталь. Благодаря электрохимическому действию глицерина поверхность медного сплава подвергается избирательному растворению. Причем по сравнению с легирующими элементами антифрикционного сплава медь обладает минимальной растворимостью. На поверхности антифрикционного сплава образуются участки рыхлого тонкого слоя меди. Некоторые наклепанные, сильно деформированные участки медного сплава, сформировавшиеся на

бронзе под действием нагрузки и глицерина, будут диспергировать. В зазоре пары трения появляются тонкодисперсные частицы меди, образующие с глицерином коллоидный раствор.

Электрохимические реакции восстановления ускоряются благодаря трибохимическим процессам, способствующим в то же время полимеризации распадающихся молекул глицерина. На поверхностях трения образуется пленка меди с особыми свойствами. Малое сопротивление сдвигу материала пленки является следствием реализации диффузионно-вакансионного механизма формоизменения поверхностных слоев при работе пары медный сплав-сталь в глицерине.

Важные исследования по изучению механизма избирательного переноса были выполнены с привлечением метода скользящего пучка рентгеновских лучей [47,80], которые показали, что основной процесс структурных изменений локализуется в поверхностных слоях антифрикционного сплава. В процессе взаимодействия пары медный сплав-сталь в глицерине происходит обеднение поверхностных слоев антифрикционного сплава легирующими элементами [41,75], формирование на поверхности сплава новой металлической фазы с границей раздела с основным металлом. Образовавшаяся в процессе трения новая фаза имеет толщину порядка 1,0 мкм, а медь практически не содержит дислокационных дефектов. Наличие на поверхностях трения подвижных сопряжений мягкой пленки, лежащей на упрочненной подложке, обеспечивает локализацию процесса трения в тончайшем поверхностном слое и препятствует вовлечению в процесс деформации более глубоких слоев металла [81, 82]. Избирательный перенос можно реализовать в паре медный сплав-сталь только при сочетании определенных материалов, смазки и нагрузочно-скоростных факторов.

В технической литературе имеются сведения о том, что механизм безызносности может быть связан с образованием координационных соединений [13] на поверхностях трения пары медный сплав-сталь в

глицерине. Предложена схема формирования медных пленок за счет координационных соединений с металлом, которые формируют на активных центрах зоны трения искаженные плоскоквадратные комплексы [40]. Эти взаимодействия ослабляют связи металла в зоне трения, облегчают разрыв связей в результате механических воздействий и обеспечивают переход комплексов в смазочный материал. В процессе трения пары медный сплав-сталь в глицерине накапливаются комплексные соединения, содержание которых зависит от режимов нагрузочно-скоростного фактора. Термоток, направленный от меди к железу, ведет к адсорбции комплексных соединений на стальной поверхности, их разрушению с образованием на ней медной пленки [96, 97].

В отличие от условий взаимодействия пары медный сплав-сталь при граничной смазке, важнейшей характеристикой эффекта избирательного переноса является протекание химических процессов, которые ведут к образованию коллоидных частиц и полимерных веществ при распаде глицерина и появлению новых поверхностно-активных веществ [76]. Хемосорбцией обусловлено избирательное растворение атомов легирующих элементов в поверхностном слое медного сплава и, связанное с этим, пластифицирование поверхностного слоя.

Автор работы [91] отмечает, что процесс взаимодействия пары медный сплав-сталь протекает в присутствии электрохимически активной и восстановительной среды, окисленные соединения меди не образуются. Трибоэлектрохимическая реакция приводит к образованию и адсорбции атомарного водорода на поверхности меди и, следовательно, к подавлению процесса окисления. Одновременно на поверхности меди образуются глицераты, дающие хемосорбционные пленки, причем поверхностно-активные вещества проникают на глубину до 1,0 мкм в граничный слой за счет селективного массопереноса и трибодиффузии. Так как окисные пленки меди отсутствуют, то создаются условия, благоприятные для миграции дислокаций в связи с тем, что этот слой не твердеет и сохраняет свою

способность к множественным пластическим деформациям. С другой стороны, миграция дислокаций облегчается за счет эффекта Ребиндера П.А. Высокая деформируемость меди приводит к резкому снижению коэффициента трения. Трибокаталическое образование продуктов полимеризации дает свой вклад в предотвращение прямого контакта активных поверхностей с медными пленками. Механически индуцированные локальные анодные процессы на пиках шероховатостей и в напряженных зонах пленок меди составляют основу трибоэлектрохимических процессов при работе пары медный сплав-сталь в глицерине [91]. В результате использования современных физико-химических методов установлено, что перенос меди в режиме безызносности происходит наноразмерными блоками кристаллической решетки, что дополняет предложенный ранее механизм формирования сервовитной пленки в результате трибовосстановления металлосодержащих органических соединений на поверхности контакта из отдельных атомов в процессе непрерывной деформации [40, 8]. Показана возможность полимеризации смазочной среды, а также фиксации на поверхности трения продуктов трибоокисления и трибополимеризации в условиях реализации эффекта избирательного переноса при изнашивании пары медный сплав-сталь. Если вводить в смазочную среду большие или разветвленные заместители, то это приводит к резкому ухудшению противоизносной эффективности образующихся полимеров [26].

Исследование эволюции электрохимических свойств самоорганизующихся систем медный сплав-водный раствор спирта-сталь в системах одно, двух и трех атомных спиртов позволило обнаружить критические точки при переходе в режим безызносности и определить принципиальную связь самоорганизации с изменением электрохимических характеристик контакта и проявление ее в росте стационарного электродного потенциала [8].

Рассматривая взаимосвязь явлений безызносности и самоорганизации при трении, автор работы [75] считает, что самоорганизация при трении

является необходимым условием безызносности. Именно неравновесность и открытость трибологических систем определяет возможность их саморганизации [44]. Однако, если самоорганизация при трении в результате трибохимических реакций протекает в смазочном материале и не предотвращает накопление дефектности в приповерхностных слоях контактирующих материалов, то режим безызносности не наступает. Стоит отметить также и то, что детали механизма, приводящего к самоорганизации, до сих пор неизвестны [45]. Для реализации эффекта безызносности необходимо самоорганизованное поддержание уровня дефектности ниже уровня трещинообразования, что в паре медный сплав-сталь обеспечивается избирательным растворением. Кроме того, необходимо наличие самоорганизующегося механизма осаждения растворенного металла для восстановления медной пленки.

Наиболее трудным и важным вопросом при изучении механизма избирательного переноса является объяснение образования на поверхностях трения стали и бронзы тонкого слоя меди. Было высказано предположение, что тонкий слой меди образуется в результате различной скорости диффузии под действием сил трения [19]. Однако, экспериментальными исследованиями было установлено, что при трении глицерин восстанавливает окись меди до свободной, и это является одним из условий создания безокислительного трения в паре медный сплав-сталь [18].

Формирование медной пленки на подвижных сопряжениях поверхностного слоя пары медный сплав-сталь в глицерине проходит стадии образования коллоидного раствора, полимицелярной пленки и последующей коагуляции коллоидов с образованием пористой пленки меди, насыщенной глицерином, но уже с признаками кристаллического строения [17]. За счет трибодеструкции смазочного материала возникают мономеры и другие исходные для поликонденсации и полимеризации продукты. Образующаяся полимерная пленка, которая находится сверху медной, создает дополнительную защиту от взаимодействия поверхностей [76]. Проведенные

исследования поверхностного слоя медного сплава, изношенного в глицерине, в паре со стальным образцом, методом туннельной микроскопии показали, что медный слой покрыт диэлектрической пленкой, имеющей полимерную структуру [42].

В работах [41, 39, 49, 35] экспериментально показано, что медьсодержащая пленка в условиях самоорганизации в трибосистеме латунь-глицерин-сталь формируется на поверхностях трения с образованием термодинамически устойчивых связей поверхностных атомов при адсорбции активных компонентов смазочного материала и с переходом в состав смазки дезактивированных атомов, ионов и кластеров. Исследования основных закономерностей процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в условиях массопереноса [64, 67, 68, 69] позволили предложить схему взаимодействия триады трения (рис.1.1), которая характеризуется тем, что в начальный период работы подвижных сопряжений происходит изнашивание поверхностного слоя антифрикционного сплава, удаление окисленных соединений медного сплава, микросхватывание и перенос легирующих элементов на сталь.

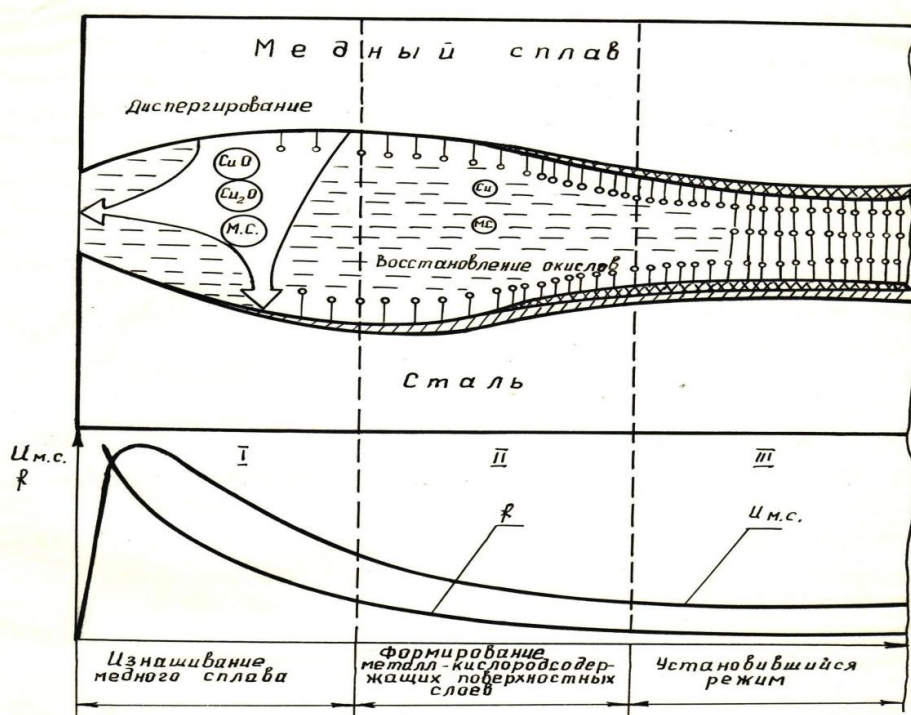


Рисунок 1.1 - Схема взаимодействия триады трения.

Механические и физико-химические процессы ведут к образованию в глицерине кислот, которые при наличии ювенильных поверхностей меди способствуют реакции этерификации. Также было установлено, что свойство меди обеспечивать низкие триботехнические характеристики в паре медный сплав-сталь в глицерине не является исключительной способностью элемента, а имеются и другие металлы (алюминий, олово и т.д.), которые способствуют значительному снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания [70,66,77].

С привлечением современных методов анализа металлов в работе [71] показано, что толщина медьсодержащей пленки на поверхностях трения пары медный сплав-сталь в глицерине порядка 0,6-0,8 мкм, а верхний слой, толщиной около 0,1 мкм представлен аморфным веществом. Углерод, кислород, медь в составе защитной пленки находятся в химических соединениях. Сравнение состава и строения медьсодержащей пленки на поверхностях трения пары медный сплав-сталь с алюминийсодержащей пленкой при изнашивании пары алюминиевый сплав-сталь в глицерине показало, что они отличаются только металлом [71].

Гаркунов Д.Н. считает, что в первый период работы пары медный сплав-сталь в условиях безызносности происходит растворение поверхностного слоя бронзы. Глицерин действует как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы уходят в смазочный материал, а поверхностный слой бронзы обогащается атомами меди. После ухода атомов легирующих элементов с поверхностного слоя бронзы, деформация ее при трении вызывает диффузионный поток новых легирующих элементов к поверхности, которые затем уходят в смазочный материал.

Поверхностный слой бронзы, в основном, состоит из меди, в нем большое количество вакансий, а также имеются поры, заполненные молекулами глицерина. В результате схватывания со стальной поверхностью, последняя постепенно покрывается тонким слоем меди. Так как тонкий слой меди на бронзовой поверхности утончается в результате переноса на сталь,

то происходит дальнейшее растворение поверхностного слоя антифрикционного сплава. Этот процесс происходит до тех пор, пока в зонах трения пары медный сплав-сталь, не образуется слой меди толщиной 1-2 мкм [14,16].

Несмотря на проведенные исследования по изучению эффекта безызносности в паре медный сплав-сталь в настоящее время не сформулированы требования к смазочному материалу, который бы обеспечивал образование медной пленки на поверхностях трения. В технической литературе нет достаточных объяснений низкого коэффициента трения в паре антифрикционный сплав-сталь в глицерине. Предложенная авторами [15,19] гипотеза о «квазижидком» состоянии медной пленки на поверхностях трения является единственным объяснением эффекта избирательного переноса.

Рассмотрение современных представлений о взаимодействии пары медный сплав-сталь в глицерине позволяет отметить, что эффект безызносности представляет сложную совокупность различных процессов, протекающих как на поверхностях трения, так и в смазочном материале. Изучению процессов трения и изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь посвящено значительное число работ, однако единого подхода к механизму взаимодействия триады трения до сих пор не существует. Это связано с трудностями экспериментального исследования в паре медный сплав-сталь непосредственно в процессе взаимодействия триады трения.

Выполнение исследований процессов, протекающих в динамике формирования металлсодержащей пленки при взаимодействии пары медный сплав-сталь, и изучение поверхностных слоев подвижных сопряжений, а также смазочного материала с привлечением современных методов анализа, представляет научный и практический интерес.

2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ ПАРЫ МЕДНЫЙ СПЛАВ-СТАЛЬ В СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

2.1 Выбор схемы и установки для лабораторных исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь

Основным принципом выбора схемы испытаний на трение и изнашивание является максимальное приближение к реальным условиям работы исследуемого трибосопряжения. Для этого необходимо обеспечить соответствие характера движения образцов, величин и скоростей скольжения, а также материала пар трения.

При выборе принципиальной схемы исследования процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений в смазочных материалах, необходимо учитывать получение на образцах качественной картины, наблюдаемой при реализации эффекта избирательного переноса в паре медный сплав-сталь.

Медные сплавы являются широко распространенным материалом для изготовления деталей машин, которые работают в условиях интенсивного трения и износа, в том числе электрических контактах, зубчатых передачах, высоконагруженных подшипниках прокатных станов, экскаваторов [84]. Медные сплавы применяются для изготовления венца червячного колеса редукторов, которые используются в лифтах, металлорежущих станках, шахтных подъемниках, плунжерных насосах, механизмах закрытия и открытия трубопроводов при транспортировке нефти и газа.

На основании рассмотрения механизмов и машин, в подвижных сопряжениях которых используются медные сплавы, в работе для проведения лабораторных исследований механо-физико-химических процессов в паре медный сплав-сталь принята схема безударного трения скольжения по площади. Схема контакта по площади позволяет оценить изменения характеристик микрогеометрии зоны трения подвижных сопряжений, а также

исследовать состав, строения и толщину формирующихся медьсодержащих пленок, и динамику их образования. Кроме того, выбранная схема предполагает учитывать следующие процессы при трении: взаимодействие материалов пары при трении в смазочном материале, изменения которых происходят в поверхностных слоях трибосопряжений, а также изнашивание подвижных сопряжений.

Исходя из выбранной схемы испытаний и характера движения образцов, а также с учетом классификации испытательных установок с контактом по площади [37] нами выбрана стандартная машина СМЦ-2 Ивановского завода измерительных приборов, схема которой представлена на рис. 2.1.

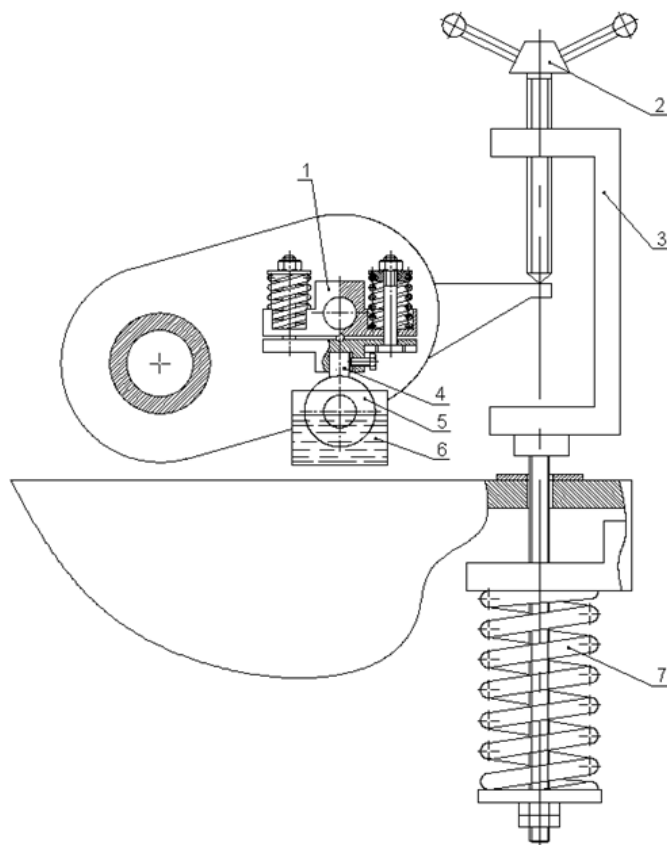


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема машины трения СМЦ-2
 1- оправка, 2-винт, 3 – кронштейн, 4- образец «колодка»,
 5 -образец «ролик», 6 – камера со смазочным материалом,
 7 – нагружающая пружина

От электродвигателя постоянного тока через клиноременную передачу, редуктор, бесконтактный индуктивный датчик необходимая частота вращения передается на вал, установленный в подшипниках, закрепленных в промежуточной опоре. На валу крепится нижний образец-ролик. Верхний неподвижный образец (колодка из антифрикционного сплава) крепится в оправку, которая закрепляется на выходном валу каретки. Для установки верхнего образца в оправку, каретка откидывается. Нагружение узла трения осуществляется за счет сжатия пружины кронштейном с помощью винта. Испытательная машина трения СМЦ-2 со схемой вал-частичный вкладыш обеспечивает работу в условиях безударного трения скольжения за счет вращательного движения ролика.

Узел трения работает в постоянном объеме смазочного материала (200мл), что ужесточает режим трения, но упрощает проведение экспериментальных исследований. Зона контакта образцов погружена в смазочный материал, и тем самым улучшается теплоотвод с рабочих поверхностей подвижных сопряжений и снабжение зоны трения смазочным материалом, что приближает условия работы узла трения к реальным.

Конструкция стандартной державки к машине трения СМЦ-2 не обеспечивает равномерного плотного прилегания поверхностей трения образцов и не исключает возможных перекосов и погрешностей при испытании пары колодка-ролик. Поэтому в работе было использовано новое, регулируемое приспособление для крепления неподвижного образца-колодки. Колодка устанавливается и закрепляется болтом через пластину в гнезде нижней половины корпуса приспособления (рис. 2.2). Нижняя половина корпуса связана с верхней через шарик при помощи пальцев, свободно расположенных в гнездах. Верхняя половина приспособления надевается на вал каретки и крепится специальной гайкой. Для исключения перекоса предварительно производится обжатие системы приспособления пары колодка-ролик максимальной нагрузкой. За счет шарика в

приспособлении обеспечивается самоустановка колодки в двух необходимых плоскостях поверхности ролика [60].

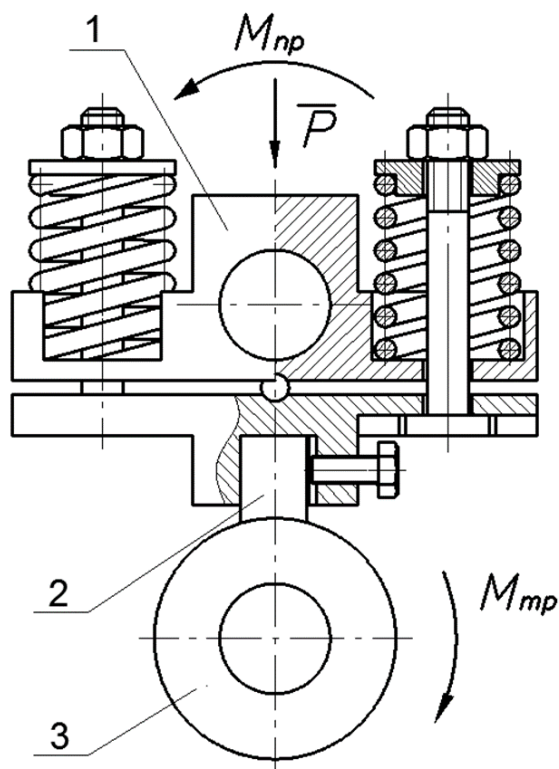


Рисунок 2.2 - Самоустанавливающееся приспособление для крепления образца (колодки) на машине трения СМЦ-2

Перед выполнением экспериментальных исследований процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений была проведена градуировка средств измерений в режиме статического нагружения на цифровом вольтамперметре с помощью специального приспособления и мерных грузов согласно инструкции по эксплуатации машины трения. При этом погрешность измерения величины не превышает 5%, обусловленных инструкцией по эксплуатации.

Для оценки триботехнических характеристик пары колодка-ролик при формировании на поверхностях трения трибосопряжений металлосодержащих пленок, характеризующихся низким моментом трения, в работе была использована модернизированная измерительная система момента трения, обеспечивающая его оценку в 20 и более раз меньших, чем стандартная система [60].

Большое значение имеет выбор размеров образцов, используемых при испытаниях [30]. Образцы для испытаний представляли собой колодки и ролики с размерами, указанными на рис. 2.3. Стальные образцы-ролики были изготовлены из стали 40ХН, после термообработки их твердость составляла НРС 47-50. Выбор стали 40ХН для изготовления образцов-роликов связан с тем, что принятая сталь используется для изготовления червяков редукторов [22,78]. Образцы колодок были изготовлены из латуни Л63, бронзы БрОЦС5-5-5, БрАЖ9-4. Бронзы, содержащие в своем составе алюминий и олово, широко используются для изготовления венцов червячных колес [22,54]. Указанные твердость и шероховатость образцов ролика и колодки (рис.2.3) принимались с целью обеспечения в трибосопряжении пластического контакта, т.е. условий наиболее благоприятных для формирования на поверхностях трения пары антифрикционный сплав-сталь медьсодержащей пленки [54].

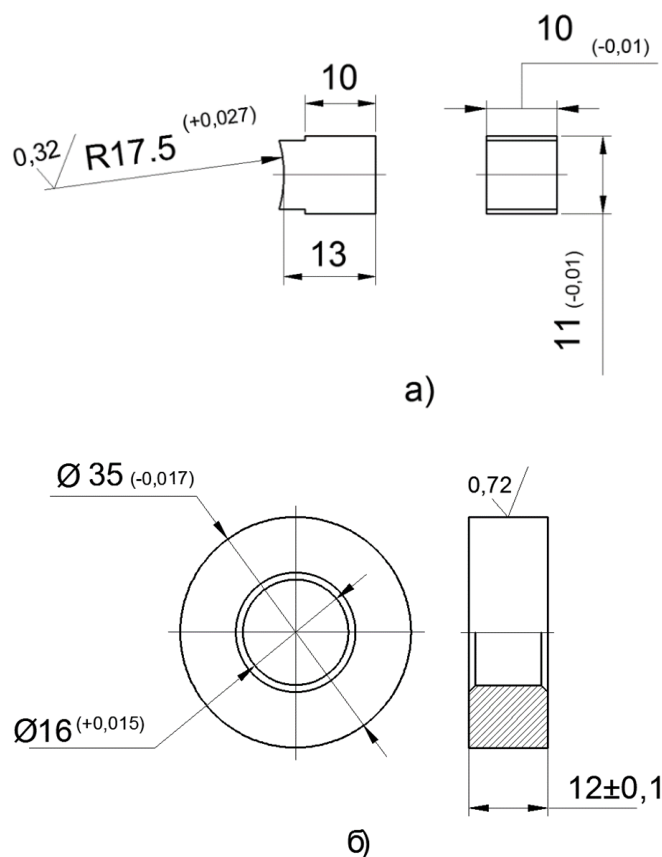


Рисунок 2.3 - Образцы для лабораторных исследований

а – колодка, б – ролик

При выполнении экспериментальных исследований процессов трения и изнашивания металлических пар износ образцов определялся на аналитических весах типа W-21 (Польша), рассчитанных на максимальную массу 0,2 кг с ценой деления $2 \cdot 10^{-7}$ кг и точностью отсчета 10^{-7} кг. Коэффициент трения при изнашивании пары антифрикционный сплав-сталь подсчитывался по формуле Кулона:

$$f = \frac{2M}{dP},$$

где, M – измеряемый момент трения, Н·м; d – диаметр, м; P – прижимающая нагрузка, Н

2.2 Выбор материалов и смазочных сред для исследования триботехнических характеристик подвижных сопряжений

Износостойкость подвижных сопряжений определяется различными факторами, среди которых важное значение имеют механические свойства поверхностных слоев трибосопряжений, а также нагрузочно-скоростной режим работы. В процессе взаимодействия триады трения происходят изменения механических свойств, микрогеометрии поверхностных слоев подвижных сопряжений. Смазочный материал обеспечивает предотвращение непосредственного контакта между контактирующими поверхностями, охлаждает трущиеся поверхности, вступает во взаимодействие с поверхностным слоем материала трибосопряжений [59]. При выборе материалов подвижных сопряжений необходимо учитывать их совместимость и приспособляемость друг к другу при изменении условий работы и смазочного материала [9]. Совокупность различных факторов (высокие локальные температуры и давления, каталитически активные ювенильные поверхности металлов), которые имеются в реальных условиях работы трибосопряжений, могут способствовать образованию органических антифрикционных и противоизносных пленок [24].

Для выполнения экспериментальных исследований процессов трения и изнашивания металлических пар и изучения механо-физико-химических процессов при взаимодействии пары медных сплав-сталь, нами в качестве смазочного материала был принят глицерин, так как он обеспечивает образование на поверхностях трения медьсодержащей пленки. Кроме того, для сравнительных исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в работе нами использовалось индустриальное масло И-40А, в составе которого отсутствуют присадки.

2.3 Обоснование выбора режимных параметров испытаний пары медный сплав-сталь

Принятая в работе схема безударного трения скольжения лабораторных исследований процессов трения и изнашивания пары колодка-ролик в смазочных материалах предполагает учитывать следующие взаимодействия трибосопряжений:

- взаимодействие материалов пары антифрикционный сплав-сталь в смазочных материалах;
- изменения, происходящие в поверхностных слоях трибосопряжений;
- изнашивание поверхностных слоев пары антифрикционный сплав-сталь;
- формирование на поверхностях трения подвижных сопряжений медьсодержащих пленок.

Основными факторами, определяющими характер и скорость протекания механо-физико-химических процессов при внешнем трении, являются:

- сочетание и свойства поверхностей трения;
- величина приложенной нагрузки и скорость взаимного перемещения;
- свойства смазочного материала и температура в зоне трения.

Важное влияние на процессы трения и изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь и образование медьсодержащей пленки на

поверхностях трения подвижных сопряжений оказывает величина удельных нагрузок. Повышение величины удельной нагрузки ведет к увеличению глубины поверхностных слоев металла, принимающих непосредственное участие в процессе трения. На основании предварительных методических экспериментов по влиянию удельной нагрузки на процессы трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине установлено, что наиболее эффективной удельной нагрузкой является величина 6...8 МПа. При этих удельных нагрузках отмечается низкий коэффициент трения пары медный сплав-сталь и формирование медьсодержащей пленки на поверхностях трения трибосопряжений.

Скорость скольжения оказывает значительное влияние на триботехнические характеристики пары медный сплав-сталь. На основании экспериментальных исследований зависимости коэффициента трения от числа оборотов вращения вала при использовании в качестве смазочного материала глицерина, представленных в работе [54], нами принята скорость скольжения 1 м/с.

При выполнении лабораторных исследований механо-физико-химических процессов при изнашивании пары медный сплав-сталь образцы предварительно не прирабатывались. Известно, что в случае предварительной приработки образцов не наблюдается формирование медьсодержащей пленки [52]. Это, видимо, связано с тем, что при трении двух твердых тел исходный пластический контакт после периода приработки вырождается в упругий контакт. А при упругих деформациях комплекс процессов, протекающих на функциональном контакте, не обеспечивает реализацию избирательного переноса в паре медный сплав-сталь [54].

В связи с тем, что в работе ставится цель исследования механо-физико-химических процессов в начальной стадии эффекта избирательного переноса в паре медный сплав-сталь в динамике пути трения, нами были приняты следующие параметры испытаний подвижных сопряжений:

- величина удельных нагрузок 6 МПа;

- скорость скольжения 1 м/с;
- путь трения в экспериментах 70, 210, 350, 700, 1400, 2100 м.

Принятые в работе схема и метод исследования процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь обеспечивает выполнение тонких экспериментов и оценку изменений триботехнических характеристик пары колодка-ролик при образовании на поверхностях трения медьсодержащей пленки.

2.4 Последовательность подготовки и проведения экспериментальных исследований на машине трения СМЦ-2

Проведение экспериментальных исследований процессов трения и изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь по схеме колодка-ролик в смазочных материалах выполнялось в следующей последовательности:

- включали все приборы с целью их прогрева;
- устанавливали необходимую частоту вращения нижнего образца – ролика;
- закрепляли ролик и колодку, а также крышку камеры;
- заливали определенное количество смазочного материала в камеру;
- выполняли обжатие образцов при некоторой нагрузке и проворот вала от руки для лучшей самоустановки оправки с образцом колодки;
- на холостом ходу машины производили прогрев измерительной системы записи момента трения, а также запись нулевой линии момента трения холостого хода;
- осуществляли нагружение узла трения и выполнение эксперимента.

Металлические образцы до испытаний и после проведения эксперимента тщательно очищали, взвешивали на аналитических весах не менее 3-х раз для оценки потери массы в процессе изнашивания. Количество экспериментальных исследований на одну точку подсчитывалось по методике, представленной в работе [23] и составляло 3-4 эксперимента.

Принятый в работе метод испытаний пары медный сплав-сталь в смазочных материалах на трение и изнашивание трибосопряжений с использованием самоустанавливающегося приспособления для неподвижного образца колодки из антифрикционного сплава удовлетворяет следующим требованиям:

- постоянство геометрической площади контакта и строгого взаиморасположения контактирующих поверхностей при одинаковых контактных давлениях в условиях трения скольжения;
- возможности оценки антифрикционных и противоизносных свойств исследуемых материалов во времени и их влияния на характер изменения момента трения и износа подвижных сопряжений.

2.5 Методы изучения механо-физико-химических процессов при взаимодействии пары медный сплав-сталь

Пленки вторичных структур, формирующиеся на поверхностях трения подвижных сопряжений машин и оборудования являются одним из существенных факторов, определяющих эксплуатационные характеристики трибосопряжений. Поверхности трения состоят из множества впадин и выступов. Под действием нагрузки при трении на взаимодействующих между собой выступах микронеровностей поверхностных слоев возникают напряжения, которые ведут как к изнашиванию, так и к пластическому деформированию тонкого поверхностного слоя. Происходит образование новых поверхностных микронеровностей, отличных от первоначальных, взаимодействие поверхностно-активных веществ смазочного материала с металлом, формирование защитных пленок на поверхностях трения трибосопряжений.

Для изучения изменений характеристик микрогеометрии поверхностных слоев пары антифрикционный сплав-сталь в диапазоне пути трения 70-2100 м выполнялись исследования с применением профилографа-профилометра завода «Калибр» модели 170311. Действие профилографа-

профилометра основано на ощупывании неровностей исследуемой поверхности алмазным щупом датчика, который воспроизводит эти неровности, преобразует возникающие при этом колебания щупа в изменение напряжения, пропорционально этим колебаниям. Профилограф-профилометр был использован для вычисления параметров шероховатости на определенном участке зоны трения пары антифрикционный сплав-сталь с выдачей результатов измерения на устройство цифровой индикации.

Кроме того, для выявления и определения микродеталей, образовавшихся при взаимодействии триады трения на контактирующих поверхностях, их размеров и формы в зоне трения, был использован сканирующий электронный микроскоп Carl Zeiss Leo-430i с рентгеноспектральным микроанализатором Oxford Instruments с энергодисперсионным детектором.

Элементный состав и характер их распределения в зоне трения образцов изучали при сканировании поверхности в характеристических рентгеновских лучах. Основная идея метода исследования заключается в том, что падающие на образец электроны первичного зонда вызывают возбуждение характеристических рентгеновских лучей элементов, которые входят в состав поверхностного слоя зоны трения металлических образцов до глубины 4-5 мкм [21, 29]. Так как с привлечением рентгеноспектрального метода анализа эффективно возможно лишь исследовать наличие тяжелых элементов, то для определения присутствия в зоне трения пары медный сплав-сталь легких элементов (С, О) нами был привлечен также метод рентгенофотоэлектронной спектроскопии – ЭСХА. Метод ЭСХА основан на излучении в магнитном или электронном поле энергий электронов с высоким разрешением, испускаемых веществом под действием рентгеновского или ультрафиолетового излучения. Методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии можно изучать все элементы периодической системы, кроме водорода [61]. Метод позволяет изучать послойно элементный состав и химическое состояние аморфных и кристаллических материалов. Анализ

положения линий ЭСХА, зависящего от валентного состояния соответствующего атома, дает информацию о характере химической связи в молекулах [31].

Исследование медьсодержащих пленок, образовавшихся на поверхностях трения пары медный сплав-сталь в глицерине, проводили на рентгенофотоэлектронном спектрометре ESCALab5 (Vacuum Generators, Англия). Для изучения распределения элементов по глубине образцов, изношенных в глицерине, использовалась ионная аргоновая пушка. При расчете количественного содержания элементов в поверхностном слое пары антифрикционный сплав-сталь использовались относительные чувствительности [102], а длины свободного пробега электронов определяли по формуле Яблонского [94]. Оба подхода использовались в программе количественного расчета [103].

Спектральный анализ качественного и количественного содержания элементов в глицерине, работавшего в паре медный сплав-сталь на пути трения от 70 до 2100 м проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой фирмы Жобэн Ивон, Ж70П, (Jobin Ivon, Франция). Спектрометр позволяет исследовать такие материалы как вода, масло, горные породы и т.д. Принцип работы прибора основан на следующем. Высокочастотное излучение используется для нагревания потока аргона и для образования плазмы при помощи индукционной катушки. Получаемая при этом температура колеблется от 500°K до 10000°K. Вводимый в плазму образец доводится до состояния независимых атомов. Последние, возбужденные плазмой, излучают вновь полученную энергию в виде электромагнитного излучения (света). Свет состоит из характерных длин волн, соответствующих присутствующим различным элементам. Излучаемый свет поступает в три разных спектрометра, которые рассеивают этот свет, разделяя различные эмиссионные линии, имеющиеся в этом излучении. Соответствующее количество фотоумножителей преобразует световую энергию в электрический ток. От каждого фотоумножителя ток

интегрируется, а затем оцифровывается. Данные этой информации вводятся в ЭВМ для обработки и распечатки.

Изучение размера частиц износа и определение их содержания в смазочных материалах выполнялось на лазерном анализаторе типа ST-1800 фирмы «Malvern» (Англия). Принцип работы прибора основан на образовании дифракции Фраунгофера, возникающей при освещении частиц параллельным пучком монохроматического света. Анализируемая проба смазочного материала помещается в специальную кювету, которая установлена на пути лазерного пучка. Дифрагируемый свет от частиц с помощью линзы направляется на многоэлементный фотоэлектрический детектор, который находится в фокальной плоскости линзы. Детектор обеспечивает электрический аналог энергетического распределения интенсивности падающего света дифракционной картины. Далее сигнал поступает на мини-ЭВМ, а телетайп выводит на печать значения среднего диаметра анализируемых продуктов изнашивания и их распределение по массе в смазочном материале.

ИК-спектральные исследования медьсодержащей пленки, сформировавшейся на поверхностях трения пары медный сплав-сталь, работавшей в глицерине, проводились на ИК-спектрометре фирмы «Bruker», снабженном ЭВМ, которая автоматически проводила распечатку длин волн соответствующих пиков на диаграмме интенсивность-длина волны. Инфракрасную спектроскопию используют для исследования молекул, особенностей внутри и межмолекулярных взаимодействий, характера химических связей. Метод широко применяется для качественного и количественного анализа веществ во всех агрегатных состояниях. Качественный анализ возможен благодаря высокой индивидуальности ИК-спектров и существованию характеристических колебаний некоторых атомных групп, например, CH_2 ; CH_3 ; NO_2 и т.д. Мерой концентрации вещества служит интенсивность ИК-спектра. Можно проводить анализ многих компонентов, спектры которых не зависят от их концентрации.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ ПАРЫ АНТИФРИКЦИОННЫЙ СПЛАВ-СТАЛЬ В СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Повышение срока службы трибосопряжений машин и механизмов, снижение потерь на трение и защита окружающей среды является важной технической задачей. Одним из основных факторов при этом является износостойкость подвижных сопряжений, которая зависит не только от металлофизических характеристик поверхностей трения, но и от свойств смазочного материала. При изнашивании пары медный сплав-сталь в условиях избирательного переноса на поверхностях трения подвижных сопряжений формируется медьсодержащая пленка. Наличие на поверхностях трения мягкой пленки, особой структуры и свойств, лежащей на упрочненной подложке, обеспечивает локализацию процесса трения в тончайшем поверхностном слое и препятствует вовлечению в процесс деформации более глубоких слоев материала [83].

С целью изучения механо-физико-химических процессов начальной стадии взаимодействия пары медный сплав-сталь в работе выполнены экспериментальные исследования по влиянию пути трения, смазочного материала, химического состава антифрикционного сплава на триботехнические характеристики подвижных сопряжений.

3.1 Изменение коэффициента трения пары медный сплав-сталь от пути трения

Экспериментальные исследования процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в смазочных материалах проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме колодка-ролик. В качестве смазочных материалов были приняты глицерин и индустриальное масло И-40А. При выполнении исследований процессов трения и изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь удельное давление составляло 6 МПа, а скорость скольжения

1м/с. Путь трения пары медный сплав-сталь был разбит на участки 70,210,350,700,1400,2100 м с целью оценки как триботехнических характеристик, так и выполнения исследований изменения микрогеометрии поверхностных слоев подвижных сопряжений, проведения рентгеноспектральных и послойных рентгенофотоэлектронных исследований состава, строения и толщин защитных пленок в динамике пути трения. На каждом участке пути трения использовались не работавшие образцы, а также смазочный материал.

В таблице 3.1. представлены данные о влиянии смазочных материалов на изменение коэффициента трения пары медный сплав-сталь от пути трения в диапазоне 70-2100 м. Анализ данных по изменению коэффициента трения пары Л63-сталь 40ХН позволяет отметить, что полученные зависимости имеют одинаковый характер, т.е. с повышением пути трения коэффициент трения снижается.

Таблица 3.1

Влияние смазочных материалов на изменение
коэффициента трения пары Л63-сталь

№№ п/п	Путь трения, м	Коэффициент трения в смазочных материалах	
		глицерин	масло И-40А
1	70	0,020	0,20
2	210	0,018	0,17
3	350	0,015	0,15
4	700	0,12	0,09
5	1400	0,009	0,07
6	2100	0,007	0,06
7	4000	0,007	-

Необходимо отметить, что на пути трения 70-2100 м коэффициент трения пары латунь-сталь в минеральном масле И-40А практически на порядок выше, чем при аналогичных нагрузочно-скоростных параметрах испытаний в глицерине. На пути трения 700-1400 м коэффициент трения пары латунь-сталь характеризуется величиной порядка 0,009, а при

дальнейшем увеличении пути трения до 2100 м коэффициент трения снижается до значения 0,007. Можно предположить, что на пути трения 700-2100 м на поверхностях пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине образуется органическая металлосодержащая пленка, наличие которой способствует низкому значению коэффициента трения. Дальнейшая работа трибосопряжения на пути трения до 4000 м показала, что коэффициент трения пары медный сплав-сталь в глицерине не изменяется. Видимо, процессы разрушения и восстановления сформировавшихся защитных пленок на поверхностях трения пары антифрикционный сплав-сталь находятся в динамическом равновесии.

3.2 Влияние смазочных материалов на износостойкость подвижных сопряжений

В работе наряду с оценкой изменения величины коэффициента трения пары антифрикционный сплав-сталь от пути трения выполнялись эксперименты по влиянию смазочных материалов на износостойкость подвижных сопряжений. В качестве смазочных материалов использовался глицерин и минеральное масло И-40А, которое в своем составе не содержит присадок и не реализует избирательный перенос в паре медный сплав-сталь. В каждом эксперименте на пути трения 70,210,350,700,1400,2100 м использовались новые образцы и не работавший смазочный материал. Исследования износостойкости пары колодка-ролик выполнялись при удельной нагрузке 6 МПа и скорости скольжения 1 м/с.

В таблице 3.2 представлены данные износостойкости трибосопряжений, работавших в глицерине. Исследования показали, что с увеличением пути трения масса стального образца-ролика, работавшего в паре с латунью Л63, повышается. Максимальное увеличение массы стального образца-ролика отмечается на пути трения 1400 м, а затем стабилизируется.

Таблица 3.2

Износ пары латунь Л63-сталь в глицерине от пути трения

№№ п/п	Путь трения, м	Износ $\cdot 10^{-4}$ г		Температура глицерина в объеме, °С
		сталь	Л63	
1	70	+1	2	24
2	210	+1	4	25
3	350	+2	7	26
4	700	+3	13	26
5	1400	+4	14	28
6	2100	+4	14	28

Износ латунного образца, работавшего в паре со стальным в глицерине, характеризуется тем, что с увеличением пути трения от 70 до 700 м он повышается, а в интервале пути трения 700-2100 м остается постоянным. Замер температуры глицерина в объеме испытательной камеры показал, что температура глицерина на пути трения 70-2100 м повышалась на 4° С по сравнению с комнатной.

Анализ данных, представленных в таблице 3.3 по влиянию пути трения пары латунь-сталь в масле И-40А на износ подвижных сопряжений, позволяет отметить, что на пути трения 70-2100 м масса стального образца увеличивается и достигает наибольшего значения на пути трения 2100 м.

Таблица 3.3.

Износ пары колодка-ролик от пути трения
в индустриальном масле И-40А

№№ п/п	Путь трения, м	Износ $\cdot 10^{-4}$ г		Температура объема масла, °С
		ролик	колодка	
1	70	+2	32	24
2	210	+3	125	32
3	350	+5	215	34
4	700	+7	278	38
5	1400	+8	423	44
6	2100	+9	619	52

Это, видимо, связано с микросхватыванием и переносом антифрикционного сплава на сталь. Износ колодки из антифрикционного сплава, работавшей в паре со стальным роликом с увеличением пути трения повышается и достигает наибольшей величины на пути трения 2100 м.

Необходимо также отметить, что температура объема минерального масла на пути трения 70-2100 м увеличивается и достигает наибольшего значения на пути трения 2100 м. Если на пути трения 2100 м температура объема глицерина в испытательной камере имела величину 28°C, то при тех же условиях испытаний температура объема минерального масла была практически в 2 раза выше.

Сравнение величины износа антифрикционного сплава, работавшего в паре со стальным роликом в глицерине и минеральном масле, показало, что износ латуни в глицерине почти в 50 раз меньше, чем при одинаковых условиях испытаний в индустриальном масле И-40А.

3.3 Влияние химического состава антифрикционного сплава на триботехнические характеристики пары колодка-ролик

Для выполнения сравнительных исследований процессов трения и изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине, нами наряду с латунью Л63, также проведены эксперименты триботехнических характеристик подвижных сопряжений пары медный сплав-сталь, в которых образцы колодок изготавливались из бронз БрАЖ9-4, БрОЦС5-5-5. Эксперименты проводились при скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 6 МПа. Путь трения был принят от 70 до 2100 м. На каждом отрезке пути использовались новые колодки из бронз и смазочный материал.

На рис.3.1. представлены зависимости коэффициента трения пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине от пути трения. Можно отметить, что с увеличением пути трения коэффициент трения пар бронза-сталь в глицерине снижается и на пути трения 1400 - 2100 м практически стабилизируется. Это, видимо, связано с окончанием периода приработки

образцов. Осмотр поверхностей трения колодок из бронз и стального образца из стали 40ХН показал наличие медной пленки в зонах трения, интенсивность которой с повышением пути трения увеличивается. Эксперименты свидетельствуют о том, что на пути трения 2100 м коэффициент трения пары БрАЖ9-4-сталь в глицерине имеет меньшее значение, чем при изнашивании пары БрОЦС5-5-5-сталь.

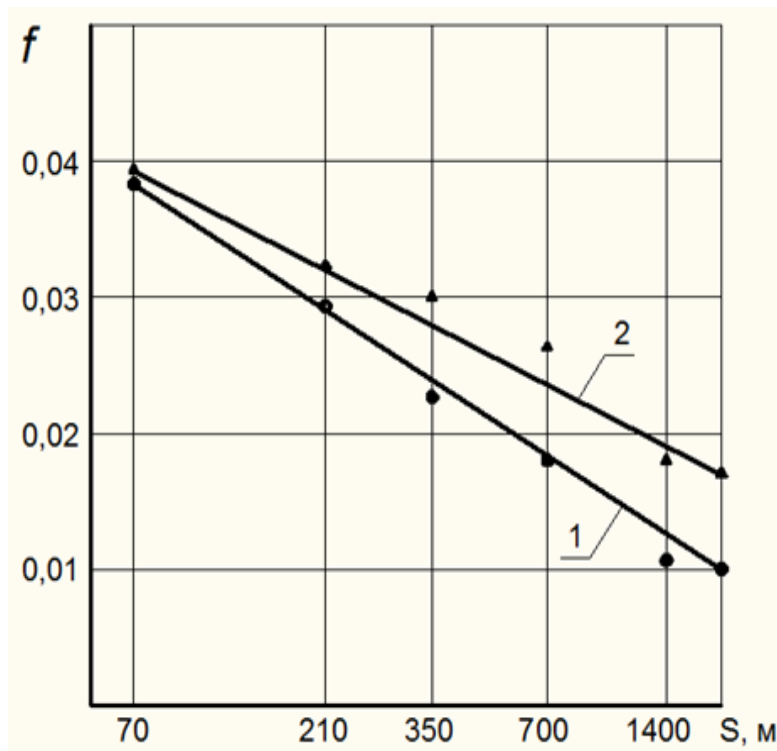


Рисунок 3.1 - Влияние пути трения на коэффициент трения пары медный сплав-сталь в глицерине 1-БрАЖ9-4, 2-БрОЦС5-5-5-5.

Проведенные исследования по влиянию глицерина на изнашивание бронз на пути трения 70-2100 м показали, что химический состав антифрикционного сплава (рис.3.2) оказывает важное влияние на триботехнические характеристики подвижных сопряжений. Если на пути трения 70 м износ бронз, работавших в паре со стальным образцом в глицерине, практически одинаков, то увеличение пути трения до 2100 м позволяет оценить влияние химического состава антифрикционного сплава на износостойкость. Анализ результатов экспериментов, представленных на рис. 3.2 показывает, что износ бронзы БрОЦС5-5-5 в глицерине в паре со стальным образцом почти в 2 раза выше, чем при аналогичных условиях

испытаний пары БрАЖ9-4. Необходимо также отметить, что повышение пути трения от 1400 до 2100 м мало влияет на износ антифрикционных сплавов, что, видимо, связано с процессом приработки поверхностных слоев трибосопряжений.

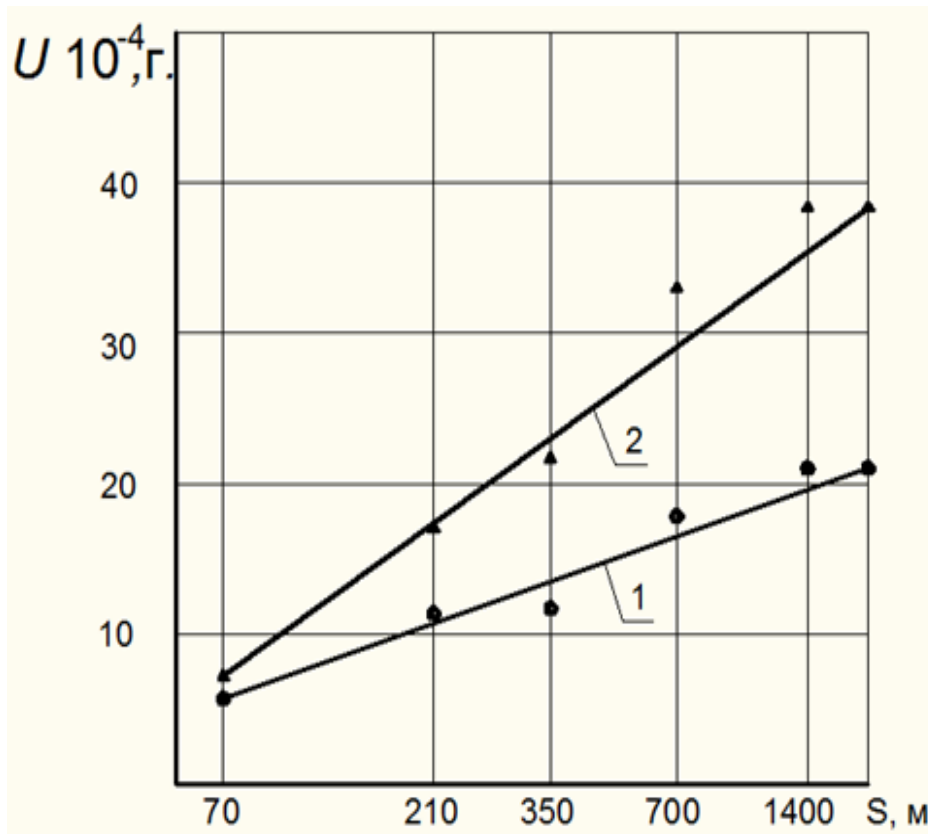


Рисунок 3.2 - Износ антифрикционных сплавов от пути трения в глицерине 1- БрАЖ9-4, БрОЦС5-5-5-5

Полученные результаты триботехнических характеристик пар антифрикционный сплав-сталь в глицерине на пути трения 2100 м, скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 6 МПа были сравнены с твердостью медных сплавов. По твердости использованных в работе медных сплавов их можно расположить в следующий ряд Л63 < Бр.ОЦС5-5-5 < Бр.АЖ9-4 [31]. Однако, латунь, имеющая наименьшую твердость, обеспечила в паре со стальным образцом наиболее низкий коэффициент трения и более высокую износостойкость (см. Табл. 3.1 и 3.2). Поэтому дальнейшие исследования процессов, протекающих как на контактирующих поверхностях, так и в смазочных материалах и ведущих к образованию металлсодержащих

антифрикционных и противоизносных пленок на поверхностях трения трибосопряжений выполнялись в паре латунь-сталь.

3.4 Математическая модель взаимодействия пары трения медный сплав – сталь в смазочной среде

Экспериментальные результаты, полученные в процессе исследования взаимодействия пары медный сплав – сталь в глицерине, позволили смоделировать процесс взаимодействия в рамках диффузионной модели, представленной ранее в работах Литвинова В.Н. и Крагельского И.В. [54].

Рассмотрим упрощенную модель, которая представляет собой плоскопараллельный зазор между плоскостями раздела, заполненный средой. На одной из поверхностей раздела происходит появление частиц по закону $N = \psi(t)$, на другой - их полное осаждение. Движение поверхностей раздела в тангенциальном направлении осуществляется со скоростью v_0 .

В направлении, нормальном к плоскости зазора, действует электрическое поле напряженности $E(t)$, а частицы имеют определенный электрокинетический потенциал. Поток частиц будет складываться из потока диффузии и конвективного, обусловленного движением частиц вместе со средой при перемещении объемов среды и электрофоретическим переносом их в поле. Таким образом, концентрация частиц:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\Delta N + v \text{grad} N, (1)$$

где D — коэффициент диффузии частиц в среде; N — концентрация частиц в единице объема; $v = v_0 + v_e$, v_0 — составляющая скорости переноса частиц вместе со средой, $v_e = \frac{eE\zeta}{4\pi\eta}$ — составляющая скорости вследствие электрофоретического переноса.

3.4.1 Постановка задачи.

Вид течения жидкости определяется по безразмерному критерию Рейнольдса $\mathfrak{R} = \frac{v_0 h}{\nu}$, где ν – коэффициент кинематической вязкости, h – толщина зазора.

В данном случае движение смазки можно считать ламинарным, так как h мало. Используя это допущение, можем применить плоскопараллельную модель, при которой в поперечном переносе частиц отсутствует вклад гидродинамической составляющей. Модель сводится к задаче одномерной диффузии и уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + v_e \frac{\partial N}{\partial x}. \quad (2)$$

Начальным условием данного уравнения будет равенство концентрации нулю в начальный момент времени во все объеме $N(x, 0) = 0$.

Граничные условия: $N(0, t) = 0$ – концентрация равна 0 вблизи стенки при мгновенном прилипанию частиц.

$N(x_0, t) = \psi(t) = p + qt$, где $p_i = \psi(t_{i-1})$, $q_i = [\psi(t_i) - \psi(t_{i-1})]/h$.
Здесь $h = \frac{T}{m}$, где T – отрезок времени протекания процесса, m – число разбиений.

3.4.2 Методика решения задачи.

Уравнение (2) преобразуется в: $\partial K / \partial t = \omega^2 \partial^2 K / \partial t^2 + f(x, t)$ с однородными краевыми условиями: $K(0, t) = K(x_0, t) = 0$, $K(x, 0) = \varphi(x)$.

При этом: $N(x, t) = x(p + qt)/x_0 + K(x, t) \exp[-v_e(2x + v_e t)/4D] \omega^2 = D, \varphi(x) = [-px \exp(v_e x/2D)],$

Раскладывая функции $\varphi(x)$ и $f(x, t)$ в ряд Фурье,

$$K(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \sin \frac{\pi n x}{x_0} \quad (4)$$

найдем

$$u_n(t) = \exp \left[- \left(\frac{\pi n \omega}{x_0} \right)^2 \right] \left[\varphi_n + \int_0^t f_n(\tau) \exp \left[\left(\frac{\pi n \omega}{x_0} \right)^2 \right] \tau d\tau \right]$$

Искомое значение количества осаждающегося вещества равно интегралу потока на границе $x = 0$: $I = \int_0^t j dt$,

где поток равен $j = D \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)_{x=0}$.

Дифференцируя предыдущее выражение с подстановкой (4), получаем для границы

$$j = (D/x_0) \left[p_i + q_i t + \exp \left(\frac{-v_e^2 t}{4D} \right) \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) n}_{\Phi(t)} \right] dt, x = 0:$$

Для решения задачи необходимо найти функцию $u_n(t)$:

$$u_n(t) = \frac{2 \exp(-\beta^2 D t)}{x_0^2 (\alpha^2 + \beta^2) (\alpha^2 + \beta^2 D)} \left[\exp(\alpha x_0) \left(\pi n - \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2} \right) (-1)^n + \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2} \right] \\ [p(\alpha^2 + \beta^2 D) + q(\exp(\alpha^2 + \beta^2 D)t - 1)] + \beta[1 - \exp(-\alpha x_0)(-1)^n] \\ \left[p(\exp(\alpha^2 + \beta^2 D)t - 1) + q(\exp(\alpha^3 + \beta^2 D)t) \left(\left(t - \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2 D} \right) + \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2 D} \right) \right],$$

где: $\alpha = \frac{v_e}{2D}, \beta = \frac{\pi n}{x_0}$.

Количество осажденных частиц за промежуток времени Δt_i на единице площади стенки:

$$I_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (D/x_0) \left[p_i + q_i t + \exp \left(\frac{-v_e^2 t}{4D} \right) \Phi(t) \right] dt.$$

Для получения полного количества частиц на единице площади стенки за время T необходимо найти сумму $\sum_0^m I_i$ при заданном числе участков разбиения и их шаге.

Коэффициенты участков прямой p_i, q_i для нахождения граничного условия $N(x_0, t)$ равны:

$$p_i = a + b \ln \left(\frac{t_{i-1} + t_0}{t_0} \right), q_i = (b/h) \ln \left(\frac{t_i + t_0}{t_{i-1} + t_0} \right),$$

где a и b определяются из экспериментальной кривой $N(t)$.

Зависимость массы осажденного вещества от потока выражается формулой:

$$g(t) = I(t) \frac{4}{3} \pi \bar{r}_0^3 d S,$$

где $\bar{r}_0^3$ - среднее значение радиуса частицы, d – плотность частицы износа, S – площадь, на которой происходит осаждение.

3.4.3 Выбор значений и результаты.

Для нахождения массы осажденного вещества использовали следующие значения:

- Составляющая скорости вследствие электрофоретического переноса $v_e = 2.8 * 10^{-9} \text{ м/с}$;
- Площадь осаждения $S = 804 \text{ мм}^2$;
- Средний радиус частиц $\bar{r}_0 = 0.06 \text{ мкм} = 0.6 * 10^{-7} \text{ м}$;
- Коэффициент диффузии: $D = 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$;
- Плотность частицы износа: $d = 8,9 \text{ г/см}^3$;
- Толщина зазора: $h = 0.6 \text{ мкм} = 0.6 * 10^{-6} \text{ м}$.

Получены расчетные значения зависимости массы осажденного вещества от времени (пройденного пути) для меди и цинка по которым построен график (Рис.3.3).

Расчетные данные для значений массы осажденного вещества и потока вещества в контрольных точках для меди.

```

File Edit View Search Terminal Help
[root@localhost dissertation]# ./a.out
t = 70; I(70) = 3.19459e+22; g(70) = 65.8344
t = 210; I(210) = 3.71455e+22; g(210) = 76.5498
t = 350; I(350) = 4.08958e+22; g(350) = 84.2786
t = 700; I(700) = 4.18473e+22; g(700) = 86.2394
t = 1400; I(1400) = 4.35138e+22; g(1400) = 89.6738
t = 2100; I(2100) = 4.38283e+22; g(2100) = 90.3218
[root@localhost dissertation]#

```

Расчетные данные для значений массы осажденного вещества и потока вещества в контрольных точках для цинка.

```

File Edit View Search Terminal Help
[root@localhost dissertation]# ./a.out
t = 0; g(0) = 36.05
t = 70; I(70) = 1.71726e+22; g(70) = 35.3895
t = 210; I(210) = 1.14085e+22; g(210) = 23.5108
t = 350; I(350) = 8.4622e+21; g(350) = 17.439
t = 700; I(700) = 5.08856e+21; g(700) = 10.4866
t = 1400; I(1400) = 4.94482e+21; g(1400) = 10.1903
t = 2100; I(2100) = 4.47904e+21; g(2100) = 9.23046
[root@localhost dissertation]#

```

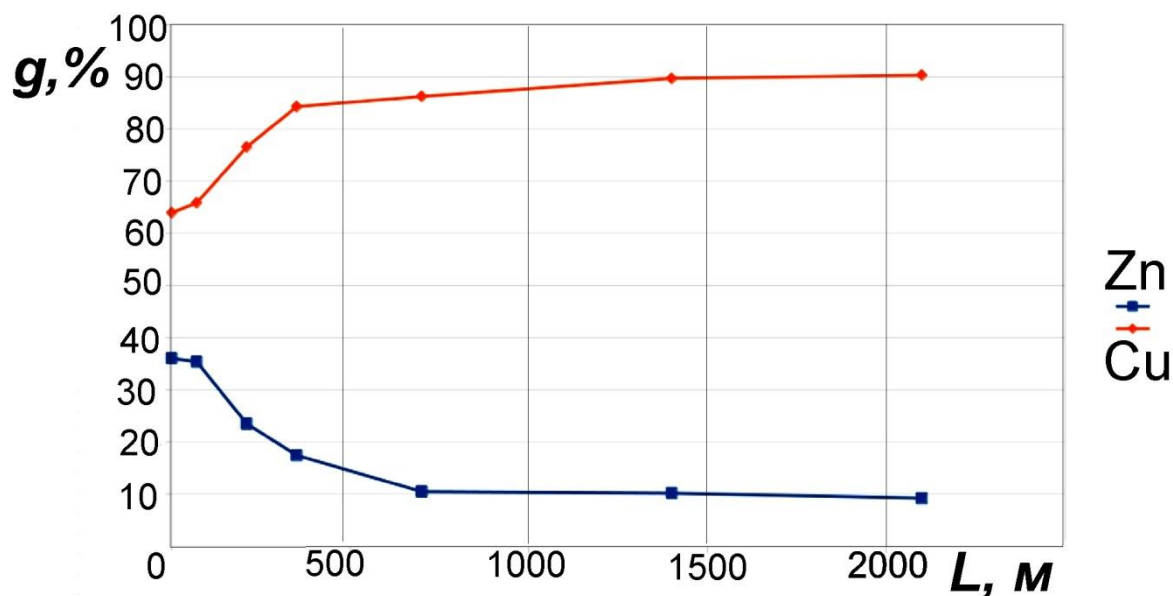


Рисунок 3.3 - Расчетные значения изменения содержания меди и цинка в поверхностном слое в зависимости от времени (пути трения)

4 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРИАДЫ ТРЕНИЯ

4.1 Влияние пути трения пары антифрикционный сплав-сталь на изменение микрогеометрии поверхностного слоя трибосопряжений

Внешнее трение подвижных сопряжений характеризуется сложными механо-физико-химическими процессами. Взаимодействие подвижных сопряжений определяет фактическую площадь контакта, адсорбцию поверхностно-активных веществ смазочного материала, а также химическое взаимодействие окружающей среды с поверхностными слоями металла. Микрогеометрия поверхностных слоев металла оказывает существенное влияние на вид контактного взаимодействия металлических пар.

Скольжение пары антифрикционный сплав-сталь в начальный период характеризуется процессом приработки, на который большое влияние оказывает смазочный материал. Процесс приработки сопровождается изменением характеристик поверхностных свойств, так как при изнашивании пары латунь Л63-сталь имеют место пластические деформации [36].

В результате процесса приработки устанавливается некоторая микрогеометрия поверхностных слоев трибосопряжений, характерная для конкретных условий работы подвижных сопряжений.

В работе проводилась оценка влияния пути трения и смазочных материалов на изменение микрогеометрии поверхностных слоев пары антифрикционный сплав-сталь. Результаты изменения микрогеометрии поверхностей трения пары колодка-ролик, изношенных в смазочных материалах при удельной нагрузке 6 МПа, скорости скольжения 1 м/с и пути трения 70; 210; 350; 700; 1400; 2100 м были получены с использованием профилографа-профилометра завода «Калибр» модели 170311.

На рис. 4.1 представлены профилограммы, полученные с поверхностного слоя образцов колодки и ролика до работы. Поверхностный слой образца из стали до работы характеризовался величиной $R_a=0,74$ мкм –

средним арифметическим отклонением неровностей профиля от средней линии, $R_z=2,29$ мкм – высотой неровностей по 10 точкам, $R_{\max}=3,61$ мкм – максимальной высотой неровностей профиля и $S_m=53,9$ мкм – средним арифметическим расстоянием между вершинами волн. Поверхностный слой образца колодки из латуни Л63 имел величину $R_a=0,32$ мкм и $R_{\max}=1,91$ мкм.

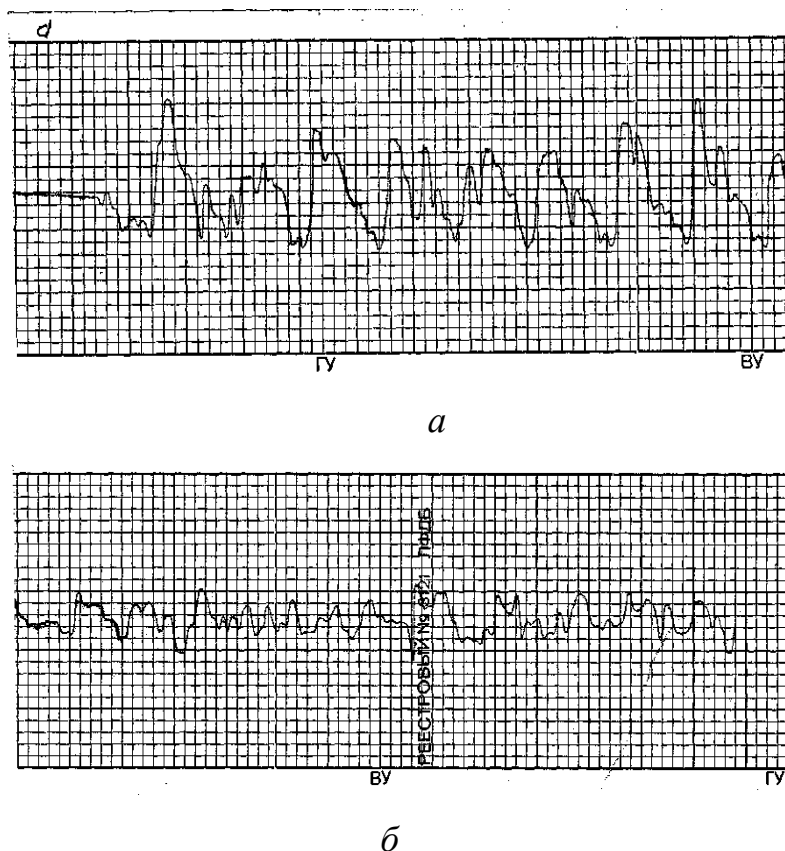
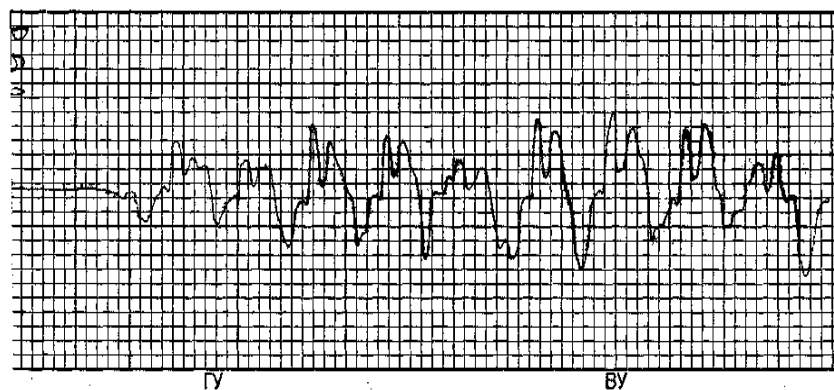
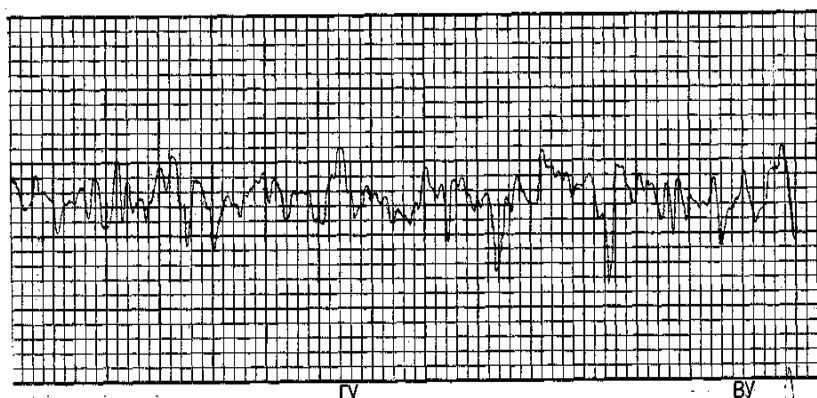


Рисунок 4.1 - Профилограммы с поверхностного слоя ролика (а) и колодки (б) до работы. (ВУх10000, ГУх200)

После изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь на пути трения 70 м в глицерине с поверхностного слоя образцов были получены профилограммы, которые представлены на рис.4.2. Можно отметить, что если среднее арифметическое отклонение неровностей профиля от средней линии образца ролика до работы имела величину $R_a=0,74$ мкм, то после изнашивания в глицерине в паре с колодкой из латуни характеризуется значением $R_a=0,7$ мкм. Если до работы колодка из латуни имела $R_a=0,32$ мкм, то после изнашивания на пути трения 70 м она характеризуется величиной $R_a=0,30$ мкм.



а



б

Рисунок 4.2 - Профилограммы с зоны трения ролика (а) и колодки (б), работавших в глицерине на пути трения 70 м (ВУх10000, ГУх200)

Дальнейшее увеличение пути трения пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине от 70 м до 2100 м ведет к снижению величин среднего арифметического отклонения неровностей профиля от средней линии, как зоны трения стального образца, так и антифрикционного сплава. Профилограммы снятые с зоны трения пары колодка-ролик, работавших в глицерине на пути трения 210, 350, 700, 1400 и 2100м представлены на рис. 4.3-4.7. В таблице 4.1 обобщены результаты исследования изменения микрогеометрии поверхностного слоя пары антифрикционный сплав-сталь, изношенных в глицерине.

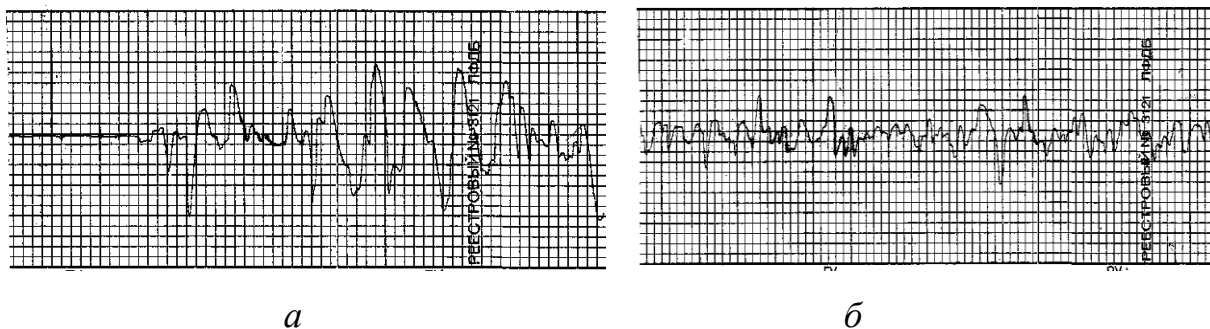


Рисунок 4.3 - Профилограммы с зоны трения ролика (а) колодки и (б), изношенных в глицерине на пути трения 210 м (ВУх10000, ГУх200)

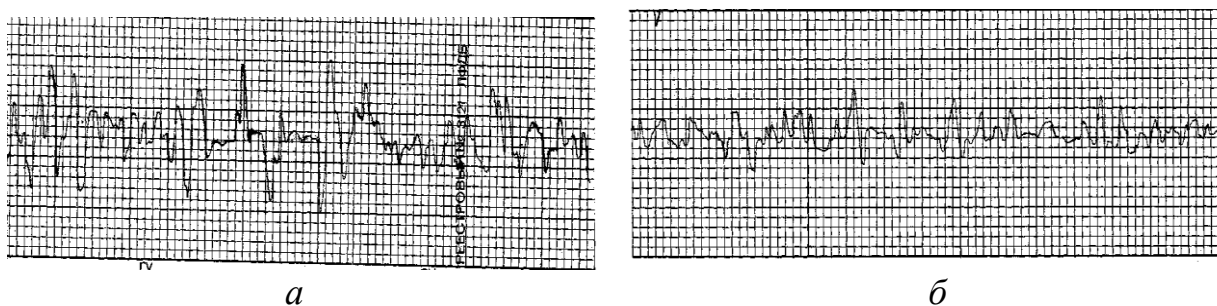


Рисунок 4.4 - Профилограммы с зоны трения ролика (а) колодки и (б), работавших в глицерине на пути трения 350 м (ВУх10000, ГУх200)

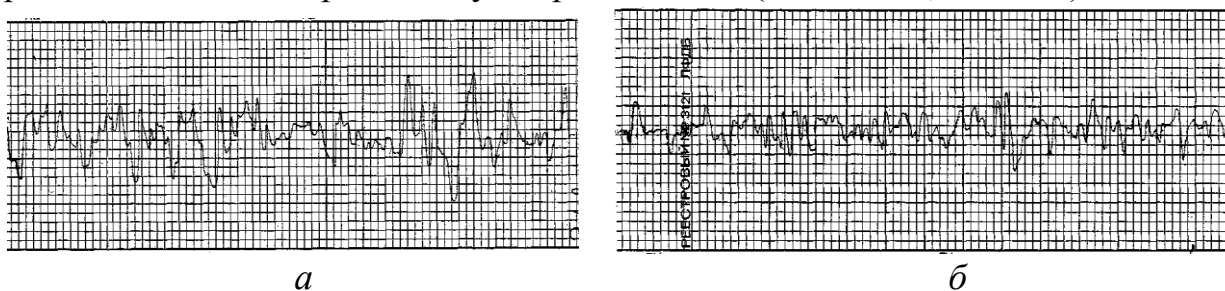


Рисунок 4.5 - Профилограммы с зоны трения ролика (а) и колодки из сплава Л-63 (б), изношенных на пути трения 700 м (ВУх10000, ГУх200)

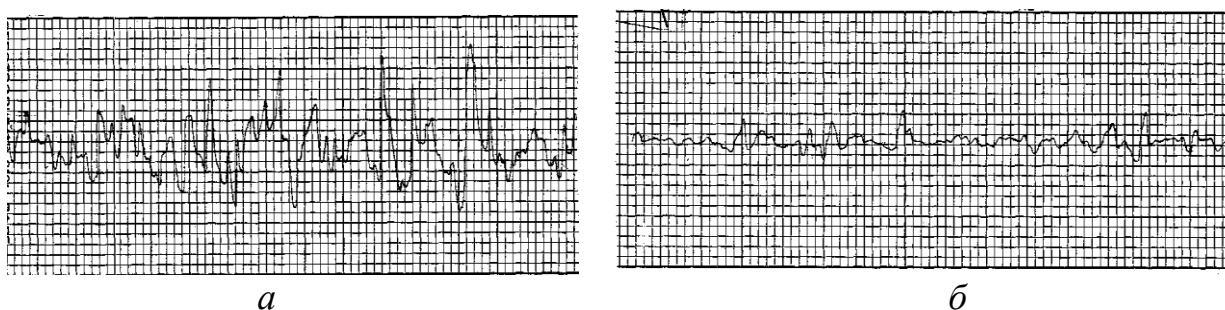


Рисунок 4.6 - Профилограммы с поверхностного стального ролика (а) и слоя латуни (б) после изнашивания на пути трения 1400 м (ВУх10000, ГУх200)

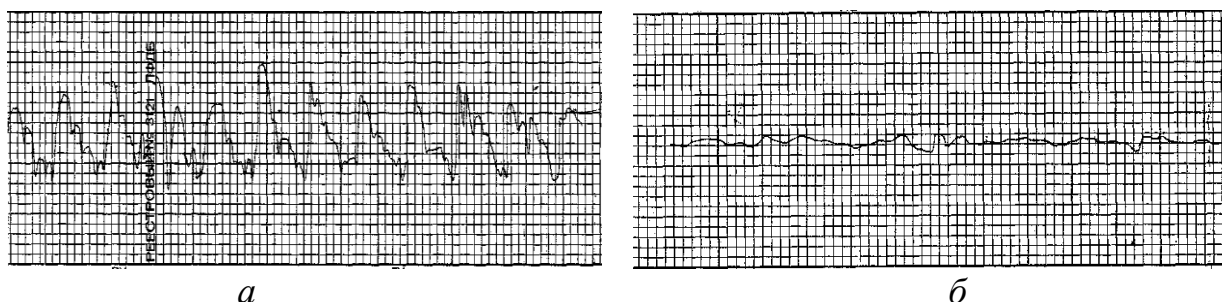


Рисунок 4.7 - Профилограммы с зоны трения ролика (а) и колодки (б), изношенных на пути трения 2100 м в глицерине (ВУх10000, ГУх200)

Таблица 4.1

Изменение характеристик микрогеометрии поверхностного слоя пары медный сплав-сталь от пути трения в глицерине
($P=6$ МПа, $V=1$ м/с)

№№ п/п	Путь трения, м	Ролик, мкм				Колодка, мкм			
		R_a	R_z	R_{max}	S_m	R_a	R_z	R_{max}	S_m
1	Исходная	0,74	2,29	3,61	53,9	0,32	1,39	1,91	46,0
2	70	0,71	2,19	3,52	49,2	0,30	1,32	1,99	43,3
3	210	0,63	1,87	3,87	55,4	0,27	1,19	1,76	33,7
4	350	0,60	2,16	3,47	41,2	0,25	0,95	1,56	44,5
5	700	0,58	2,06	3,44	47,7	0,23	1,01	1,53	35,9
6	1400	0,56	1,97	3,15	56,0	0,17	0,54	1,03	66,6
7	2100	0,52	1,58	2,45	57,1	0,12	0,39	0,93	232,1

Данные, представленные в таблице 4.1, позволяют констатировать, что в исследованном в работе изменении пути трения пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине имеет место снижение величин, как зоны трения стального образца, так и антифрикционного сплава. Если до работы поверхностный слой образца из латуни имел величину $R_a=0,32$ мкм, то после изнашивания в глицерине на пути трения 2100 м зона трения характеризуется значением $R_a=0,12$ мкм. Среднее арифметическое отклонение неровностей профиля от средней линии стального образца уменьшилось с $R_a=0,74$ мкм до $R_a=0,52$ мкм на пути трения 2100 м при работе пары сталь-антифрикционный сплав в глицерине.

В таблице 4.2 представлены результаты исследования изменения характеристик микрогеометрии пары антифрикционный сплав-сталь,

работавшей в индустриальном масле И-40А при аналогичных параметрах испытаний с парой колодка-ролик в глицерине.

Таблица 4.2

Влияние смазочного материала на микрогеометрию поверхностного слоя пары медный сплав-сталь от пути трения ($P=6\text{МПа}$, $V=1\text{м/с}$)

№№ п/п	Путь трения, м	Характеристики микрогеометрии, мкм							
		Ролик				Колодка			
		R_a	R_z	$R_{\max}$	S_m	R_a	R_z	$R_{\max}$	S_m
1	Исходная	0,74	2,20	3,40	68,5	0,32	1,40	2,0	65,3
2	70	0,75	2,40	3,70	80,4	0,47	1,90	2,90	65,3
3	210	0,71	2,30	3,40	47,1	0,43	1,80	3,20	77,4
4	350	0,70	2,20	3,50	63,0	0,42	1,50	2,40	81,0
5	700	0,66	2,00	3,40	67,2	0,38	1,60	2,40	80,5
6	1400	0,61	1,71	2,77	56,1	0,33	1,50	2,30	74,8
7	2100	0,58	1,85	3,30	67,7	0,30	1,30	1,90	64,8

Рассмотрение данных об изменении микрогеометрии пары латунь-сталь в глицерине и в индустриальном масле (табл.4.1 и 4.2) в зависимости от пути трения свидетельствует о том, что в зоне трения трибосопряжений происходят различные механо-физико-химические процессы. Если при изнашивании пары колодка-ролик в глицерине в исследованном диапазоне изменения пути трения отмечается снижение величины R_a , то при изнашивании пары антифрикционный сплав-сталь в индустриальном масле И-40А в начальный период взаимодействия пары колодка-ролик (70м) имеет место увеличение значения R_a по сравнению с величиной R_a антифрикционного сплава до работы. Это может быть связано с внедрением более жестких микронеровностей стального образца в поверхность менее жесткого антифрикционного сплава.

Формирование на поверхностях трения пары антифрикционный сплав-сталь при работе подвижных сопряжений в глицерине медьсодержащей пленки способствует снижению величин характеристик микрогеометрии зоны трения, увеличению площади фактического контакта снижению

удельных контактных напряжений и повышению износостойкости трибосопряжений.

4.2 Рентгеноспектральные исследования зоны трения пары медный сплав-сталь

Проведенные исследования процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине показали, что образование на поверхностях трения медьсодержащей пленки, которая видна визуально, способствует значительному повышению износостойкости трибосопряжений по сравнению с триботехническими характеристиками подвижных сопряжений, работавших в индустриальном масле.

С целью изучения процессов, протекающих в начальной стадии взаимодействия пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине нами проведены рентгеноспектральные исследования как зоны трения стального образца, так и антифрикционного сплава в широком диапазоне изменения пути трения.

На рис. 4.8 представлен вид зоны трения антифрикционного сплава до работы в режиме упруго-отраженных электронов. Поверхностный слой латуни характеризуется микронеровностями, которые сформировались в процессе технологической обработки. Некоторые риски имеют размытый характер, что видимо связано с образованием окисленных соединений в результате взаимодействия кислорода воздуха с поверхностным слоем антифрикционного сплава.

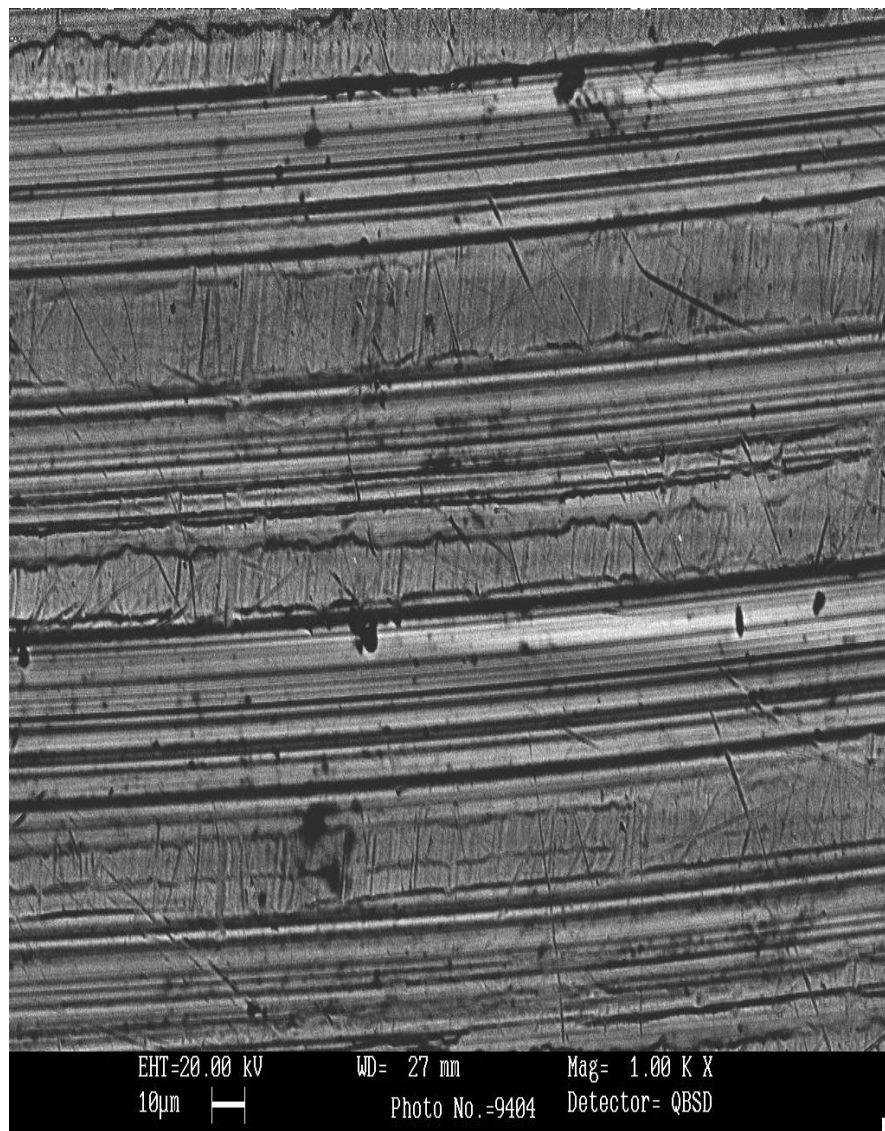


Рисунок 4.8 - Вид зоны трения латуни до работы в режиме упруго отраженных электронов (x1000)

Результаты локального рентгеноспектрального анализа поверхностного слоя латуни до работы представлены на рис. 4.9 и 4.10, а также в таблице 4.3, которые показали, что среднее содержание меди в латуни Л63 составляет 63,95%, а цинка соответственно 36,05%. Анализ данных, представленных на рис.4.9 и 4.10 и в таблице 4.3, свидетельствует о том, что медь и цинк в поверхностном слое антифрикционного сплава Л63 распределены равномерно.

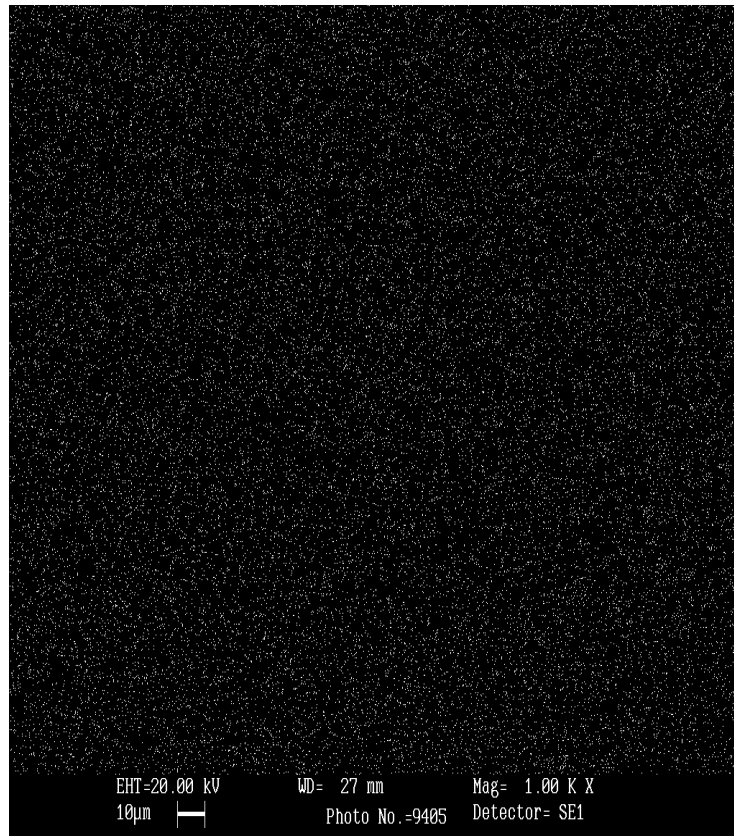


Рисунок 4.9 Рентгеноспектральное распределение меди в поверхностном слое латуни до работы (x1000)

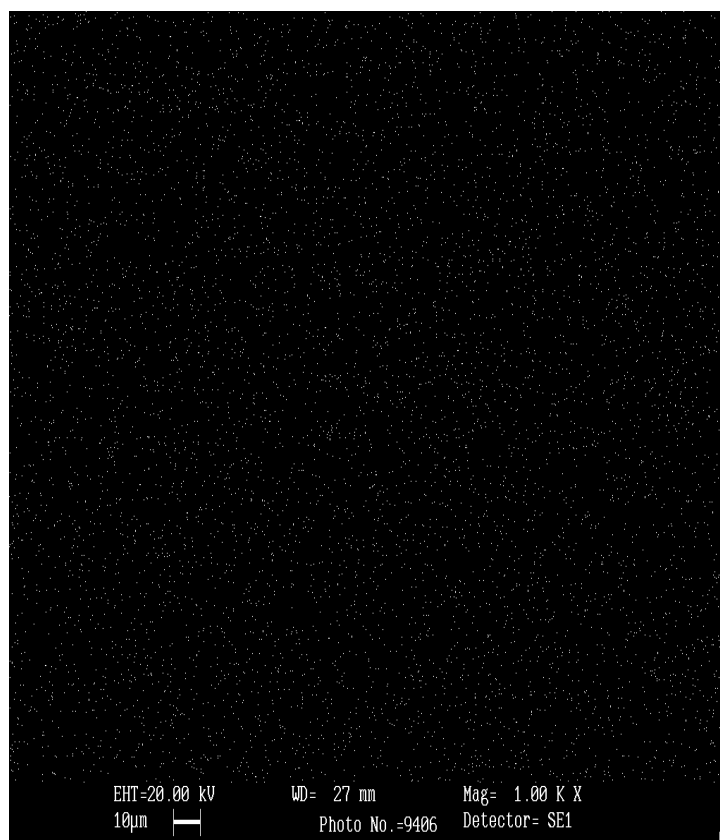


Рисунок 4.10 Рентгеноспектральное распределение цинка в поверхностном слое латуни до работы (x1000)

Таблица 4.3

Рентгеноспектральный анализ поверхностного слоя латуни до работы

№№ п/п	Путь трения	Весовое содержание, %	
		медь	цинк
1	До работы	64,63	35,37
		63,30	36,70
		63,94	36,06
	среднее	63,95	36,05

На рис. 4.11-4.16 представлены зоны трения медного сплава, изношенного в глицерине в паре со стальным образцом.

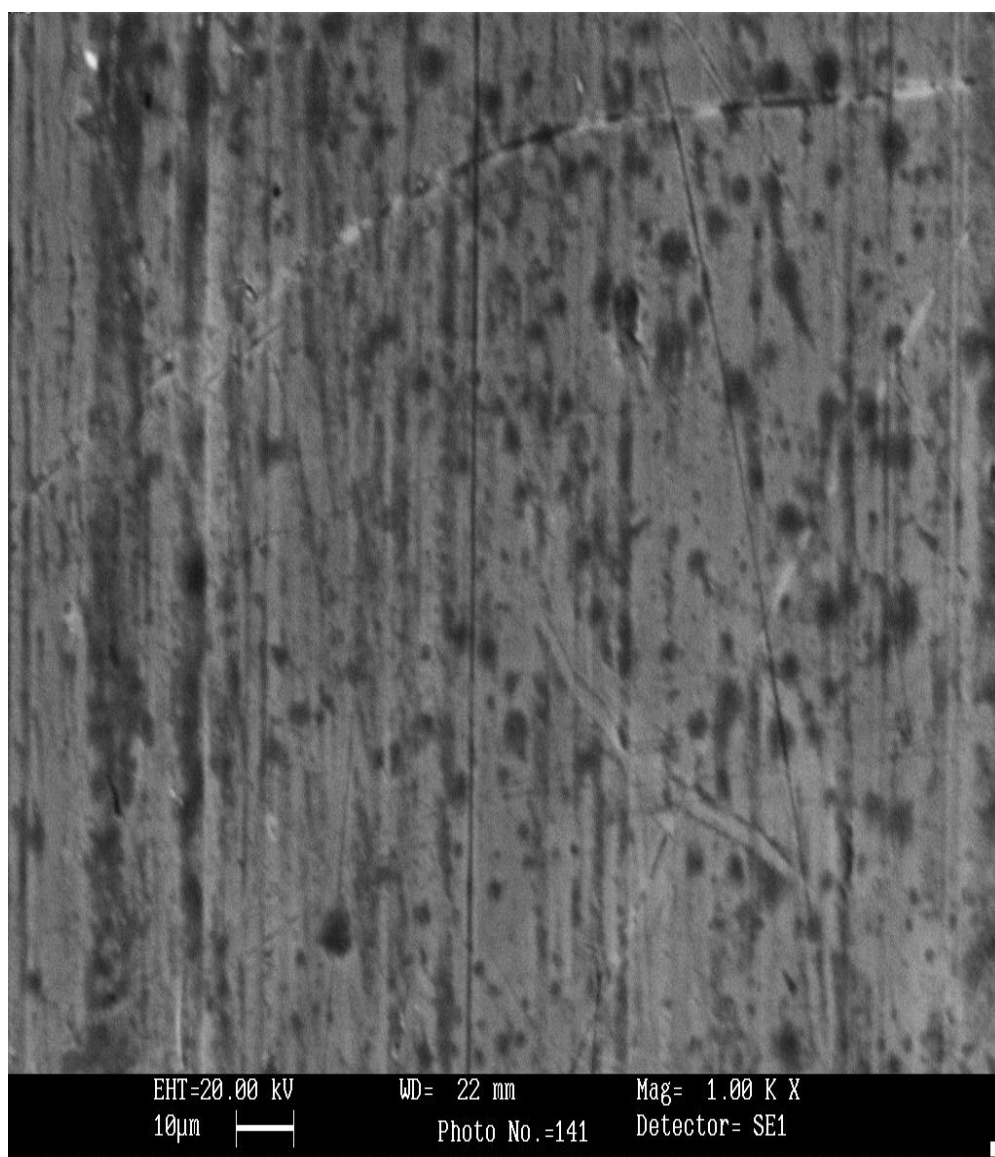


Рисунок 4.11 Вид зоны трения образца из медного сплава, изношенного в глицерине (путь трения 70 м) в режиме вторичных электронов (x1000)

Рассмотрение данных, представленных на рис.4.11 позволяет отметить, что вид зоны трения антифрикционного сплава после изнашивания на пути 70 м резко отличается от характера поверхностного слоя латуни до работы. Зона трения латуни практически не имеет рисок от технологической обработки. Видны следы химического взаимодействия среды с поверхностным слоем антифрикционного сплава в виде темных участков.



Рисунок 4.12 Вид зоны трения медного сплава, изношенного в глицерине со стальным роликом на пути трения 210 м (x1000)

Также можно отметить, что в процессе взаимодействия триады трения поверхностный слой латуни пластически деформирован. В зоне трения антифрикционного сплава отмечается наличие рисок от режущего действия частиц износа.



Рисунок 4.13 Вид зоны трения колодки из сплава Л63 в режиме вторичных электронов, изношенной в глицерине на пути трения 350 м (x1000)

Видимо, абразивное действие в зоне трения латуни производят окисленные соединения меди, твердость которых выше, чем основного металла [79]. Увеличение времени работы пары латунь-сталь в глицерине показало, что во всех исследованных случаях (рис.4.12-4.16) видны следы взаимодействия абразивных частиц с поверхностным слоем антифрикционного сплава. С увеличением пути трения от 70 м до 2100 м качество поверхностного слоя латуни повышается. В зонах трения антифрикционных сплавов имеются темные пятна, которые, видимо, связаны с химическим взаимодействием среды.

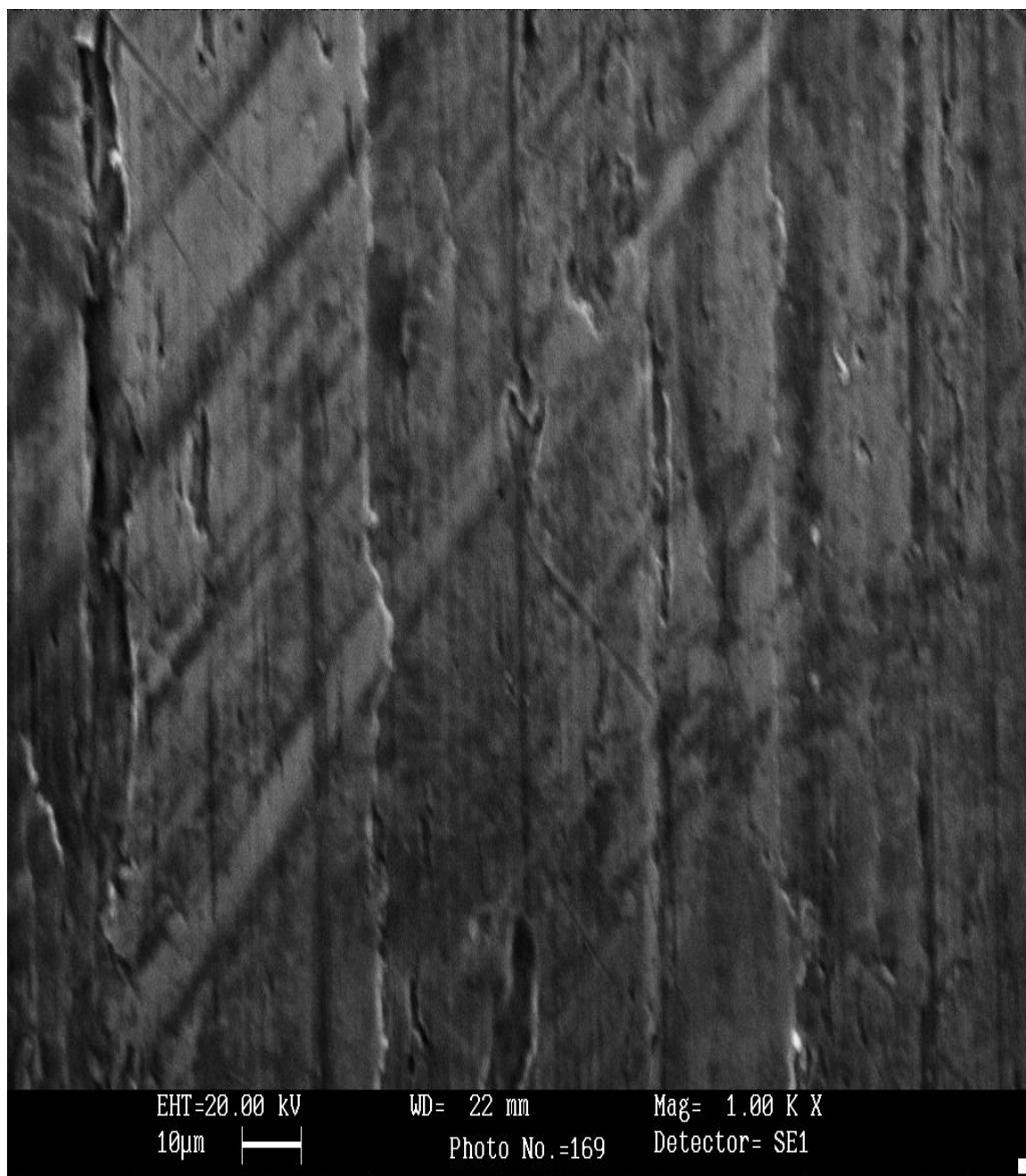


Рисунок 4.14 Вид зоны трения колодки из сплава Л63, изношенной в глицерине со стальным роликом, в режиме вторичных электронов на пути трения 700 м (x1000)

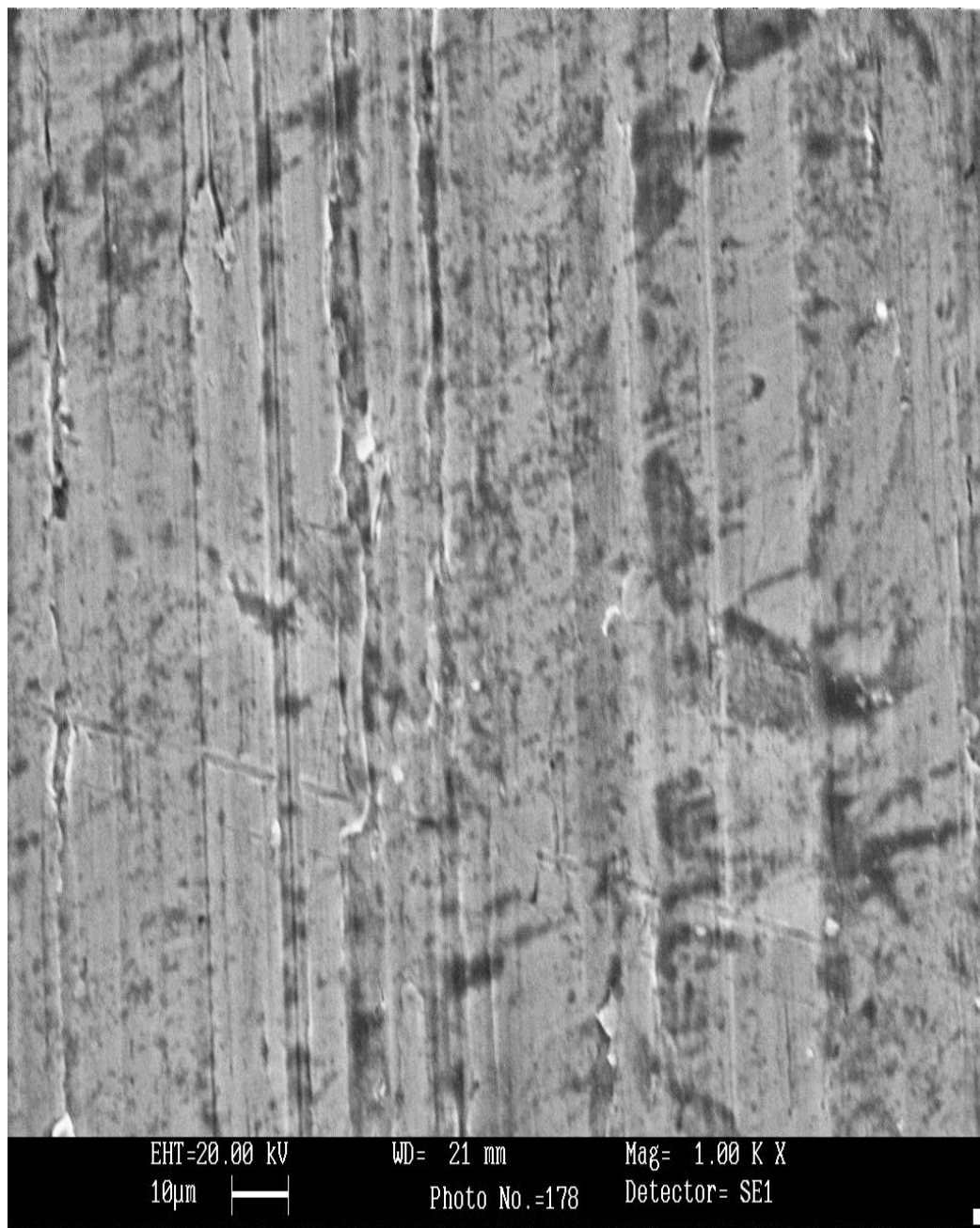


Рисунок 4.15 Вид зоны трения медного сплава, в режиме вторичных электронов, работавшего в глицерине на пути трения 1400 м (x 1000)

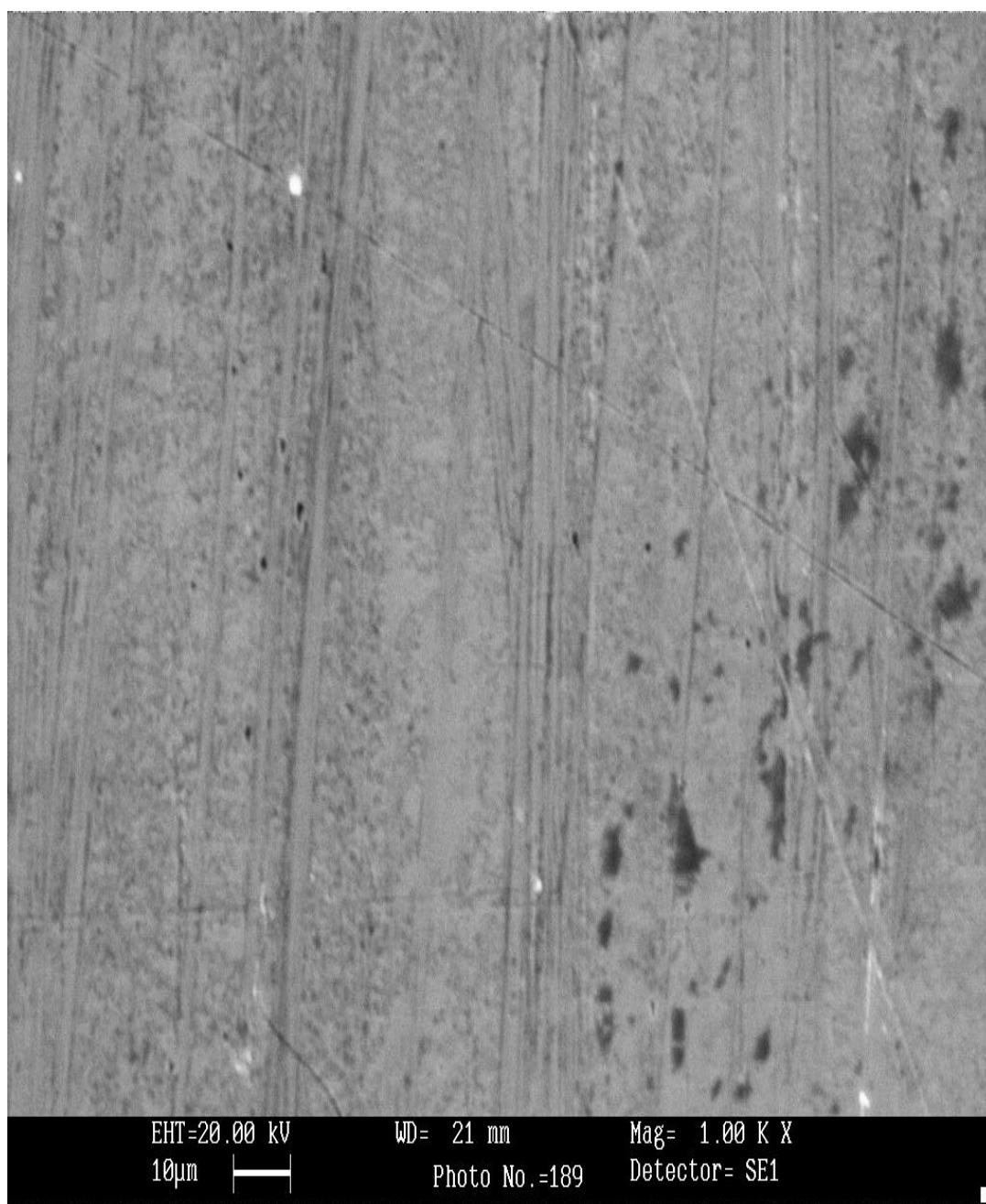


Рисунок 4.16 Вид зоны трения колодки из медного сплава в режиме вторичных электронов, изношенной в паре с роликом из стали 40ХН в глицерине на пути трения 2100 м (x1000)

Нами выполнялись рентгеноспектральные исследования содержания меди в зоне трения латуни на пути трения от 70 м до 2100 м после изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь, которые представлены на

рис.4.17-4.22 (в Приложении к главе 4). Эксперименты показали, что с увеличением пути трения содержание меди в зоне трения антифрикционного сплава увеличивается. Можно отметить, что на пути трения 70м - 2100м при изнашивании пары латунь-сталь в глицерине содержание цинка в зоне трения антифрикционного сплава уменьшается, что видно из данных, представленных на рис. 4.23-4.28 (в Приложении к главе 4).

Результаты рентгеноспектрального анализа по изменению содержания меди и цинка в зоне трения антифрикционного сплава, изношенного в паре со стальным образцом в глицерине на пути трения 70 м-2100м, представлены на рис. 4.29 и в таблице 4.4.

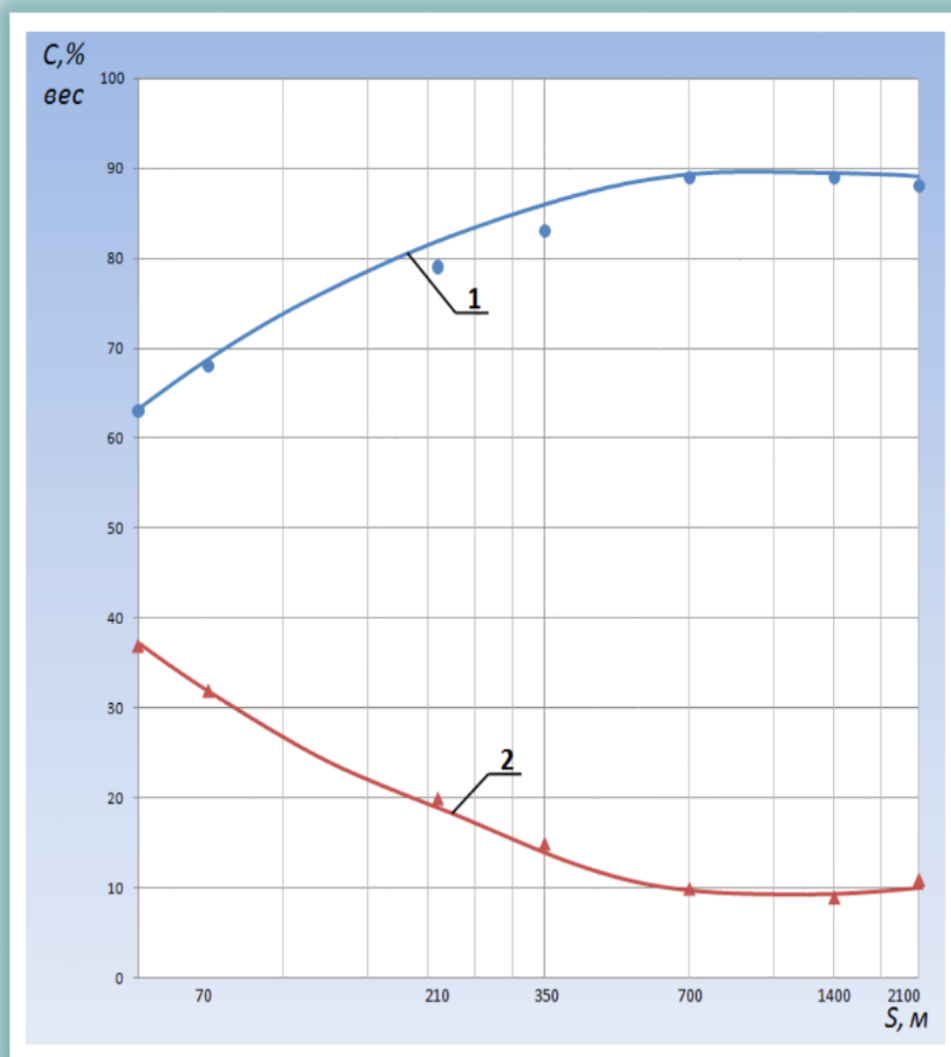


Рисунок 4.29 Изменение состава поверхностного слоя латуни от пути трения пары медный сплав-сталь в глицерине: 1- медь; 2- цинк.

Таблица 4.4

Изменение содержания элементов в зоне трения
латуни, изношенной в паре со стальным образцом
в глицерине

№№ п/п	Путь трения, м	медь		цинк	
		Вес. %	Ат. %	Вес. %	Ат. %
1.	До работы	64,63 63,30 63,94		35,37 36,70 36,06	
среднее		63,95		36,05	
2.	70	67,37 65,99 69,33	67,99 66,63 69,93	32,63 34,01 30,67	32,01 33,37 30,07
среднее		67,56	68,18	32,44	31,82
3.	210	77,16 78,32 83,10	77,65 78,80 83,50	22,84 21,68 16,90	22,35 21,20 16,50
среднее		79,53	79,98	20,47	20,15
4.	350	84,21 87,03 79,80	84,59 87,34 80,25	15,79 12,97 20,20	15,41 12,66 19,75
среднее		83,68	84,06	16,32	15,94
5.	700	86,51 93,27 90,19	86,17 93,09 89,93	13,49 6,73 9,81	13,83 6,91 10,07
среднее		89,99	89,73	10,27	10,01
6.	1400	89,80 90,22 88,54	90,30 90,47 88,82	10,20 9,78 11,46	9,70 9,53 11,18
среднее		89,52	89,86	10,48	10,14
7.	2100	85,50 91,01 91,00	88,47 83,90 95,32	14,50 8,99 9,00	11,44 12,10 8,31
среднее		89,17	89,20	10,83	10,80

Анализируя результаты рентгеноспектральных анализов содержания меди и цинка в поверхностном слое латуни, можно отметить, что в поверхностном слое латуни среднее содержание меди до работы составляло 63,95%, а после изнашивания в глицерине на пути трения 2100 м содержание меди в зоне трения увеличилось до значения 89,17%. Если содержание цинка в поверхностном слое латуни до работы составило 36,05%, то после

изнашивания в глицерине в паре со стальным образцом среднее содержание цинка в зоне трения латуни на пути трения 2100 м составило 10,83%.

Следует отметить, что полученные экспериментальные данные по изменению содержания массовых значений цинка и меди в латуни при трении по стали, находятся в полном соответствии с рассчитанными по разработанной математической модели взаимодействия (см. главу 3, п.3.3).

Таким образом, при изнашивании пары латунь-сталь в глицерине при удельной нагрузке 6 МПа и скорости скольжения 1 м/с с увеличением пути трения от 70 м до 2100 м происходит снижение содержания цинка в зоне трения антифрикционного сплава более чем в 3 раза и увеличение содержания меди.

В работе выполнялись исследования по изменению топографии зоны трения стального образца, работавшего в паре с антифрикционным сплавом в глицерине, и проводился локальный рентгеноспектральный анализ по оценке содержания элементов медного сплава в зоне трения стального образца, результаты которого представлены на рис.4.30-4.35.

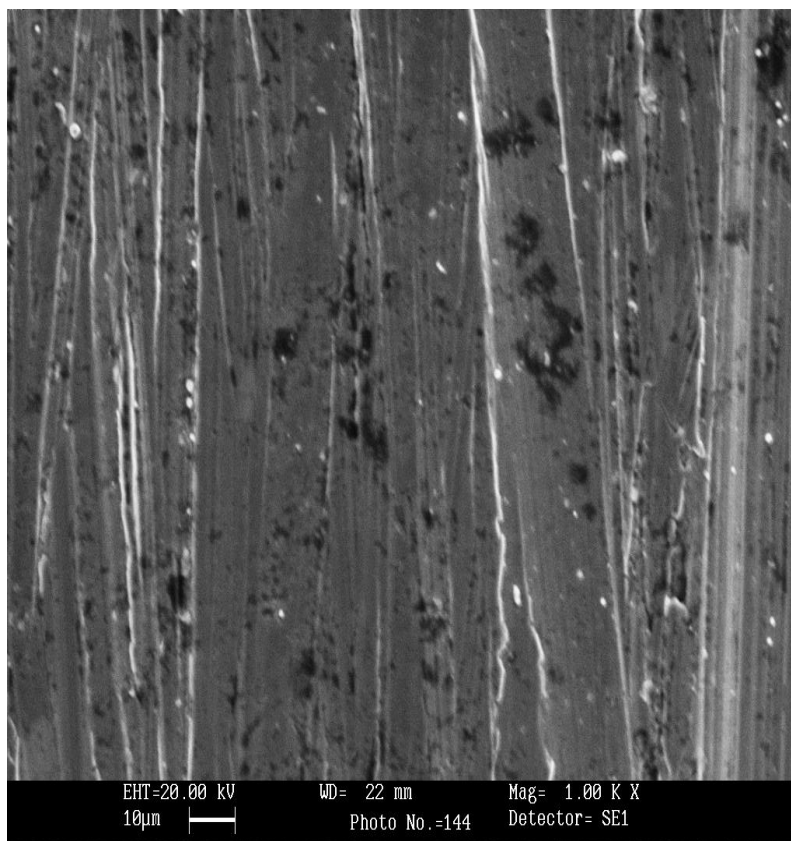


Рисунок 4.30 Вид зоны трения стального образца в режиме вторичных электронов, изношенного в глицерине (путь трения 70 м) (x1000)

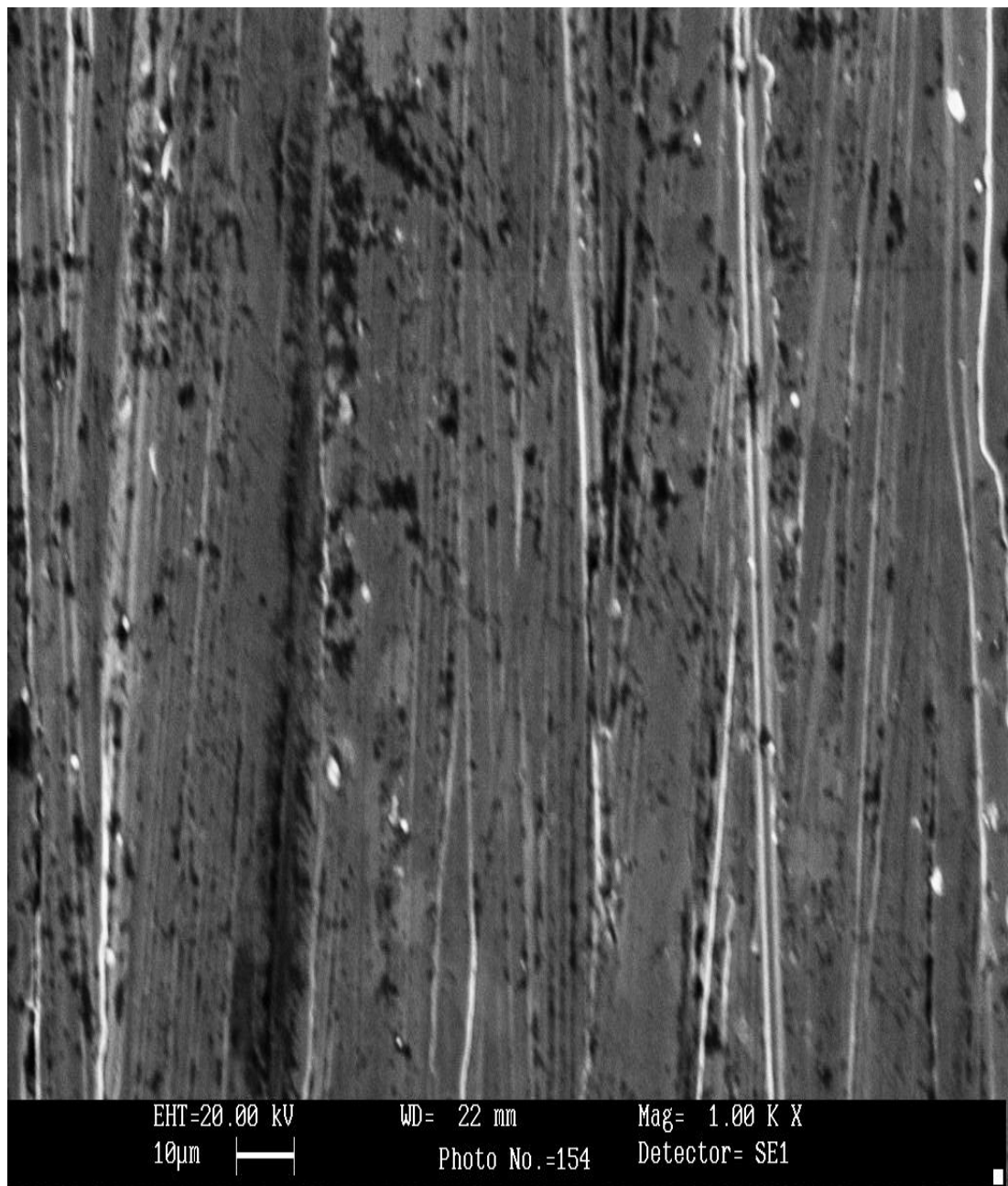


Рисунок 4.31 Вид зоны трения стального образца в режиме вторичных электронов после изнашивания в паре с медным сплавом на пути трения 210 м (x1000)



Рисунок 4.32 Вид зоны трения стального ролика в режиме вторичных электронов, изношенного в паре с медным сплавом на пути трения 350 м (x1000)



Рисунок 4.33 - Вид зоны трения стального ролика в режиме вторичных электронов, изношенного в глицерине на пути трения 700 м (x1000)



Рисунок 4.34 Вид зоны трения стального образца в режиме вторичных электронов, изношенного в глицерине на пути трения 1400 м (x1000)

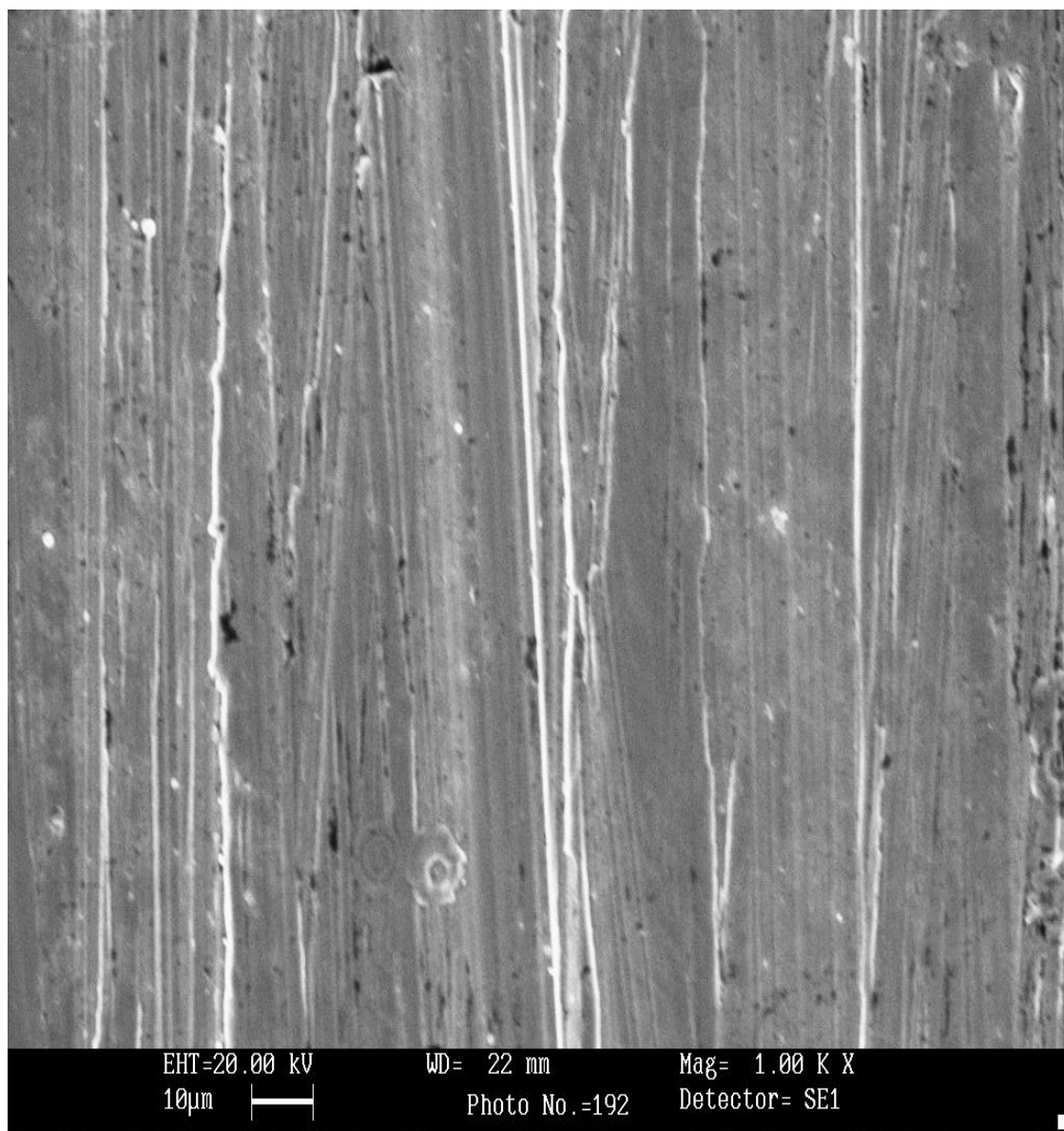


Рисунок 4.35 Вид зоны трения стального образца в режиме вторичных электронов, работавшего в глицерине на пути трения 2100 м (x1000)

Из данных, представленных на рис.4.30, видно, что на пути трения 70 м при работе пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине в зоне трения стального образца отсутствуют риски от технологической обработки поверхностного слоя. В зоне трения стального образца видны темные пятна, наличие которых, возможно, связано с химическим взаимодействием среды с поверхностным слоем металла. Количество темных пятен в зоне трения стального образца с увеличением пути трения повышается и достигает максимального значения на пути трения 1400 м (рис.4.34). На пути трения 2100 м пары антифрикционный сплав-сталь (рис.4.35) в глицерине темные

пятна практически отсутствуют, а зона трения характеризуется светлыми включениями, наличие которых свидетельствует о том, что в зоне трения присутствуют легкие элементы.

Выполненные рентгеноспектральные исследования по изучению топографии зоны трения стального образца показали, что качество поверхностного слоя стального образца с увеличением пути трения повышается.

Нами выполнялся локальный рентгеноспектральный анализ зоны трения стального образца с целью оценки содержания железа, никеля и хрома, входящих в состав стали 40ХН, а также наличия в поверхностном слое стального образца элементов антифрикционного сплава.

На рис. 4.36-4.38 представлены результаты локального рентгеноспектрального анализа по распределению железа, никеля и хрома в зоне трения стального образца, изношенного в паре с латунью в глицерине на пути трения 70 м.

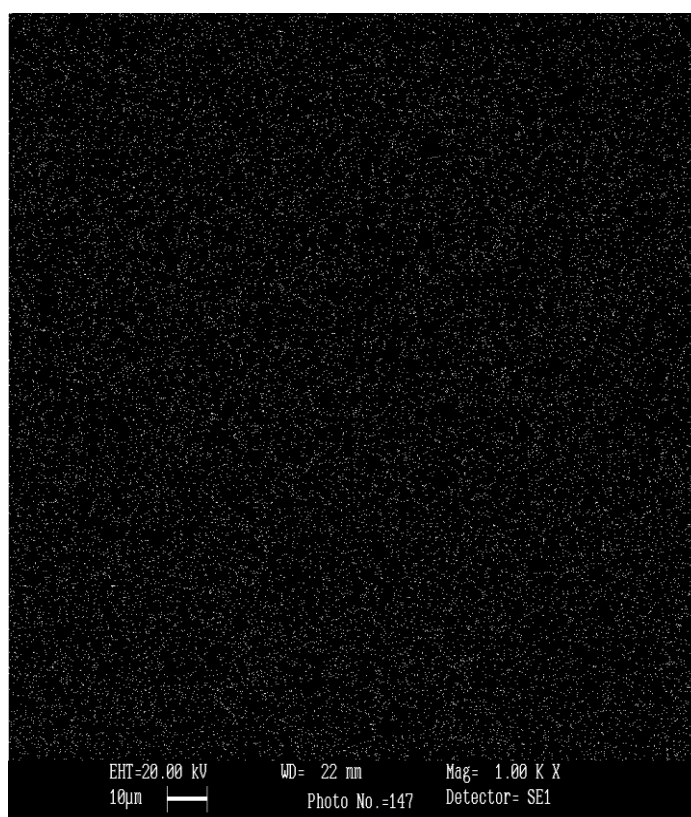


Рисунок 4.36 - Рентгеноспектральное распределение железа в зоне трения стального образца, работавшего в глицерине (x1000) на пути трения 70 м.



Рисунок 4.37 - Рентгеноспектральное распределение хрома в зоне трения стального образца, работавшего в глицерине (x1000), путь трения 70 м



Рисунок 4.38 - Рентгеноспектральное распределение никеля в зоне трения стального образца (x1000), путь трения 70 м

Дальнейшее увеличение пути трения от 70 м до 2100м показало, что содержание железа, никеля и хрома в зоне трения стального образца мало изменяется.

Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения стального образца, работавшего в глицерине в паре с антифрикционным сплавом на пути трения от 70 м до 2100 м представлено на рис. 4.39-4.44 (в Приложении к главе 4). Эксперименты показали, что содержание меди в зоне трения стального образца с увеличением пути трения повышается. Медь в зоне трения стального образца при изнашивании в глицерине в паре с антифрикционным сплавом распределена не равномерно.

Локальный рентгеноспектральный анализ содержания цинка в зоне трения стального образца, после работы пары колодка-ролик при удельной нагрузке 6МПа и скорости скольжения 1 м/с на пути трения от 70м до 2100 м представлен на рис.4.45-4.50 (в Приложении). Анализ полученных данных позволяет отметить, что с увеличением пути трения от 70 м до 2100 м содержание цинка в зоне трения стального образца повышается. Цинк в зоне трения стального образца при изнашивании в глицерине в паре с антифрикционным сплавом распределен неравномерно.

В таблице 4.5 и на рис.4.51 представлены результаты локального рентгеноспектрального анализа зоны трения стального образца, работавшего в глицерине в паре с антифрикционным сплавом на пути трения от 70 до 2100 м. Анализ данных, представленных в таблице 4.5, свидетельствует о том, что медь и цинк в зоне трения стального образца распределены не равномерно, так как имеются участки зоны трения с различным их содержанием. Среднее весовое содержание меди и цинка с увеличением пути трения работы пары медный сплав-сталь в глицерине повышается. Если до работы в зоне трения стального образца медь и цинк отсутствовали, то на пути трения 2100 м пары колодка-ролик в глицерине содержание меди увеличилось до 2,8%, а цинка соответственно до 0,52% весового содержания.

Таблица 4.5

Изменение содержания некоторых элементов
в зоне трения стального образца

№№ п/п	Путь трения,м	Cu		Zn		Fe		Cr		Ni	
		Вес.%	Ат.%	Вес.%	Ат.%	Вес.%	Ат.%	Вес.%	Ат.%	Вес.%	Ат.%
1.	70	0,13	0,12	-	-	97,97	97,94	1,11	1,19	0,79	0,75
		0,28	0,25	0,65	0,56	97,45	97,53	1,03	1,11	0,58	0,55
		0,43	0,38	-	-	98,00	97,88	1,15	1,23	0,42	0,40
	среднее	0,28	0,25	0,22	0,19	97,80	97,82	1,09	1,17	0,59	0,56
2.	210	0,24	0,21	0,24	0,20	98,33	98,30	1,19	1,28	-	-
		0,06	0,05	-	-	98,67	98,62	0,97	1,04	0,30	0,38
		1,42	1,25	0,62	0,53	95,98	96,19	1,21	1,30	0,76	0,77
	среднее	0,57	0,59	0,29	0,24	97,66	97,70	1,12	1,21	0,35	0,38
3.	350	1,25	1,22	-	-	98,04	97,99	1,32	1,42	0,39	0,37
		1,48	1,42	0,55	0,47	97,98	97,36	1,11	1,20	0,58	0,55
		1,47	1,37	0,44	0,37	98,43	98,42	1,07	1,14	-	-
	среднее	1,40	1,39	0,33	0,28	98,15	97,92	1,16	1,25	0,32	0,31
4.	700	2,47	2,37	-	-	98,21	98,16	1,20	1,29	0,52	0,49
		2,36	2,31	0,65	0,56	91,38	92,14	1,12	1,21	0,29	0,28
		2,51	2,45	0,58	0,50	97,27	97,35	1,24	1,33	0,40	0,38
	среднее	2,44	2,37	0,41	0,35	95,62	95,88	1,19	1,28	0,40	0,38
5.	1400	2,22	2,19	0,50	0,40	97,08	97,13	0,85	0,91	1,86	1,77
		3,25	3,17	0,62	0,71	90,12	90,98	0,94	1,02	1,17	1,12
		2,69	2,26	0,15	0,05	94,26	94,68	0,84	0,90	1,15	1,10
	среднее	2,72	2,54	0,42	0,39	93,82	94,26	0,87	0,94	1,39	1,34
6	2100	3,78	3,50	0,61	0,56	98,95	98,45	1,24	1,34	0,16	0,16
		3,19	3,40	0,57	0,58	97,92	97,88	1,35	1,44	0,42	0,40
		1,13	1,30	0,38	0,40	98,48	98,32	1,11	1,19	0,44	0,42
	среднее	2,80	2,73	0,52	0,51	98,53	98,22	1,23	1,32	0,34	0,33

Анализ данных, представленных на рис.4.51, позволяет отметить, что если в диапазоне пути трения пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине 70 м и 210 м имеет место повышение содержания меди до 0,57% вес., то в диапазоне пути трения 210 м-700 м увеличение меди более значительно.

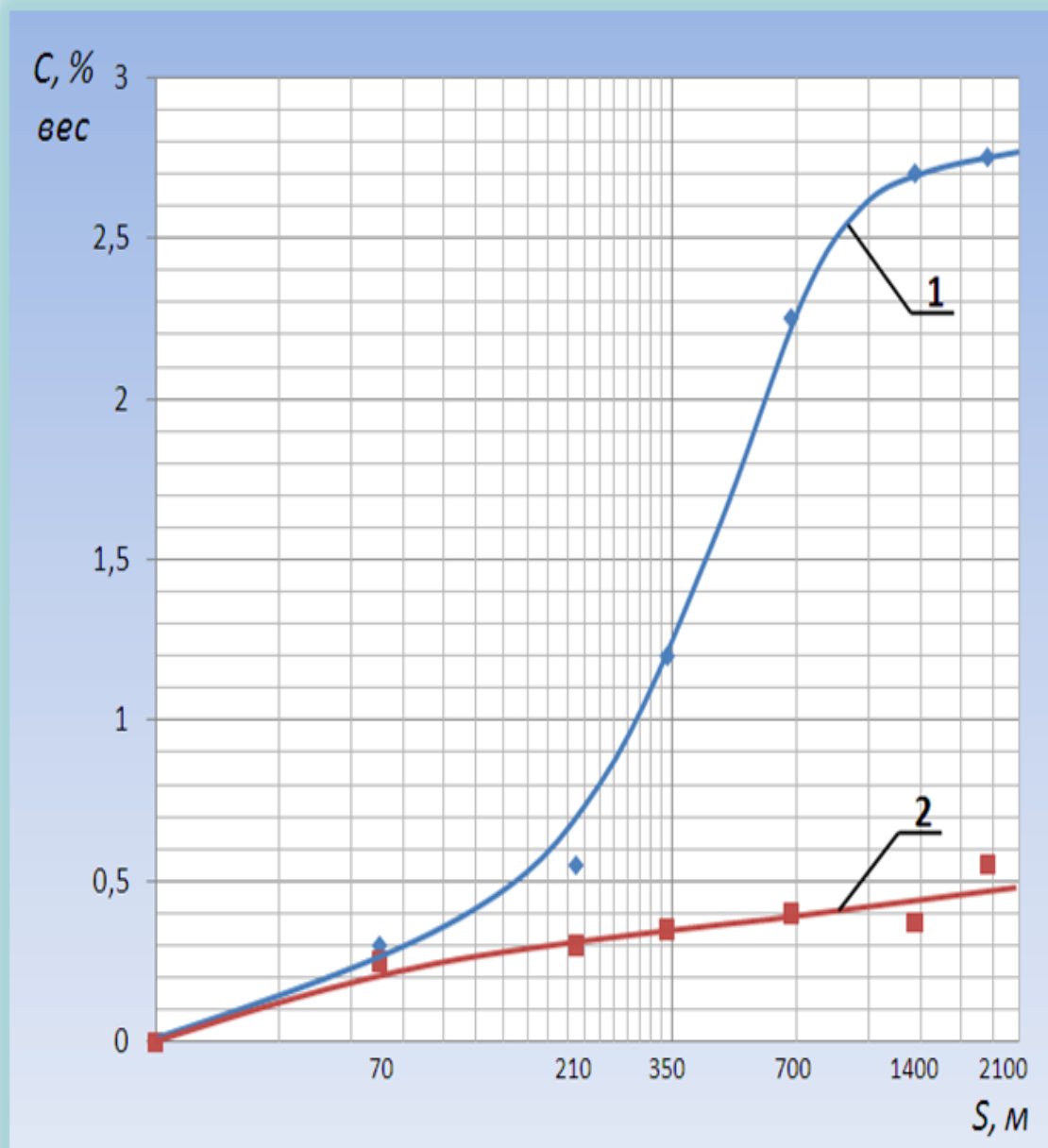


Рисунок 4.51 Содержание элементов медного сплава в зоне трения стального образца от пути трения: 1- медь; 2-цинк

В диапазоне пути трения 1400 м -2100 м весовое содержание меди в зоне трения стального образца мало изменяется. Можно отметить, что весовое содержание цинка в зоне трения стального образца характеризуется постепенным увеличением с повышением пути трения пары колодка-ролик от 70 до 2100 м.

В работе проведены рентгеноспектральные исследования зоны трения стальных образцов, изношенных в глицерине в паре с антифрикционными

сплавами Л63, БрАЖ9-4, БрОЦС5-5-5 [73], которые представлены на рис. 4.52.

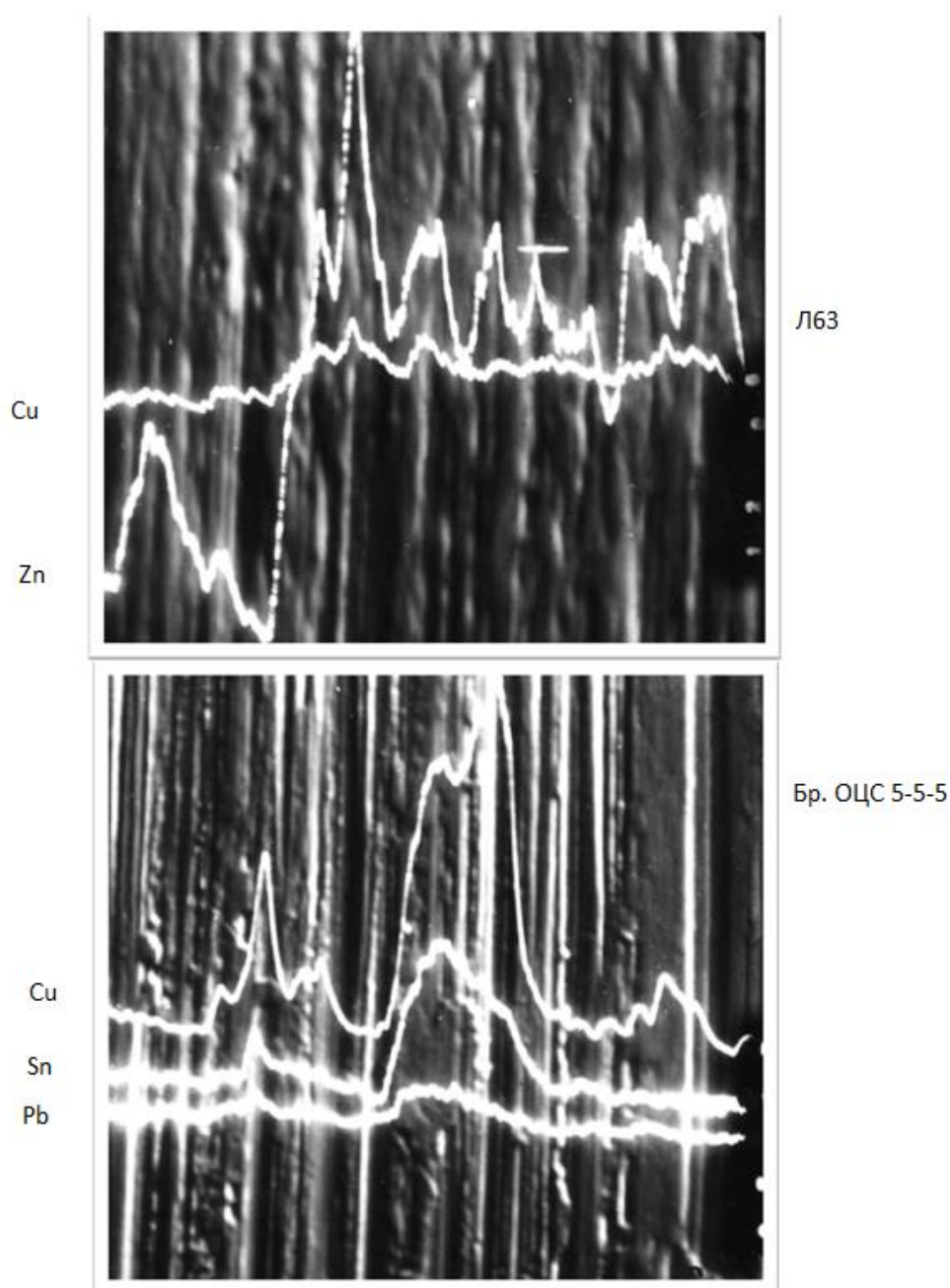


Рисунок 4.52 - Рентгеноспектральные исследования зоны трения стальных образцов, изношенных с медными сплавами в глицерине (x1000)

Анализ представленных данных позволяет отметить, что в одних и тех же местах зоны трения стальных образцов по линии сканирования на кривой концентрационного распределения элементов присутствуют металлы, входящие в состав антифрикционных сплавов. При изнашивании пары

латунь-сталь в глицерине на стальном образце имеется медь и цинк. При трении пары сталь - БрОЦС5-5-5 в одних и тех же местах стального образца находятся медь, олово, свинец. По характеру распределения элементов антифрикционных сплавов в зоне трения стальных образцов можно утверждать, что в начальный период взаимодействия триады трения происходит микросхватывание и перенос антифрикционного сплава на сталь.

Осмотр поверхностного слоя латуни, изношенной в паре со стальным роликом в глицерине на пути трения 2100 м, показал, что на выходе из зоны трения антифрикционного сплава имеется темная пленка, которая до проведения эксперимента отсутствовала.

На рис. 4.53 и 4.54 представлен вид этой темной пленки в зоне трения латуни в режиме упруго отраженных электронов. Темная пленка имеет поры, и ее толщина больше, чем высота микронеровностей поверхностного слоя антифрикционного сплава. Рентгеноспектральный анализ показал, что сформировавшаяся пленка в зоне трения латуни состоит из меди, цинка и кислорода (рис.4.55, 4.56 табл.4.6). Интересно, что эффективность действия многих присадок к минеральным маслам в условиях граничной смазки связана именно с присутствием кислорода [57].

Рассмотрение данных, представленных на рис.4.55 и 4.56, позволяет отметить, что в образовавшейся темной пленке медь и цинк распределены практически равномерно. Сравнение содержания меди и цинка непосредственно в зоне трения, где темная пленка отсутствует (табл.4.4,) и рассматриваемых элементов антифрикционного сплава в темной пленке (табл.4.6), показывает, что содержание меди и цинка значительно меньше.



Рисунок 4.53 Вид темной пленки в зоне трения латуни в упруго отраженных электронах после изнашивания на пути трения 2100 м (x1000)

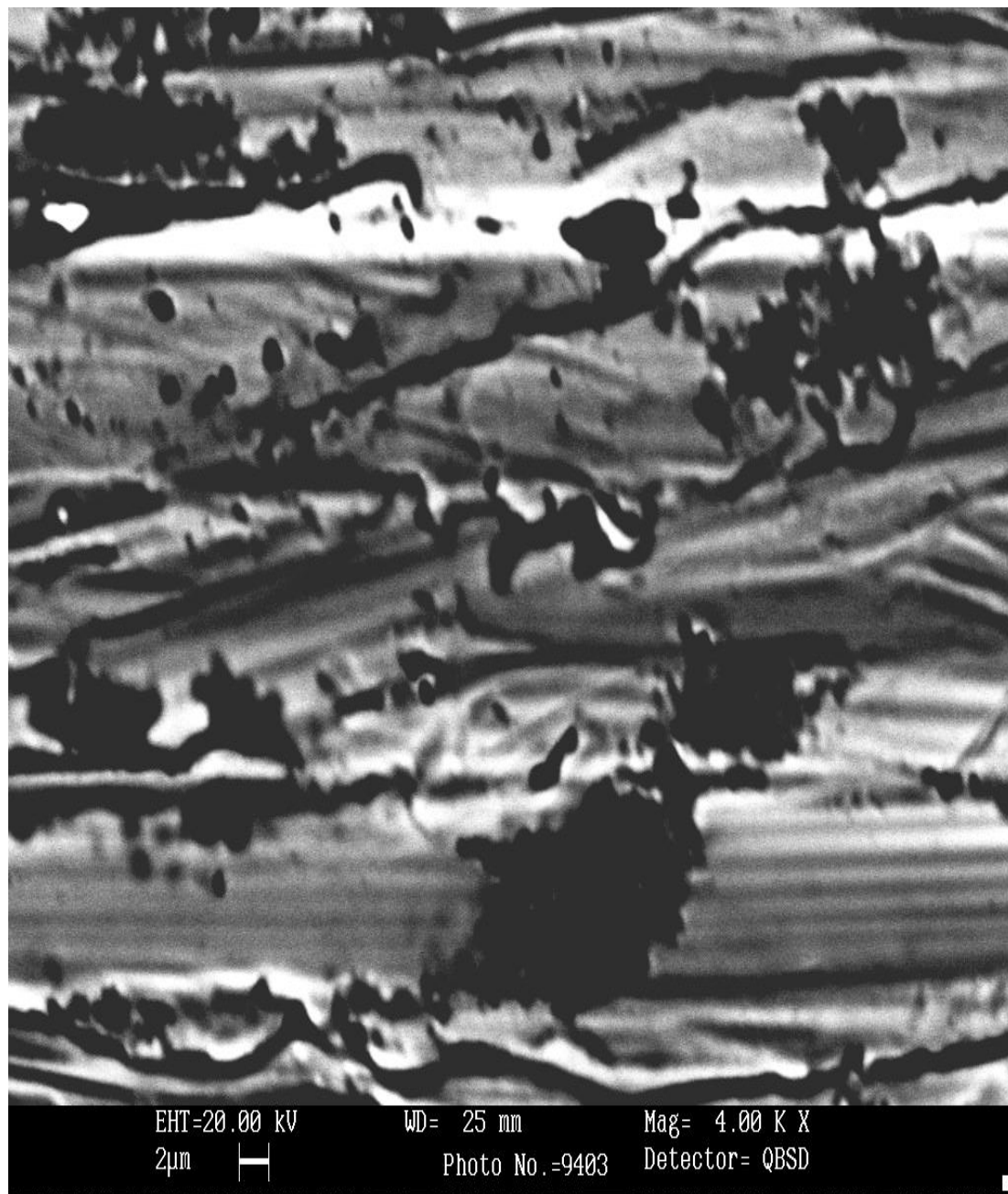


Рисунок 4.54 Вид темной пленки в зоне трения латуни в упруго отраженных электронах (x4000)

Таблица 4.6

Локальный рентгеноспектральный анализ пленки в зоне трения латуни

№№ п/п	Путь трения, м	Содержание, вес. %		
		Медь	Цинк	Кислород
1.	2100	77,85	6,52	15,63
		76,68	8,53	14,79
		76,35	9,03	14,62
Среднее		76,96	8,03	15,01



Рисунок 4.55 Рентгеноспектральное распределение меди в темной пленке в зоне трения латуни (x1000)

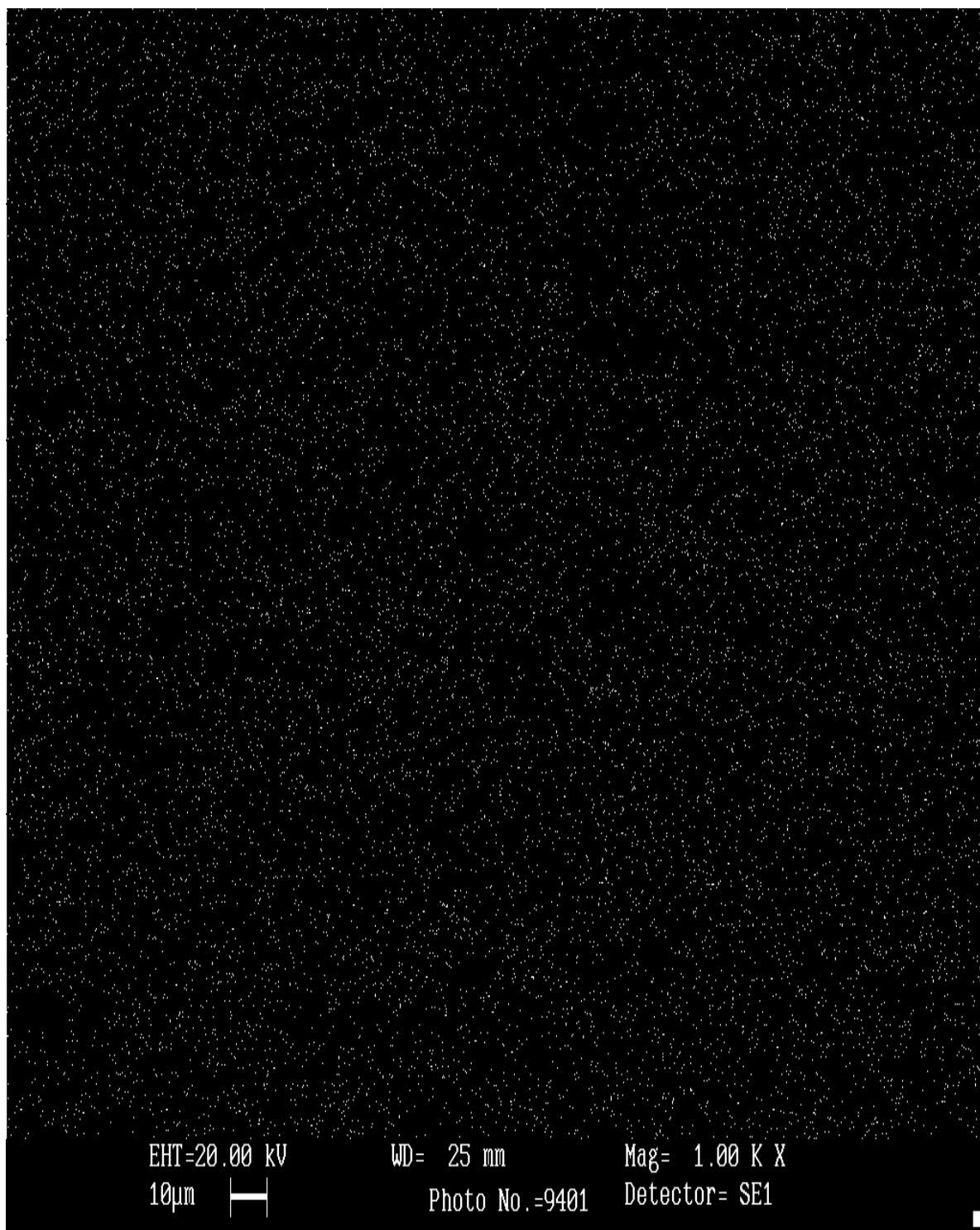


Рисунок 4.56 Рентгеноспектральное распределение цинка в темной пленке в зоне трения латуни (x1000)

Кроме того, рентгеноспектральным анализом установлено значительное содержание кислорода в сформировавшейся темной пленке. Анализируя полученные данные и оценивая внешний вид темной пленки,

можно предположить, что она является высокомолекулярным продуктом механо-физико-химических процессов на фрикционном контакте.

Выполненные в работе рентгеноспектральные исследования начальной стадии процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине показали, что имеют место такие процессы, как микросхватывание и перенос латуни на сталь. Установлено, что при взаимодействии триады трения происходит абразивное изнашивание антифрикционного сплава продуктами износа, вероятно, окисленными соединениями меди и железа. Полученные результаты изменения содержания меди и цинка, в зависимости от пути трения в глицерине в поверхностном слое медного сплава, позволяют отметить, что значительное снижение содержания цинка связано с коррозионно-механическим изнашиванием антифрикционного сплава.

4.3 Послойные рентгенофотоэлектронные и Оже-спектральные исследования поверхностного слоя пары медный сплав-сталь, изношенных в глицерине

Для анализа качественного и количественного состава поверхностных слоев, сформировавшихся в зоне трения пары медный сплав-сталь, работавших в глицерине на пути трения от 70 до 2100 м, были выполнены послойные исследования защитных пленок.

Положение и величина рентгенофотоэлектронных пиков-спектров, обусловленных выбиваемыми электронами, позволяет проводить анализ слоев на поверхности металла. По химическому сдвигу от положения, которое наблюдается для состояния металла в нулевой степени окисления, можно сделать вывод о степени окисления данного элемента или его ближайшего окружения.

На рис. 4.57 представлены обзорные спектры с зоны трения латуни, изношенной в паре со стальным образцом в глицерине на пути трения 70 м. На спектре видны интенсивные пики углерода (285эВ), кислорода (531 эВ).

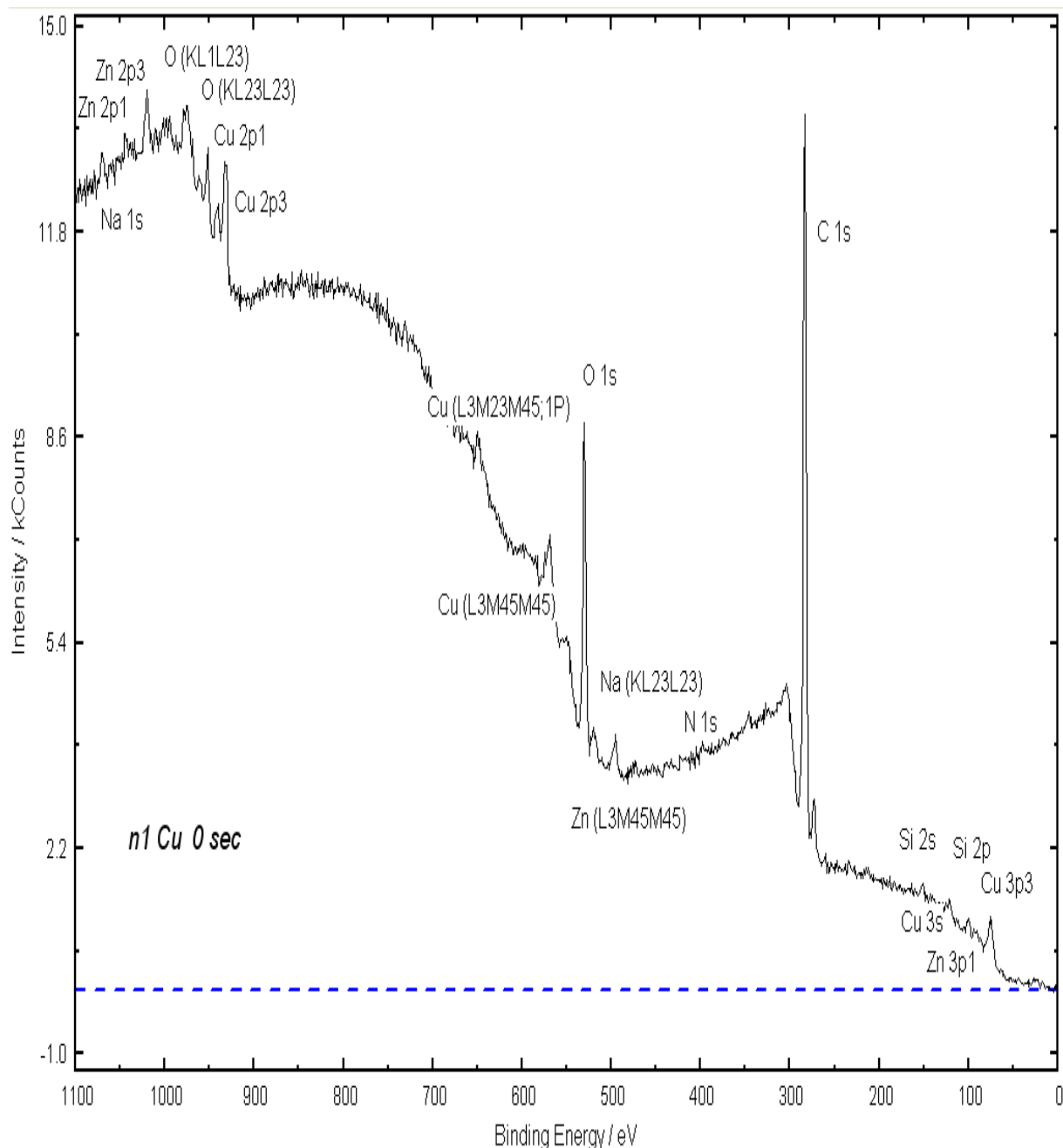


Рисунок 4.57 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 70 м

Кроме незначительных пиков меди и цинка, имеются пики, обусловленные примесью кремния, натрия и азота, которые связаны с атмосферой воздуха. Представленный на рис.4.57 обзорный спектр зоны трения латуни получен до травления образца ионами аргона.

С зоны трения медного сплава до травления поверхностного слоя ионами аргона был снят энергетический спектр меди, который представлен

на рис.4.58. Видно, что в поверхностном слое антифрикционного сплава медь присутствует как в металлическом состоянии, так и в окисленном – Cu_2O .

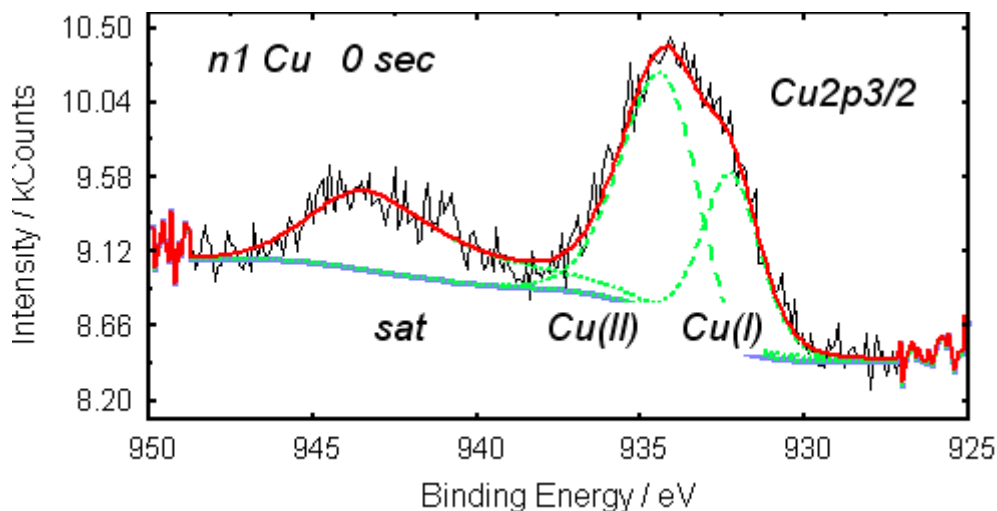


Рисунок 4.58 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 70 м

Энергетический спектр электронов цинка показал, что цинка в зоне трения латуни в металлическом состоянии нет (энергия связи 1021эВ). Цинк в зоне трения медного сплава имеет энергию связи 1022,5 эВ, что свидетельствует о том, что он находится в связанном состоянии, видимо, с кислородом (рис.4.59).

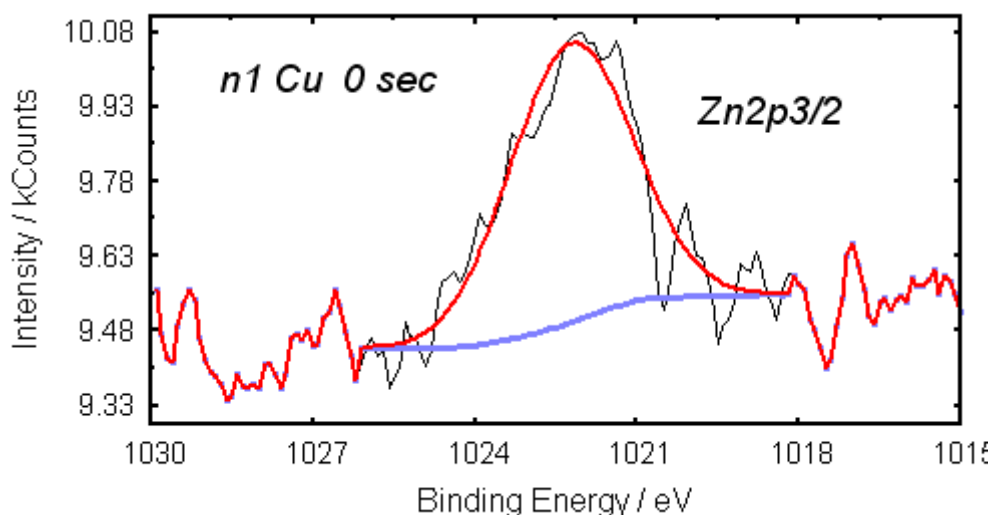


Рисунок 4.59 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения латуни, работавшей в глицерине на пути трения 70 м

После травления зоны трения ионами аргона и удаления слоя порядка 15 нм, с поверхностного слоя антифрикционного сплава были получены обзорные спектры, которые представлены на рис. 4.60.

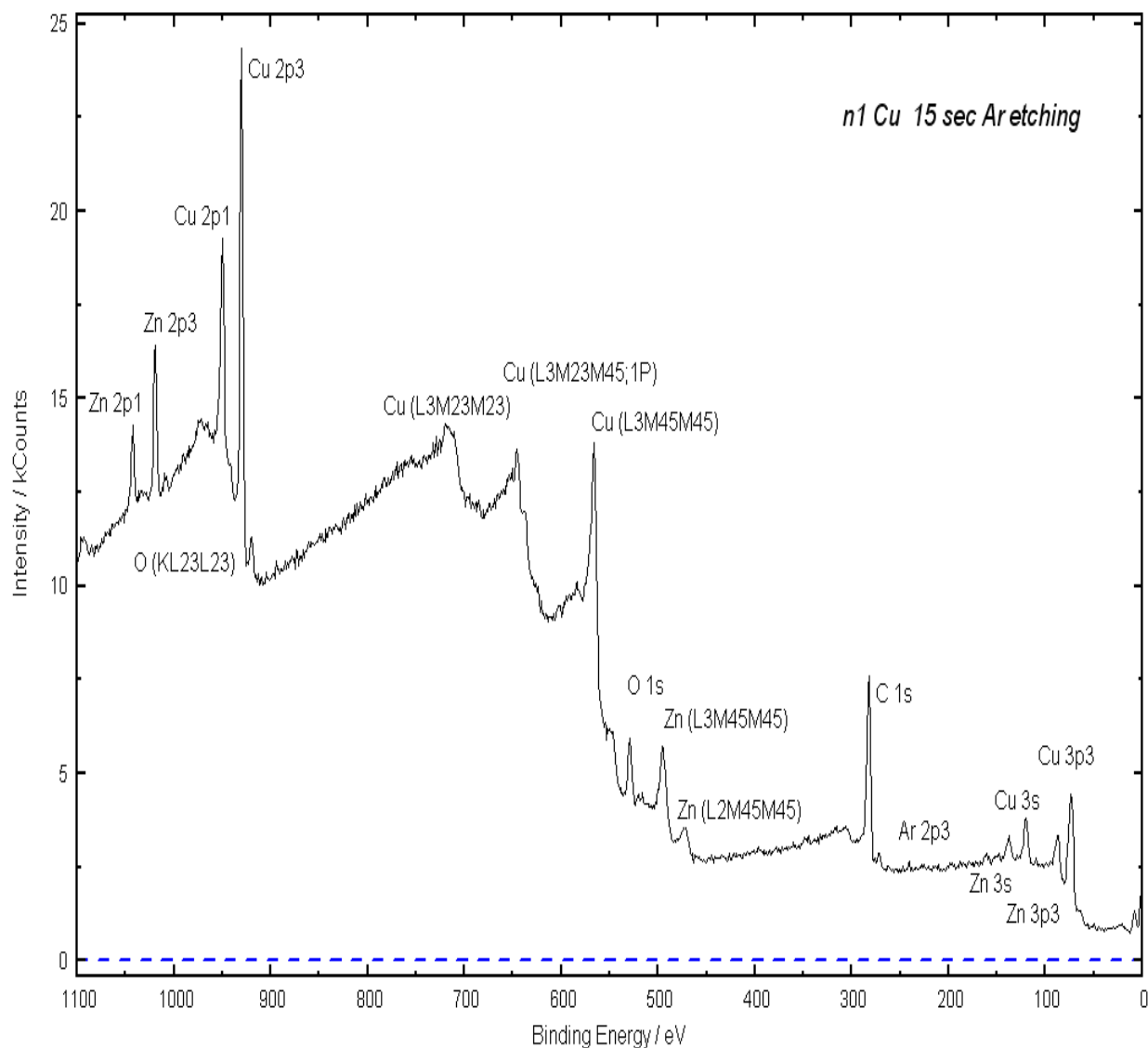


Рисунок 4.60 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения медного сплава после удаления слоя порядка 15 нм

Видно, что после травления поверхностного слоя ионами аргона содержание кислорода и углерода уменьшается. Окисленные соединения меди и цинка удаляются. Медь и цинк в поверхностном слое латуни находятся в металлическом состоянии, так как энергия их связи соответствует металлическому состоянию (рис.4.61, 4.62).

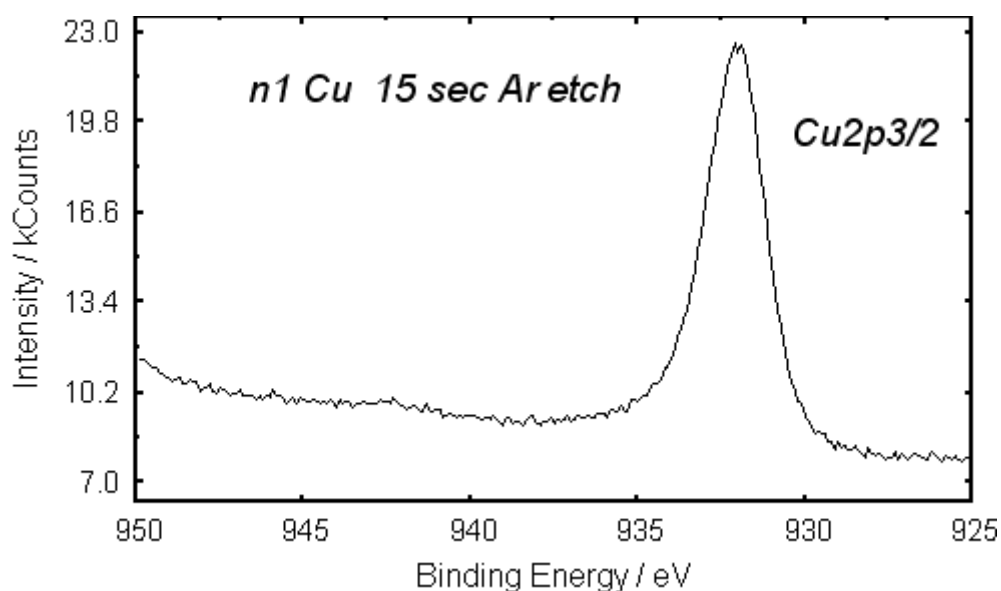


Рисунок 4.61 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни после травления ионами аргона

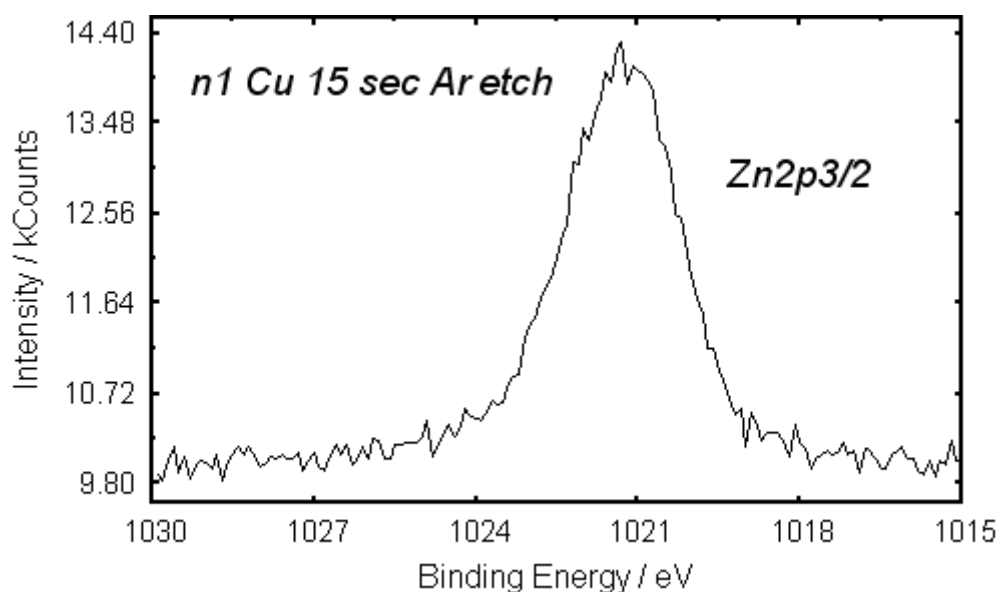


Рисунок 4.62 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения медного сплава после удаления слоя порядка 15 нм

На рис.4.63 представлены данные о составе, строении и толщине поверхностной пленки, сформировавшейся на поверхности трения медного сплава, изношенного в глицерине в паре со стальным образцом на пути трения 70 м.

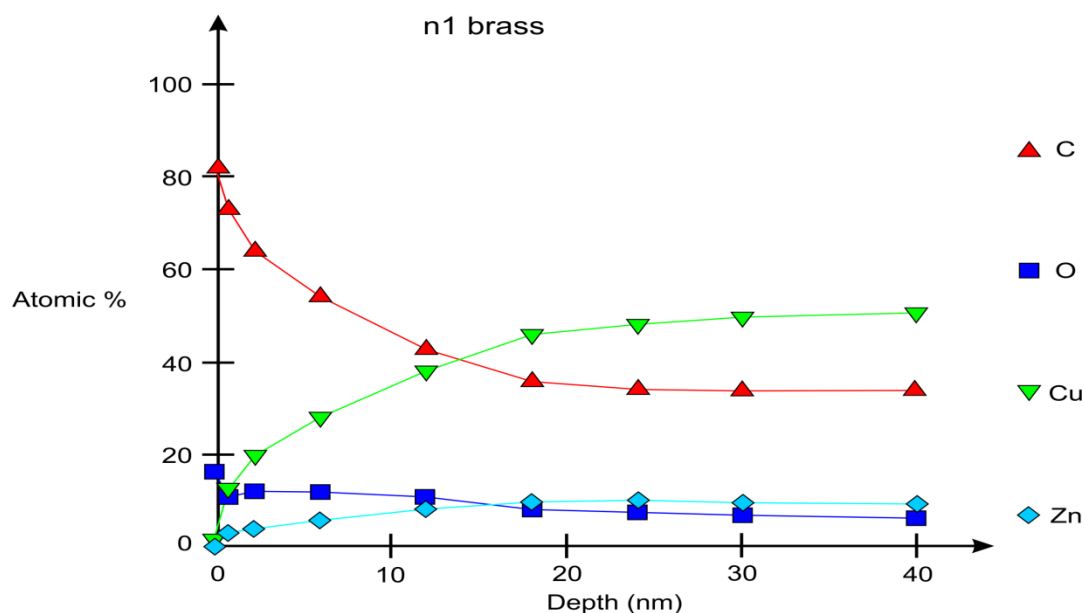


Рисунок 4.63 Состав, строение и толщина поверхностей пленки, сформировавшейся в зоне трения латуни на пути трения 70 м.

Анализ полученных данных рентгенофотоэлектронных исследований позволяет отметить, что поверхностный слой состоит из углерода и кислорода. С увеличением толщины удаляемого слоя содержание кислорода и углерода уменьшается. Содержание меди и цинка с увеличением толщины удаляемого слоя повышается. Медь и цинк в поверхностном слое находятся в окисленном состоянии. Кроме того, в зоне трения антифрикционного сплава имеется медь, которая находится в металлическом состоянии. Толщина металлосодержащей пленки в зоне трения антифрикционного сплава на пути трения 70 м в глицерине составляет порядка 40 нм.

На рис. 4.64 представлен энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни Л63, изношенной в паре со стальным роликом в глицерине на пути трения 210 м, до травления поверхностного слоя ионами аргона. Анализ полученных данных позволяет отметить, что как на пути трения 70 м, так и на пути трения 210 м в зоне трения антифрикционного сплава имеется медь как в металлическом, так и в окисленном состоянии (Cu_2O).

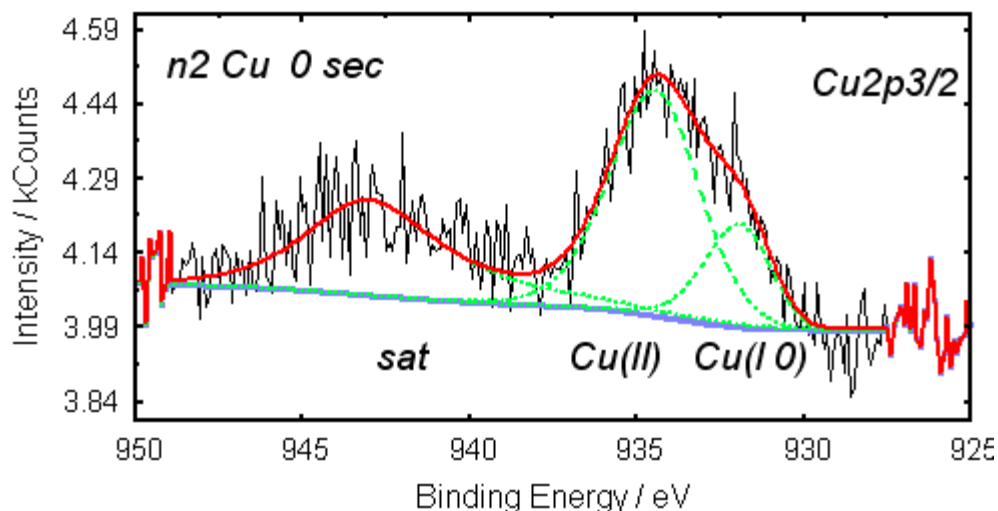


Рисунок 4.64 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 210 м, до травления ионами аргона

После травления ионами аргона и удаления слоя порядка 15 нм был получен энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения медного сплава, который представлен на рис.4.65. Энергетический пик 2р электронов меди соответствует энергии связи 931 эВ, которая характерна для меди в металлическом состоянии.

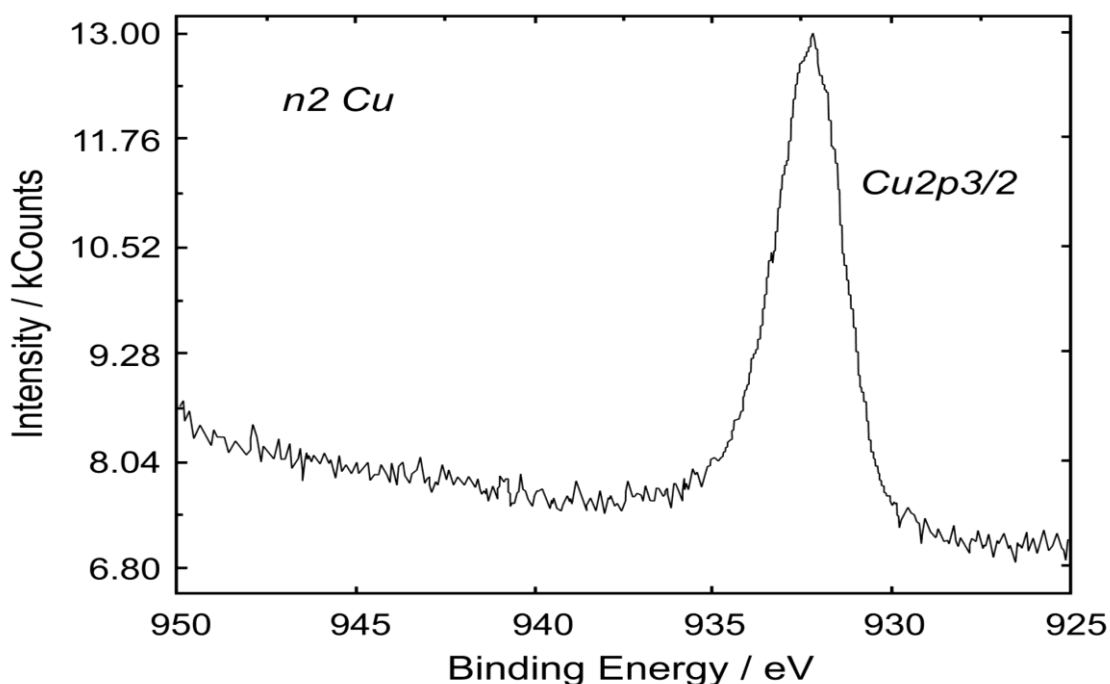


Рисунок 4.65 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения медного сплава после удаления слоя порядка 15нм

С зоны трения латуни, изношенной на пути трения 210 м до травления ионами аргона был получен энергетический спектр 2р электронов цинка, который представлен на рис.4.66.

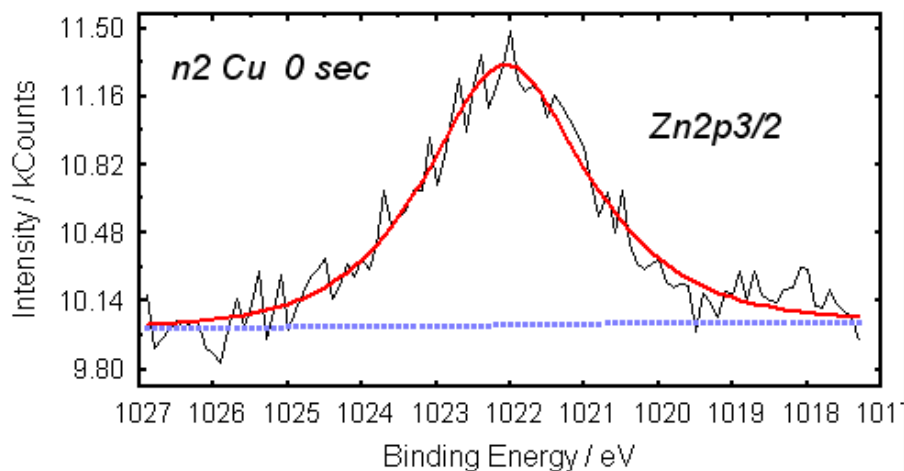


Рисунок 4.66 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения латуни, работавшей в глицерине в паре со стальным образцом на пути трения 210 м, до травления ионами аргона

Сравнение энергии связи цинка в металлическом состоянии (1021 эВ) с энергетическим пиком цинка с зоны трения латуни позволяет отметить, что в поверхностном слое антифрикционного сплава цинк в металлическом состоянии отсутствует. Травление зоны трения ионами аргона и удаление слоя порядка 15 нм (рис.4.67) показало, что цинк в поверхностном слое медного сплава находится в связанном состоянии.

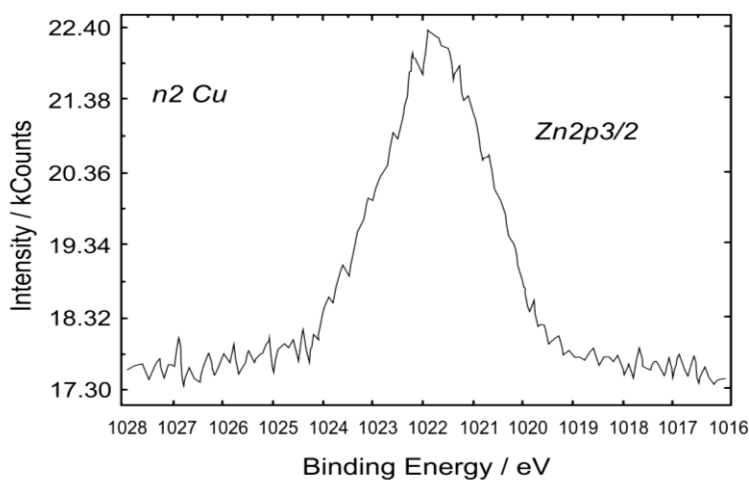


Рисунок 4.67 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения латуни после травления ионами аргона.

На рис. 4.68 представлены результаты рентгенофотоэлектронных исследований зоны трения латуни, изношенной в глицерине в паре со стальным образцом на пути трения 210 м.

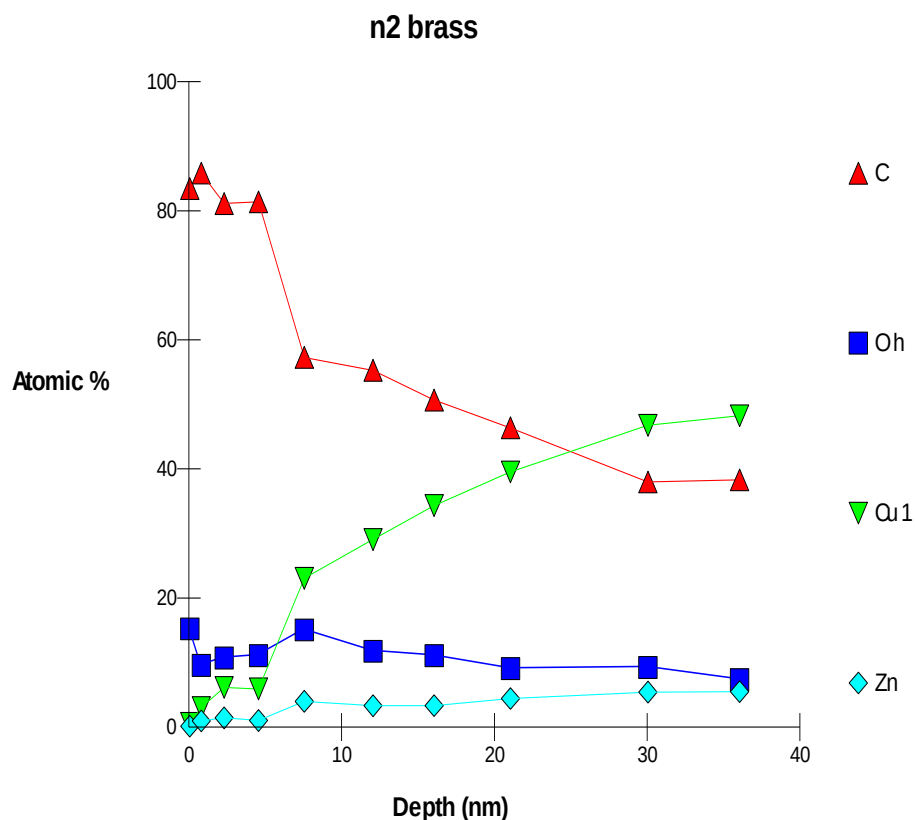


Рисунок 4.68 Состав, строение и толщина поверхностной пленки, сформировавшейся в зоне трения медного сплава на пути трения 210 м.

Поверхностный слой антифрикционного сплава до травления ионами аргона состоит из углерода и кислорода, а медь и цинк практически отсутствуют. Травление зоны трения ионами аргона ведет к снижению содержания углерода в поверхностном слое образца. Содержание кислорода в зоне трения медного сплава изменяется незначительно. С увеличением толщины удаляемого слоя содержание меди в поверхностном слое повышается. Аналогично отмечается повышение содержания цинка в поверхностном слое образца. Эксперименты свидетельствуют о том, что в процессе взаимодействия триады трения на поверхности трения латуни формируется пленка толщиной порядка 40 нм. В состав пленки входит углерод, кислород, медь и цинк.

После изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 350 м с зоны трения латуни были получены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры (рис.4.69).

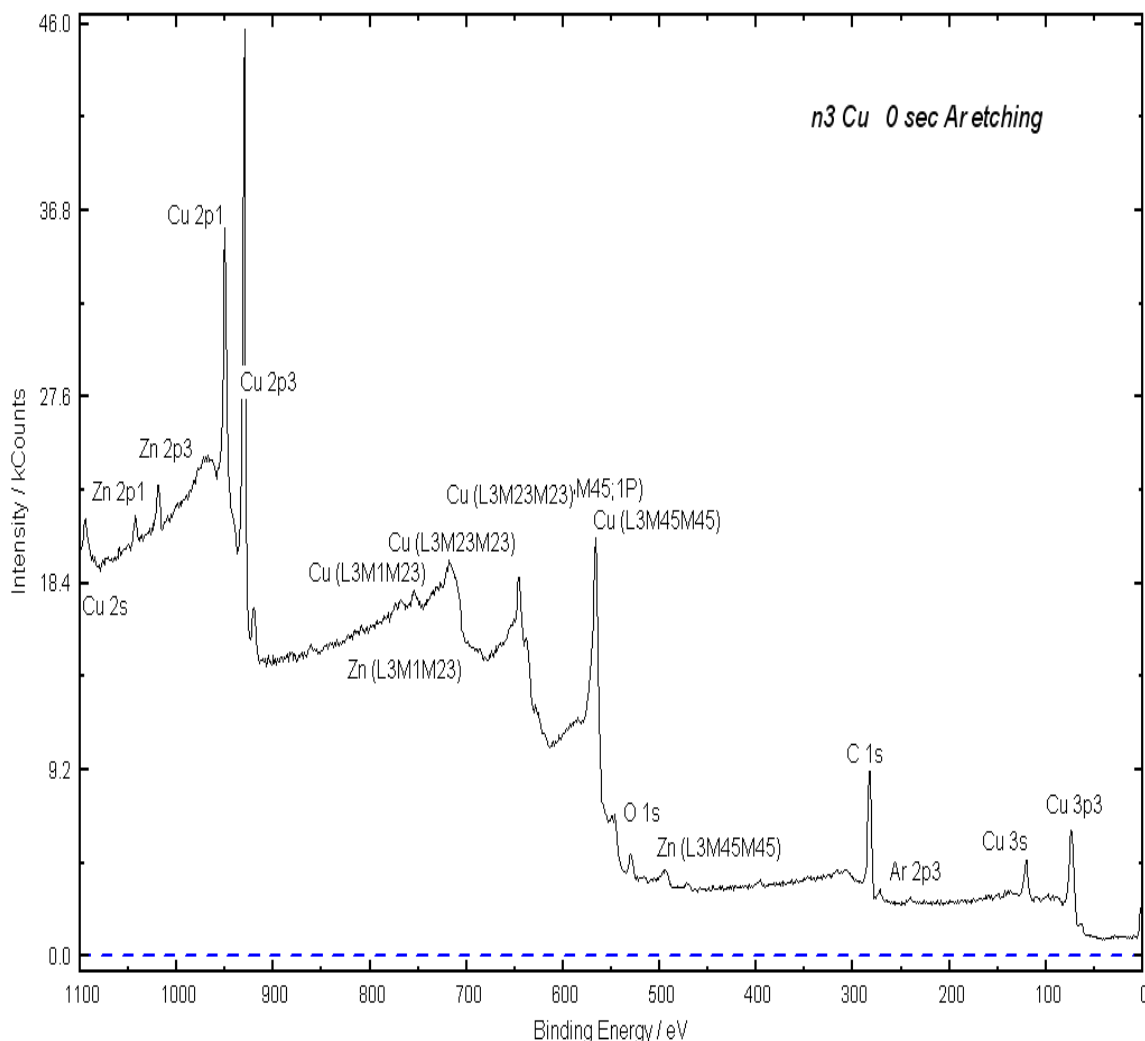


Рисунок 4.69 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения медного сплава, изношенного в глицерине на пути трения 350 м

На спектре имеются энергетические пики углерода, кислорода, меди, незначительные пики цинка. Обзорный рентгенофотоэлектронный спектр получен с зоны трения антифрикционного сплава до травления ионами аргона. На рис.4.70 представлен энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни, изношенной в паре со стальным образцом в глицерине на пути трения 350 м. Эксперименты свидетельствуют о том, что как на пути трения 70 м, так и на пути трения 210 м поверхностный слой антифрикционного сплава представлен металлической медью, а также окисленными соединениями (Cu_2O).

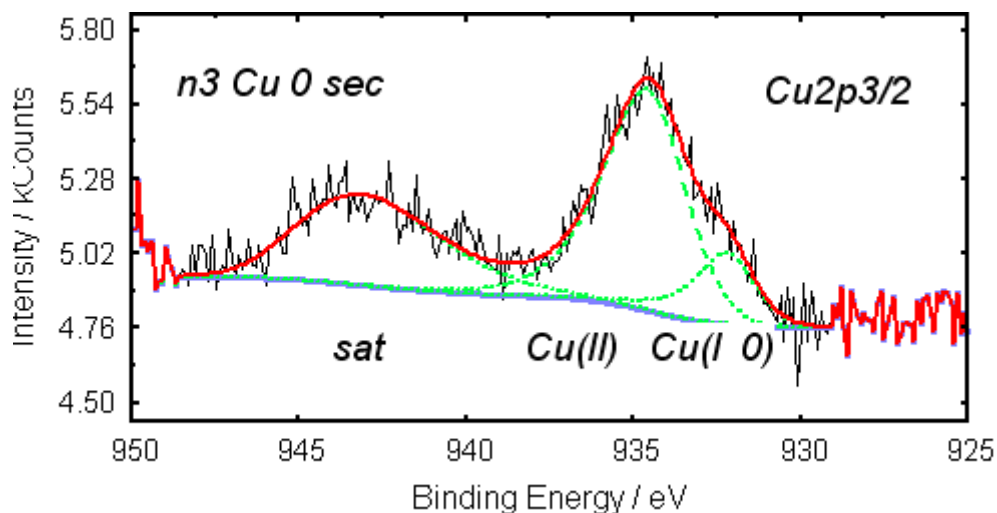


Рисунок 4.70 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 350 м

Энергетический спектр цинка (Рис.4.71), полученный с зоны трения латуни, изношенной на пути трения 350 м, показал, что цинк находится в связанном состоянии, так как энергия связи металлического цинка 1021 эВ.

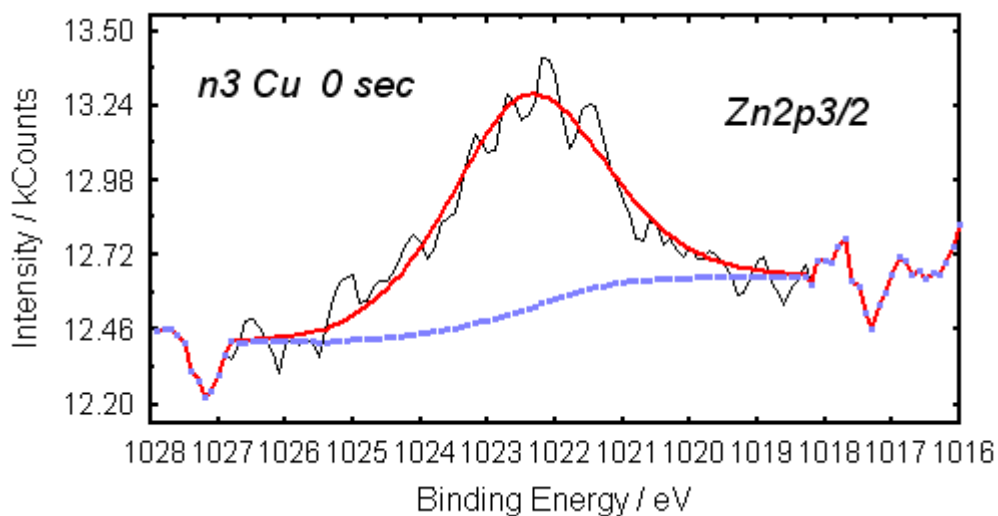


Рисунок 4.71 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения латуни, после изнашивания на пути трения 350 м

Состав, строение и толщина защитной пленки, сформировавшейся в процессе взаимодействия триады трения, представлены на рис.4.72. Можно отметить, что поверхностный слой изношенной латуни состоит из углерода и кислорода. Цинк и медь практически отсутствуют в зоне трения.

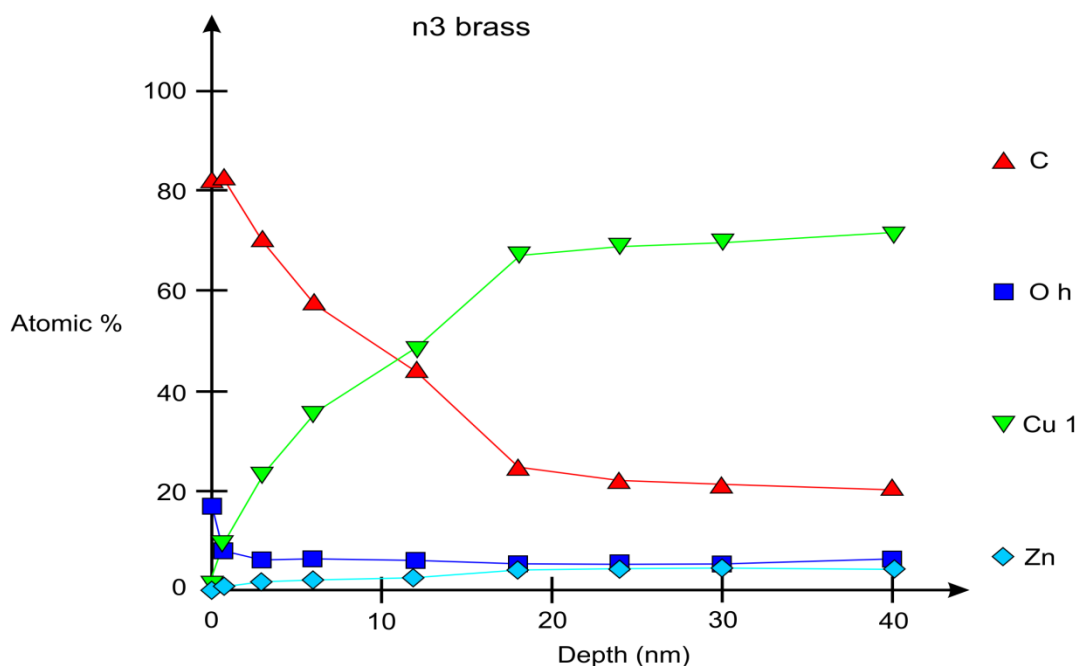


Рисунок 4.72 Состав, строение и толщина защитной пленки в зоне трения антифрикционного сплава после изнашивания на пути трения 350 м

Травление зоны трения латуни ионами аргона ведет к значительному снижению содержания углерода и повышению содержания меди. Содержание кислорода и цинка с увеличением толщины удаляемого слоя изменяется незначительно. Таким образом, после изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 350 м удельной нагрузке 6 МПа и скорости скольжения 1 м/с в зоне трения сформировалась металлсодержащая пленка толщиной порядка 40 нм.

На рис.4.73 представлены обзорные спектры с зоны трения латуни, изношенной в глицерине в паре со стальным образцом на пути трения 700м. На обзорном спектре зоны трения антифрикционного сплава видны пики углерода (285 эВ), кислорода (531 эВ). Кроме незначительных пиков меди и цинка отмечается наличие пиков, которые соответствуют натрию, кремнию. Наличие пиков натрия и кремния связано с атмосферой воздуха.

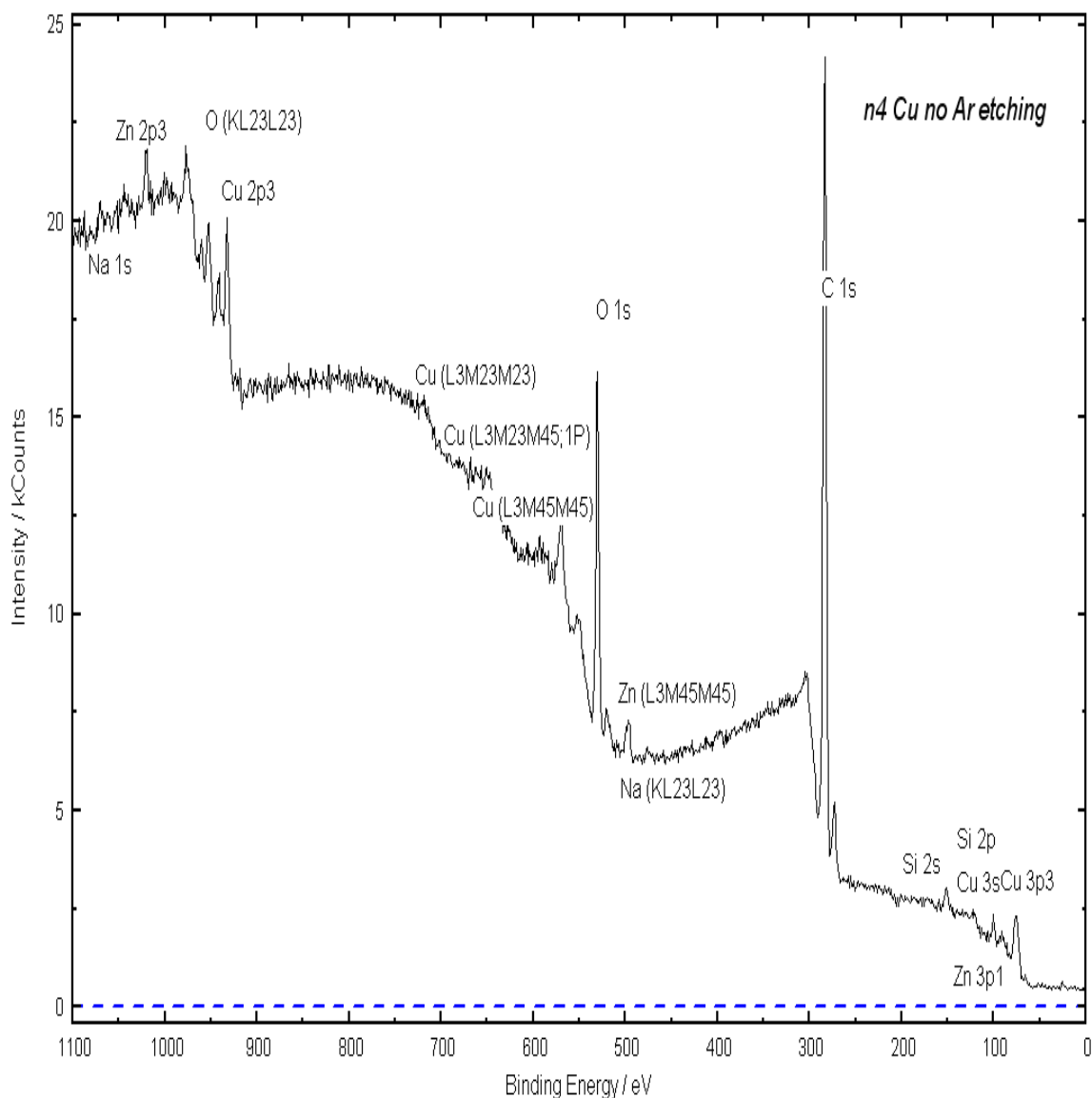


Рисунок 4.73 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 700 м

До травления зоны трения ионами аргона был получен энергетический спектр с поверхностного слоя медного сплава, который представлен на рис.4.74. В поверхностном слое латуни, как и в предыдущих случаях, имеется медь как в металлическом состоянии, так и в окисленном Cu_2O . В поверхностном слое латуни, изношенной на пути трения 700 м до травления ионами аргона цинк находится в связанном состоянии, так как его энергия связи 1022,5 эВ, тогда как у цинка в металлическом состоянии энергия составляет 1021 эВ (рис.4.75).

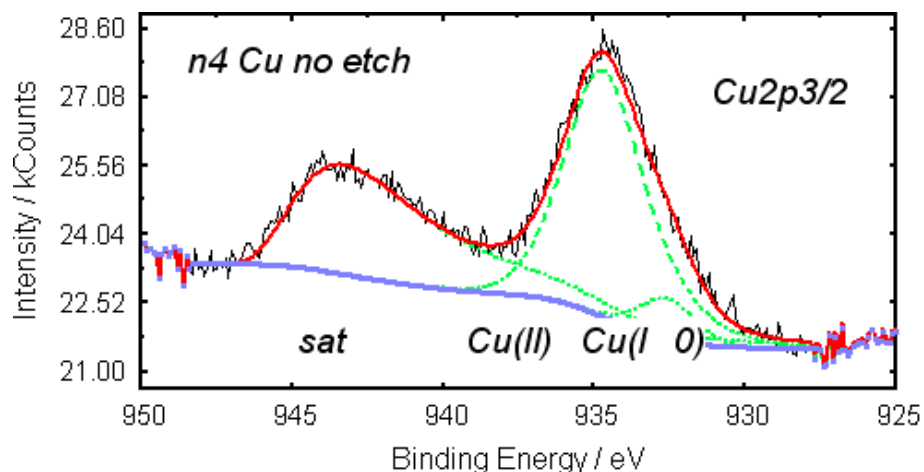


Рисунок 4.74 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения антифрикционного сплава, изношенного на пути трения 700 м

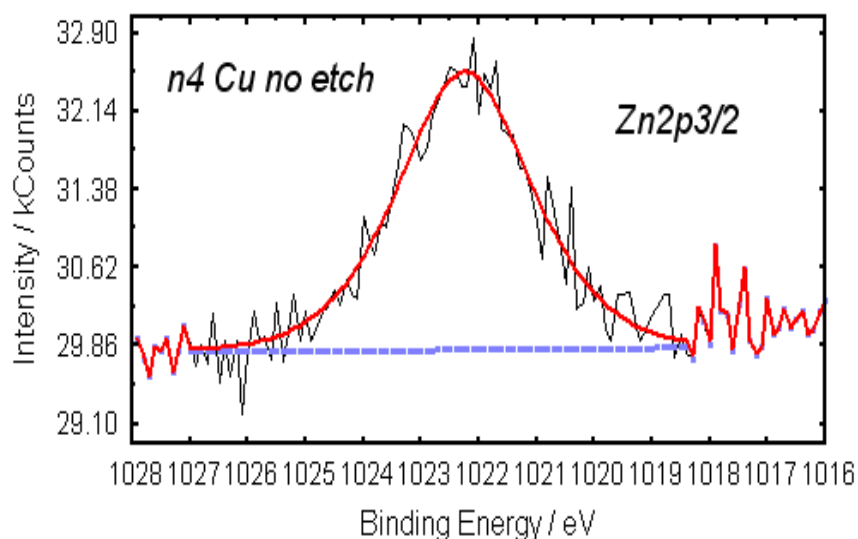


Рисунок 4.75 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения латуни, изношенной на пути трения 700 м

После травления зоны трения ионами аргона и удаления слоя толщиной порядка 30 нм были получены энергетические спектры 2р электронов меди (рис.4.76) и цинка (рис.4.77). Можно считать, что после удаления с зоны трения слоя толщиной порядка 30 нм медь имеет энергию связи 932 эВ, тогда как у меди в металлическом состоянии энергия связи 931 эВ, т.е. медь находится в связанном состоянии. Энергия связи цинка в металлическом состоянии 1021 эВ, а цинка с зоны трения латуни энергия связи 1022 эВ, т.е. цинк также находится в связанном состоянии. Можно предположить, что в зоне трения латуни имеются участки поверхностного

слоя, в которых медь находится в металлическом состоянии, а в других участках зоны трения медь находится в соединении, видимо, с кислородом.

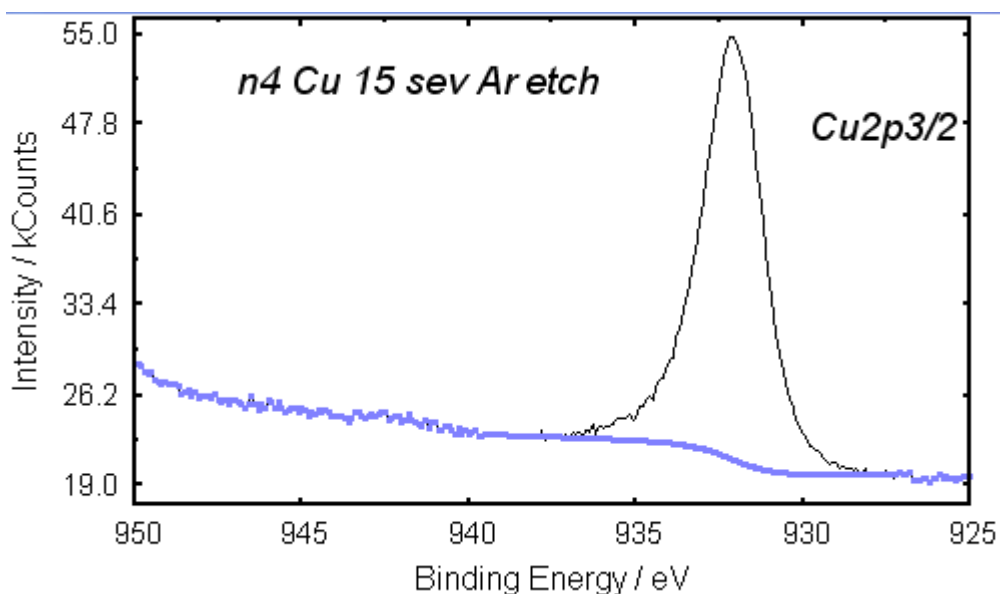


Рисунок 4.76 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения латуни после травления ионами аргона и удаления слоя толщиной 30 нм

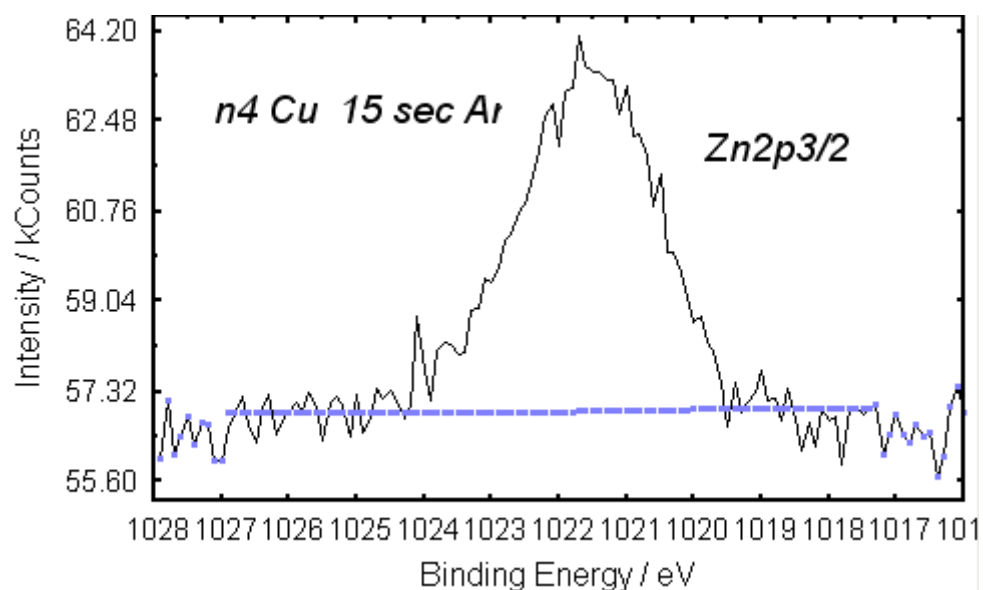


Рисунок 4.77 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения медного сплава после травления ионами аргона и удаления слоя толщиной 30 нм

На рис. 4.78 представлены данные о составе, строении и толщине металлосодержащей пленки, сформировавшейся в зоне трения латуни,

изношенной в глицерине на пути трения 700 м. Толщина металлосодержащей пленки на поверхности зоны трения порядка 40 нм.

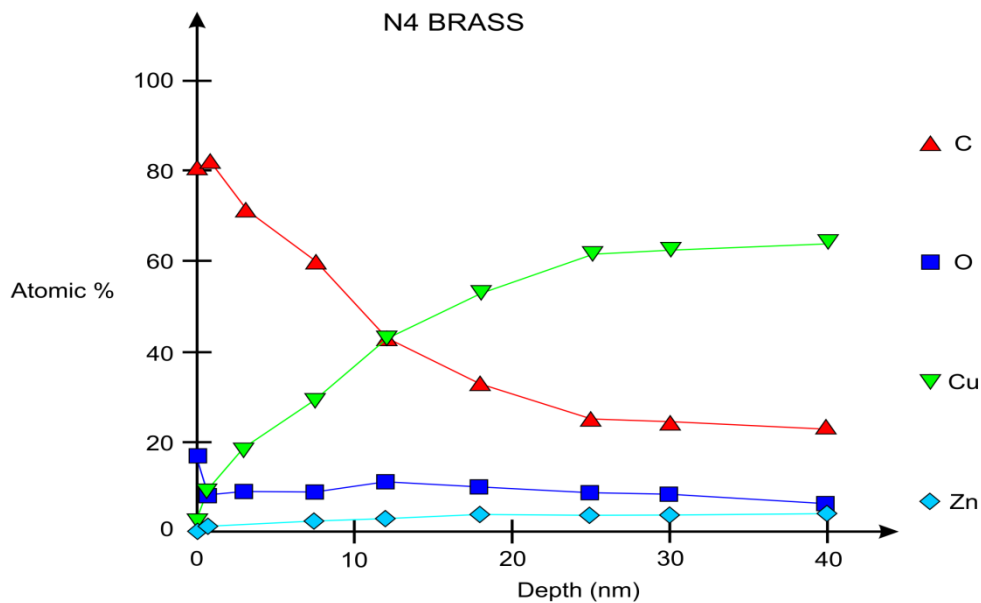


Рисунок 4.78 Состав, строение и толщина металлосодержащей пленки в зоне трения латуни после изнашивания в глицерине на пути трения 700 м

После изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 1400 м с зоны трения латуни получены обзорные рентгенофотозлектронные спектры, которые представлены на рис. 4.79. В зоне трения медного сплава имеются пики, соответствующие углероду, меди и цинку. Кроме того, имеются энергетические пики кремния и азота, наличие которых связано с атмосферой воздуха. Исследования показали, что до травления зоны трения антифрикционного сплава ионами аргона в поверхностном слое латуни имеется медь и цинк, которые находятся в связанном состоянии. После травления зоны трения медного сплава ионами аргона и удаления слоя толщиной порядка 300 нм были получены обзорные рентгенофотозлектронные спектры с поверхностного слоя латуни (рис. 4.80). Из данных, представленных на рис. 4.80, видно, что в зоне трения антифрикционного сплава уменьшилось содержание углерода и кислорода, о чем свидетельствует снижение интенсивности энергетических пиков с

энергией связи 285 эВ и 531 эВ. Имеются интенсивные пики меди, а интенсивность энергетических пиков цинка незначительна.

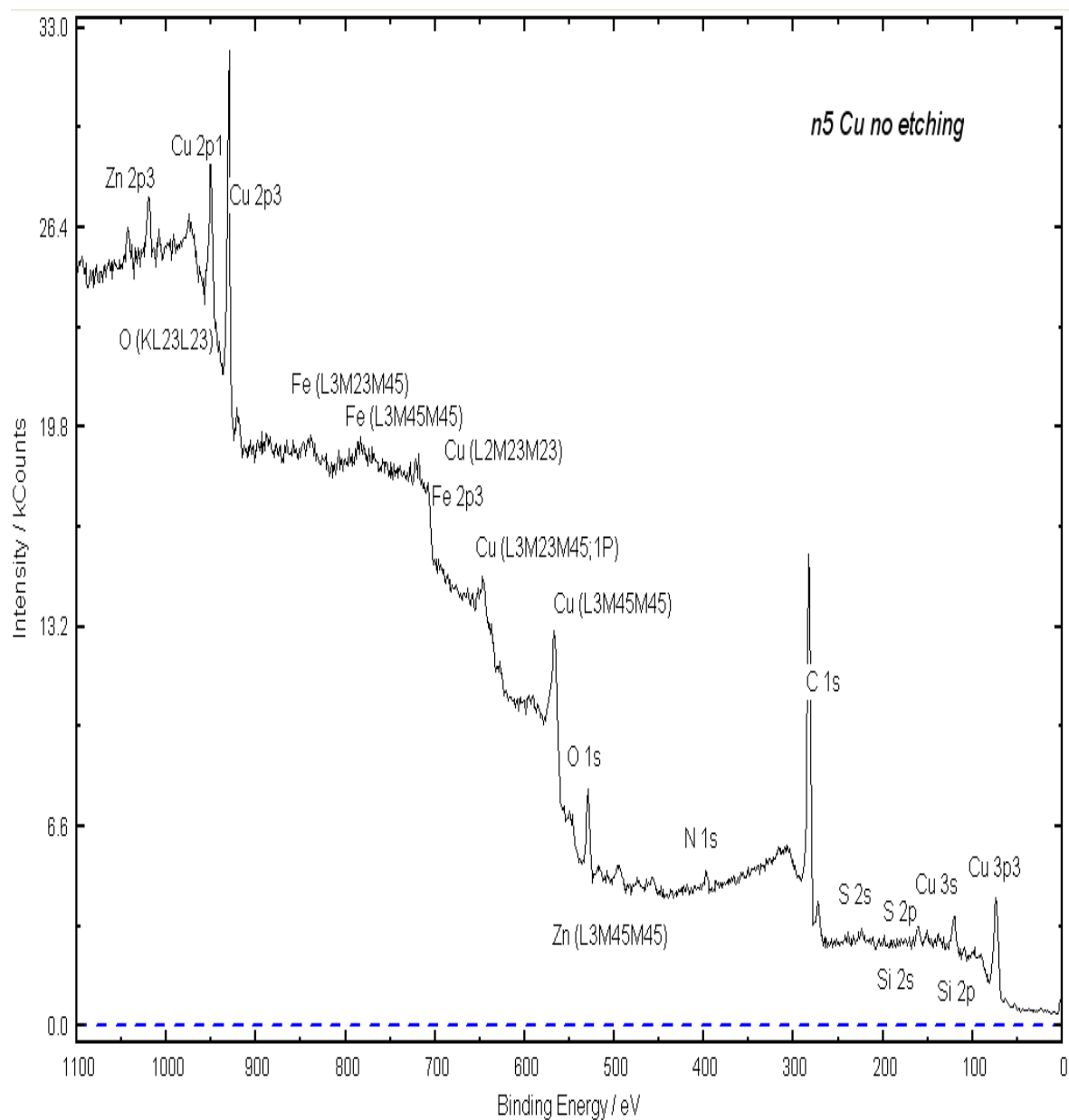


Рисунок 4.79 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения латуни до травления ионами аргона (путь трения 1400 м)

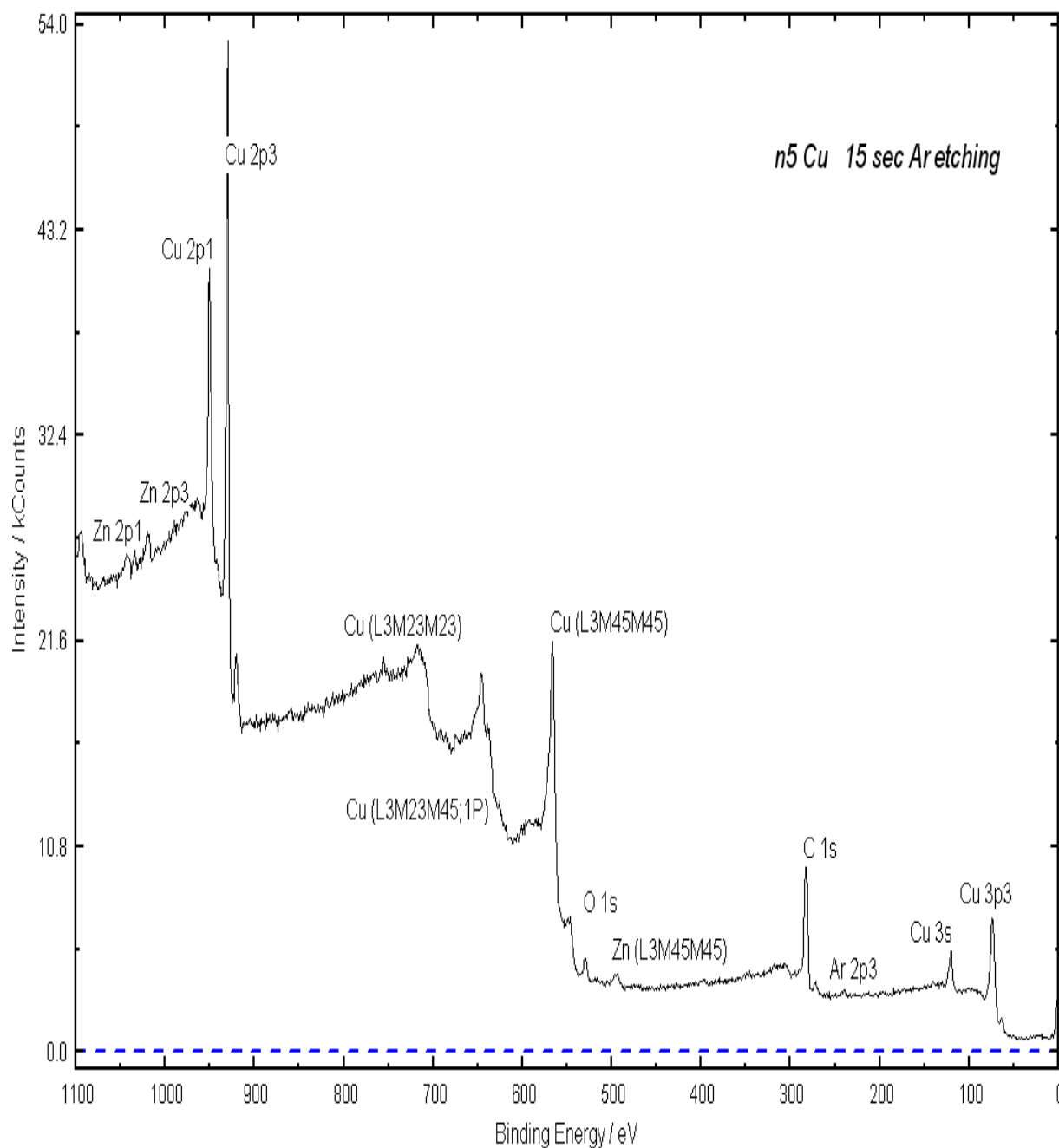


Рисунок 4.80 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения медного сплава после травления ионами аргона и удаления слоя порядка 300 нм

На рис. 4.81 и 4.82 представлены энергетические спектры 2р электронов меди и цинка с зоны трения латуни, изношенной на пути трения 1400 м и удаления слоя порядка 300 нм. Сравнение энергий связи меди и цинка в металлическом состоянии с экспериментально полученными данными энергии связи меди и цинка позволяет сделать вывод о том, что медь и цинк в зоне трения находятся в связанном состоянии.

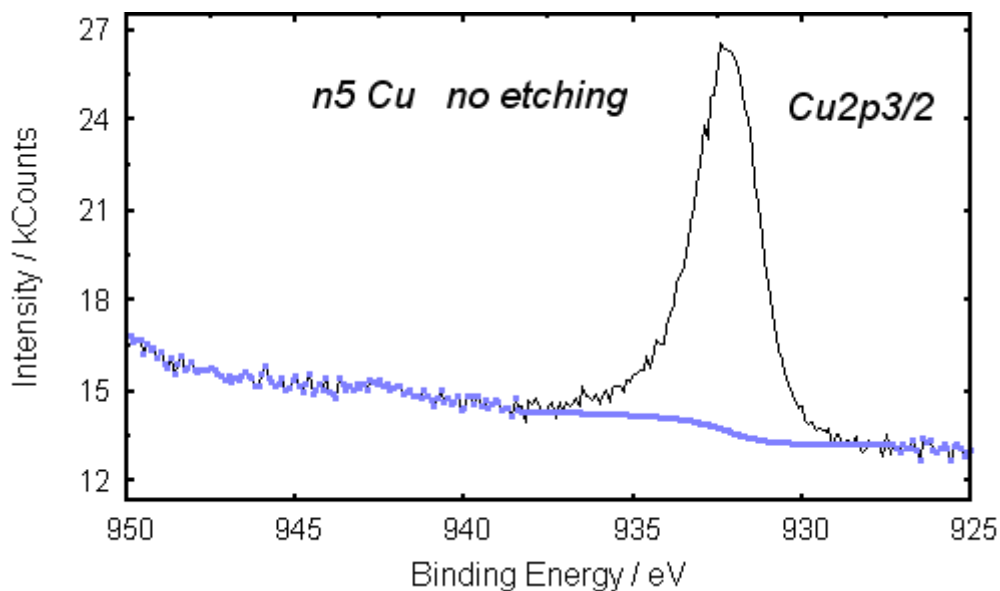


Рисунок 4.81 Энергетический спектр 2p электронов меди с зоны трения латуни после травления ионами аргона

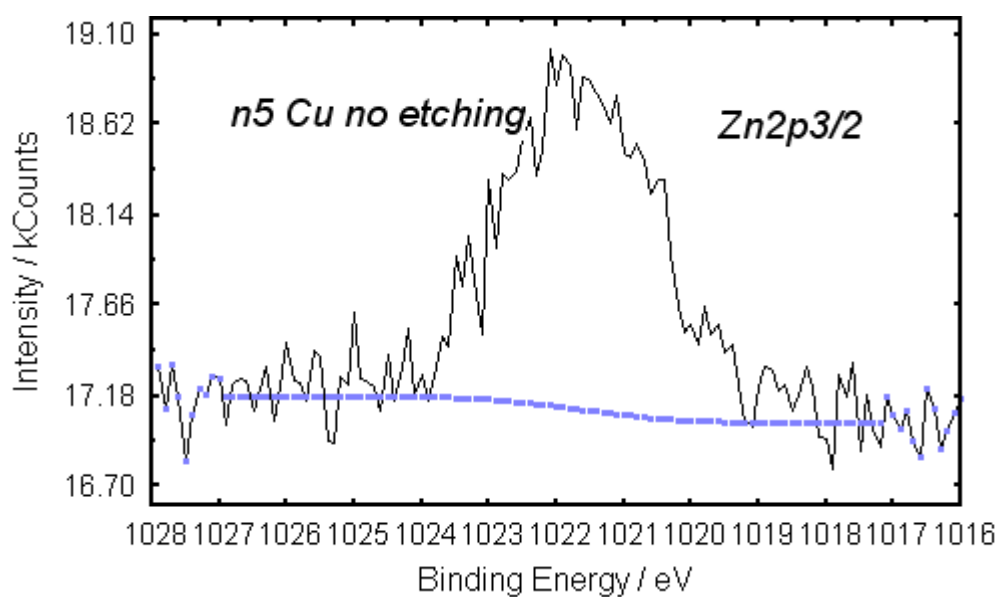


Рисунок 4.82 Энергетический спектр 2p электронов цинка с зоны трения антифрикционного сплава после удаления слоя порядка 300 нм

Элементный состав, строение и толщина металлсодержащей пленки, сформировавшейся в процессе взаимодействия триады трения, представлены на рис.4.83. Самый поверхностный слой зоны трения латуни до травления ионами аргона, в основном, представлен углеродом и кислородом, содержание которых с повышением толщины удаленного слоя снижается.

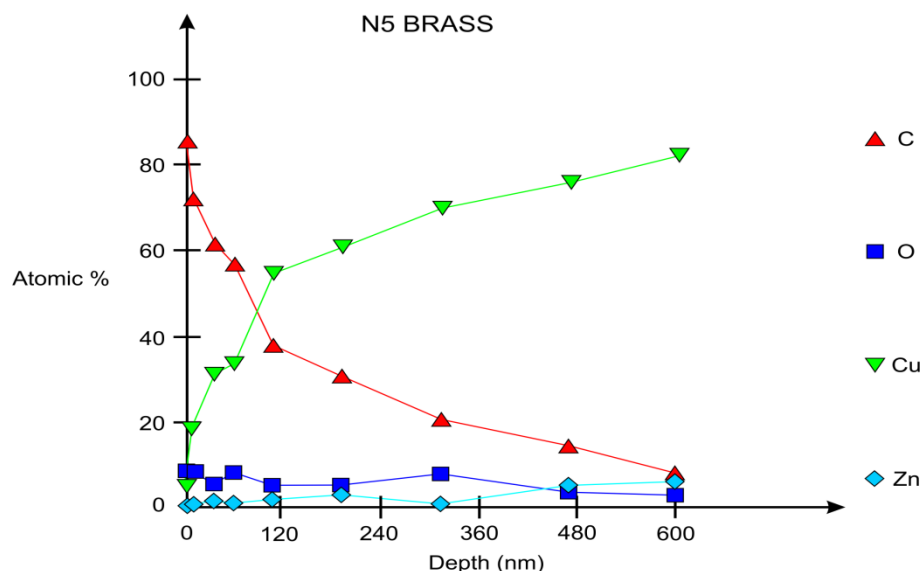


Рисунок 4.83 Состав, строение и толщина металлсодержащей пленки в зоне трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 1400 м

Увеличение времени травления ионами аргона поверхностного слоя антифрикционного сплава ведет к повышению содержания меди. Содержание цинка увеличивается в зоне трения незначительно с повышением толщины удаленного слоя. Медь и цинк в зоне трения латуни находятся в связанном состоянии. Необходимо отметить, что на пути трения 700-1400 м в зоне трения антифрикционного сплава сформировалась металлсодержащая пленка толщиной порядка 0,6 мкм.

В работе проведены послойные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения латуни, изношенной в глицерине в паре со стальным образцом на пути трения 2100 м. На рис. 4.84 представлены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения медного сплава, изношенного на пути трения 2100 м до травления ионами аргона. На рентгенофотоэлектронных спектрах выделяются интенсивные энергетические пики с энергией связи 285 и 531 эВ, которые соответствуют углероду и кислороду. Интенсивность энергетических пиков меди и цинка незначительна. В поверхностном слое имеется кремний и натрий, наличие которых связано с атмосферой воздуха.

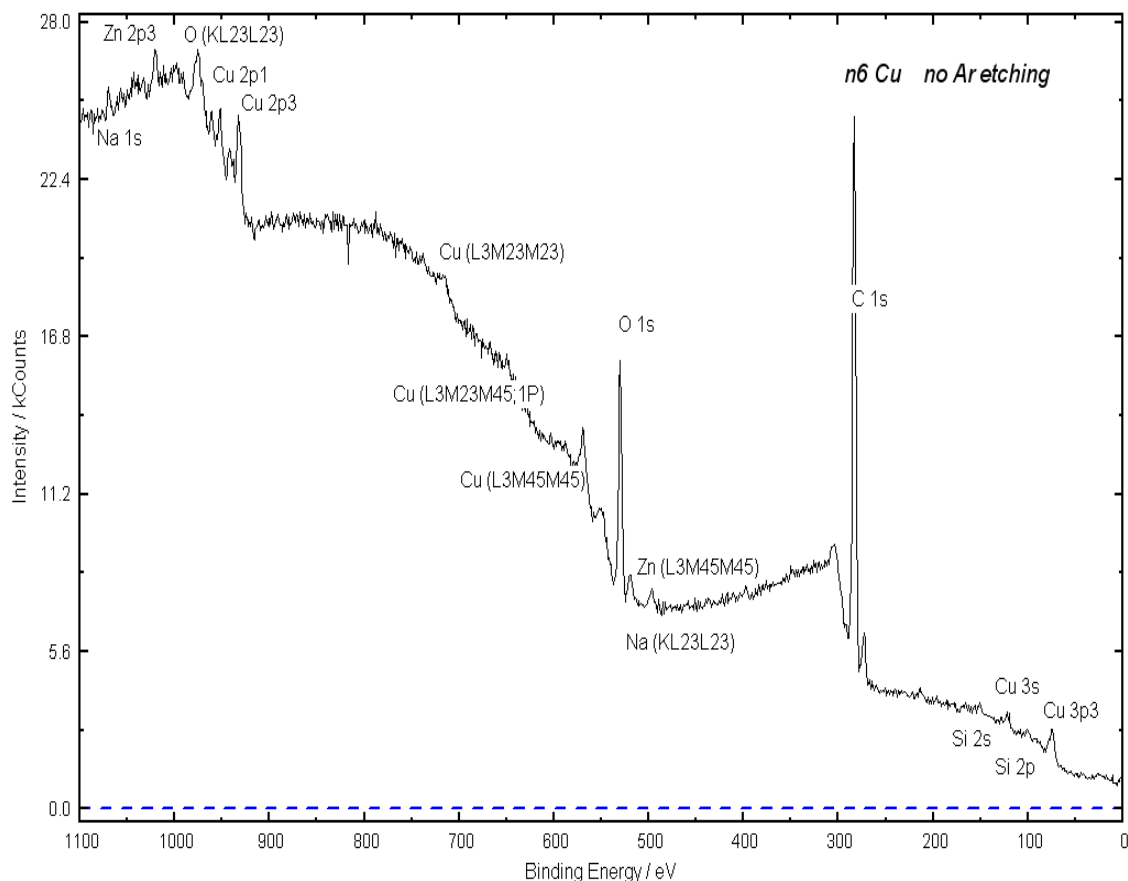


Рисунок 4.84 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения латуни, изношенной на пути трения 2100 м, до травления ионами аргона

До травления зоны трения латуни ионами аргона был получен энергетический спектр 2p электронов меди (рис.4.85). Видно, что в поверхностном слое образца наряду с медью в металлическом состоянии (931эВ) присутствует медь, которая находится в связанном состоянии.

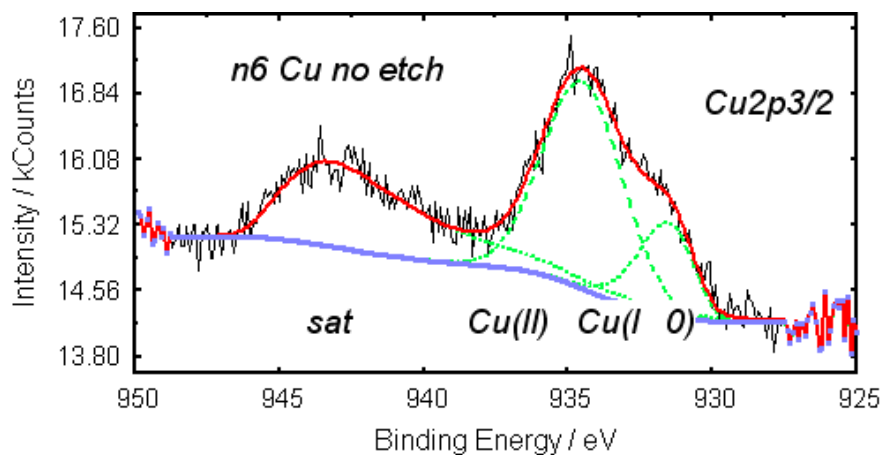


Рисунок 4.85 Энергетический спектр 2p электронов меди с зоны трения латуни до травления ионами аргона

Цинк на поверхности трения антифрикционного сплава находится в соединении, так как энергия связи цинка в металлическом состоянии 1021 эВ, а экспериментально полученный энергетический пик цинка сдвинут в сторону больших энергий (рис.4.86).

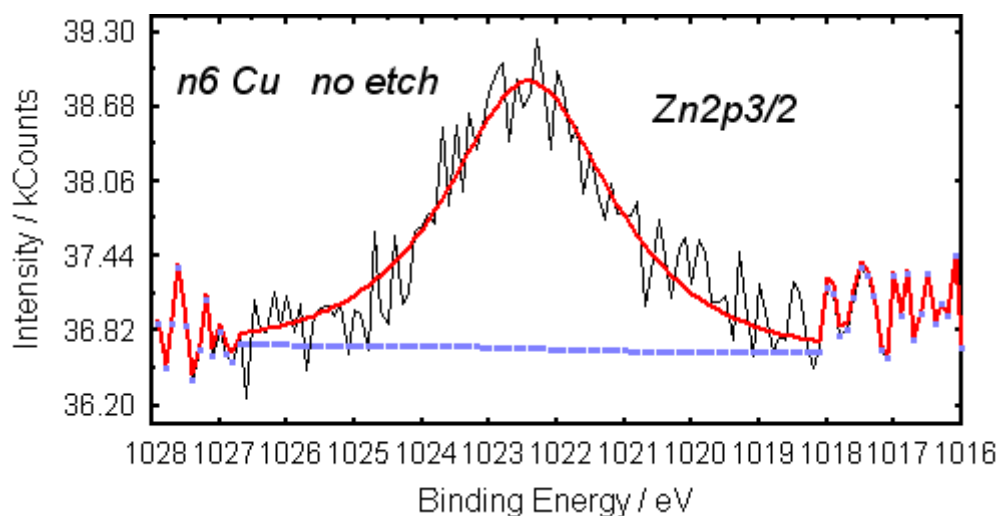


Рисунок 4.86 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения антифрикционного сплава до травления ионами аргона

На рис. 4.87 представлены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с поверхностного слоя латуни, изношенной на пути трения 2100 м после травления ионами аргона и удаления слоя порядка 300 нм. Рассмотрение полученных данных позволяет отметить, что после травления зоны трения латуни ионами аргона значительно снизились энергетические пики, соответствующие кислороду и углероду. В то же время возросли энергетические пики меди, а интенсивность энергетических пиков цинка незначительна.

После травления поверхностного слоя латуни ионами аргона и удаления слоя порядка 300 нм были получены энергетические спектры 2р электронов меди (рис.4.88) и цинка (рис.4.89). Сравнение энергии связи меди и цинка в металлическом состоянии с экспериментально полученными данными свидетельствует о том, что медь в поверхностном слое латуни находится в соединении, а цинк в металлическом состоянии. В другом месте зоны трения латуни медь и цинк находятся в связанном состоянии.

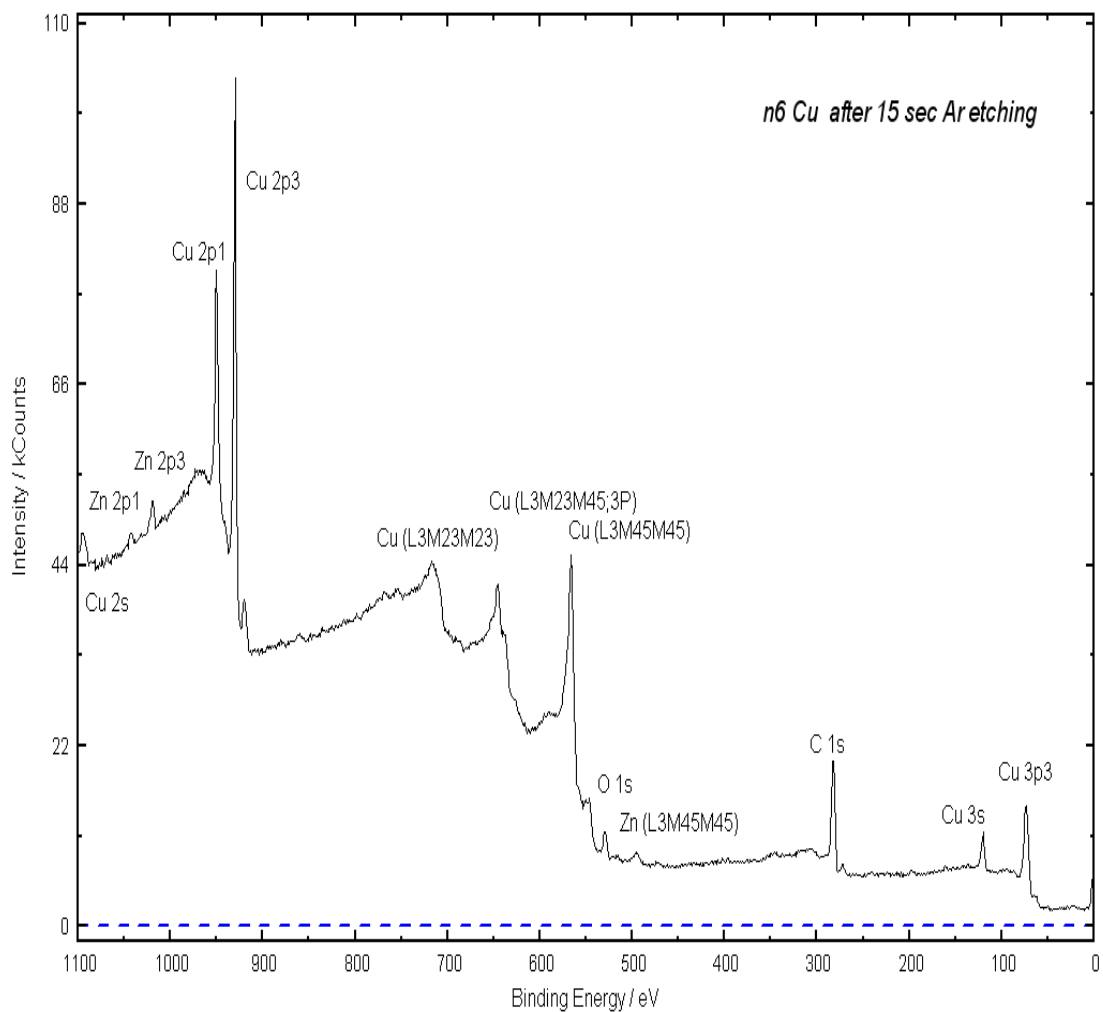


Рисунок 4.87 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения латуни после травления ионами аргона

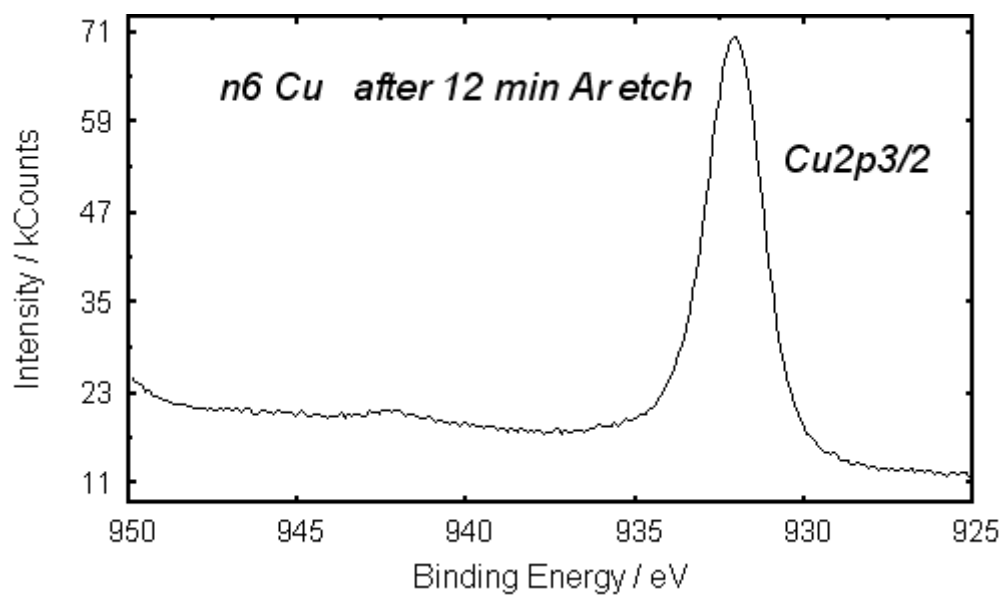


Рисунок 4.88 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения медного сплава после удаления слоя толщиной порядка 300 нм

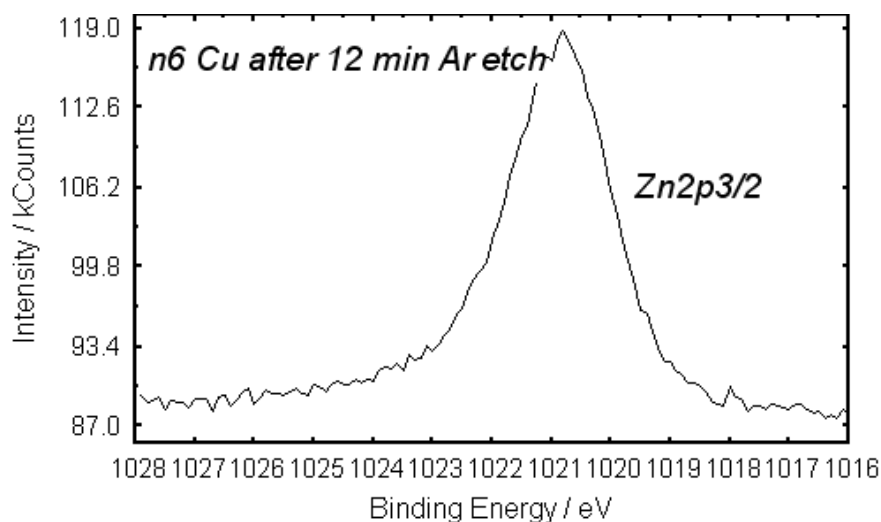


Рисунок 4.89 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения латуни после удаления слоя толщиной порядка 300 нм

Элементный состав, строение и толщина металлосодержащей пленки, сформировавшейся в процессе взаимодействия триады трения на пути 2100 м (рис.4.90), свидетельствует о том, что в состав пленки входит кислород, углерод, медь и цинк, а ее толщина порядка 600 нм.

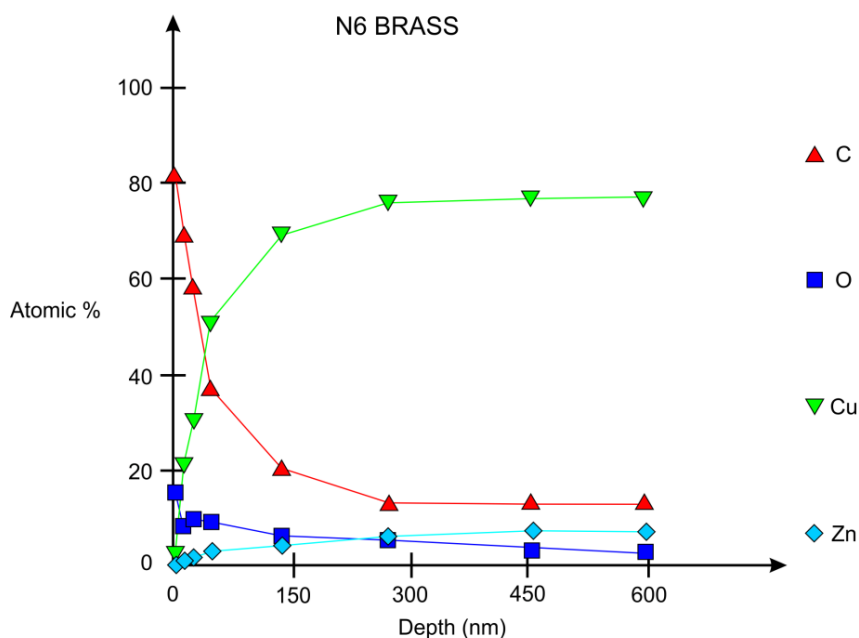


Рисунок 4.90 Элементный состав, строение и толщина металлосодержащей пленки в зоне трения латуни, изношенной на пути трения 2100 м

На основании проведенных послойных рентгеннофотоэлектронных исследований зоны трения латуни, изношенной в глицерине на пути трения 70-2100 м, можно отметить, что в диапазоне 700-1400 м формируется металлосодержащая пленка толщиной порядка 0,6 мкм, в состав которой входит кислород, углерод, медь, цинк. Металлосодержащая пленка в зоне трения латуни расположена участками, в которых медь и цинк находятся в химически связанном соединении с кислородом.

Зона трения стального образца, изношенного в глицерине в паре с латунью, покрыта углеводородными соединениями. Энергетические спектры 1s электронов углерода, полученные с зоны трения стального образца, изношенного в глицерине на пути трения 70 м, приведены на рис. 4.91.

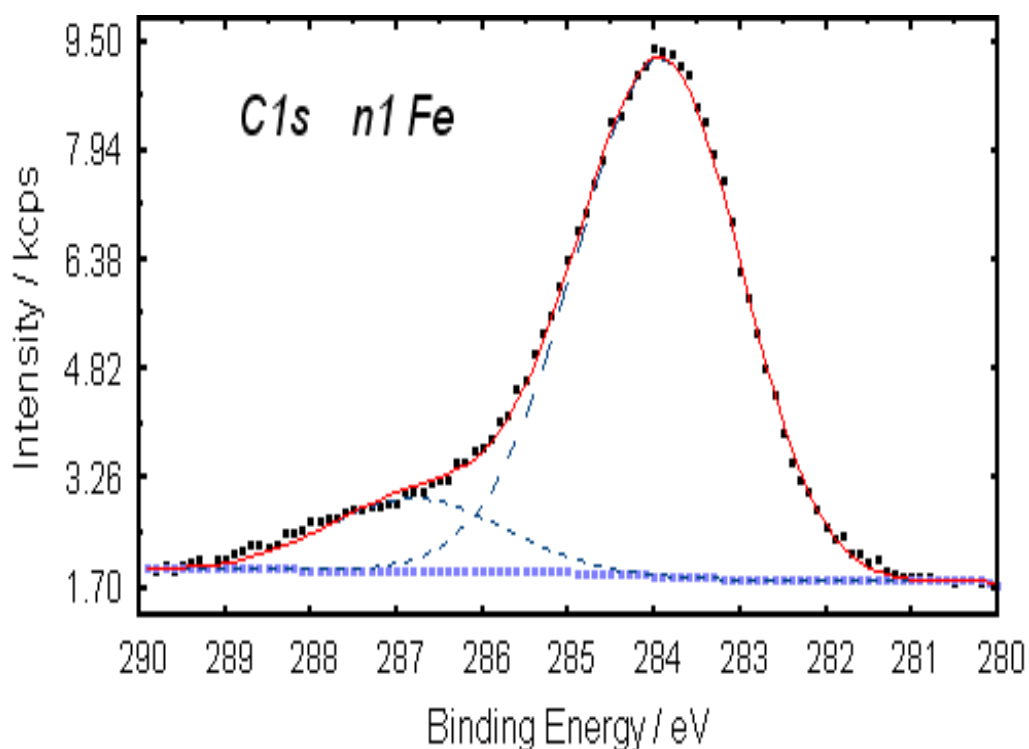


Рисунок 4.91 Энергетические спектры 1s электронов углерода с зоны трения стального образца

Энергетический спектр 1s электронов углерода с зоны трения стального образца показывает, что энергия связи углерода 284 эВ, то есть углерод находится в связанном состоянии. До травления зоны трения стального образца ионами аргона были получены энергетические спектры 2p

электронов железа с зоны трения стального образца, работавшего в паре с антифрикционным сплавом в глицерине на пути трения 70 м (рис.4.92).

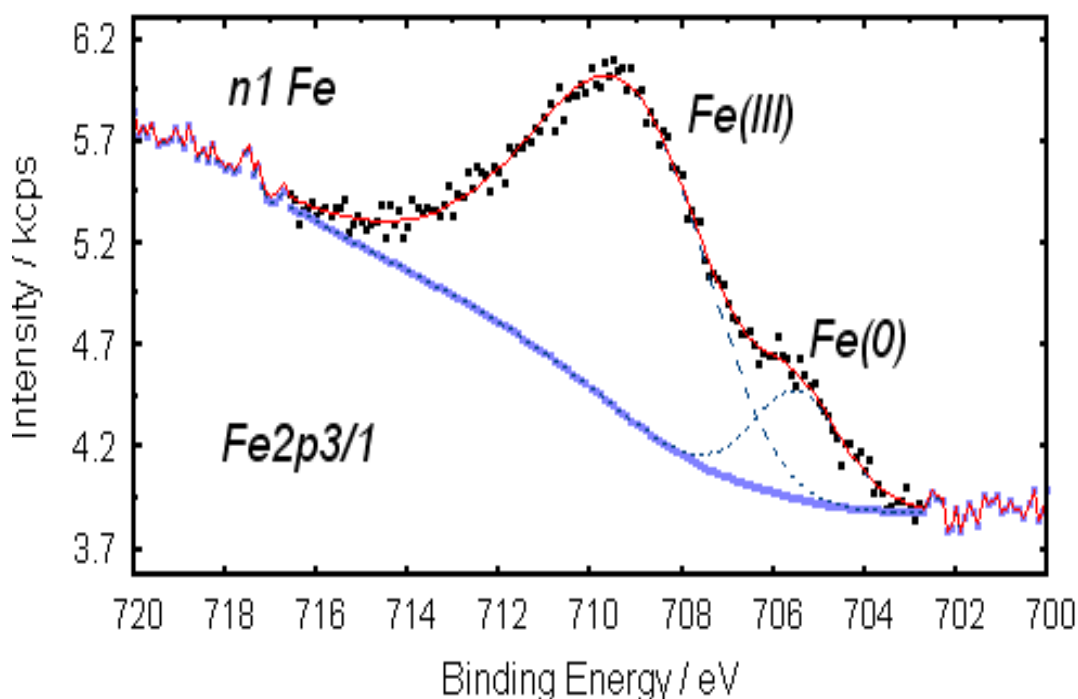


Рисунок 4.92 Энергетические спектры 2р электронов железа с зоны трения стального образца.

Энергетический спектр железа может быть разложен на два компонента, соответствующих окисленному (Fe_3O_4) и металлическому состоянию. Соотношение двух пиков может соответствовать наличию оксидной пленки толщиной 3-4 нм.

На рис. 4.93 и 4.94 представлены энергетические спектры 2р электронов меди и цинка с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 70 м. Экспериментально полученные энергии связи меди (931 эВ) и цинка (1021 эВ) позволяют считать, что медь и цинк в поверхностном слое стального образца находятся в металлическом состоянии. После травления зоны трения ионами аргона и удаления слоя были получены энергетические спектры 2р электронов железа с зоны трения стального образца (рис.4.95). Энергетический спектр 2р электронов железа можно разделить на три компонента, соответствующих Fe_3O_4 , Fe_2O_3 и металлическому состоянию.

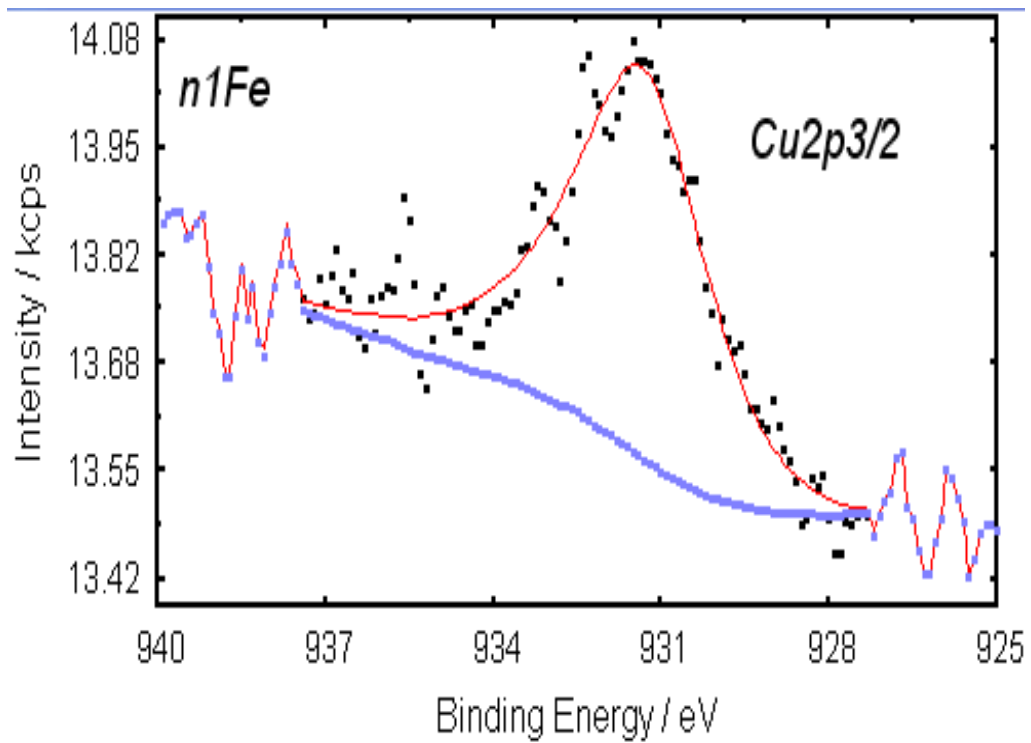


Рисунок 4.93 Энергетические спектры 2р электронов меди с зоны трения стального образца

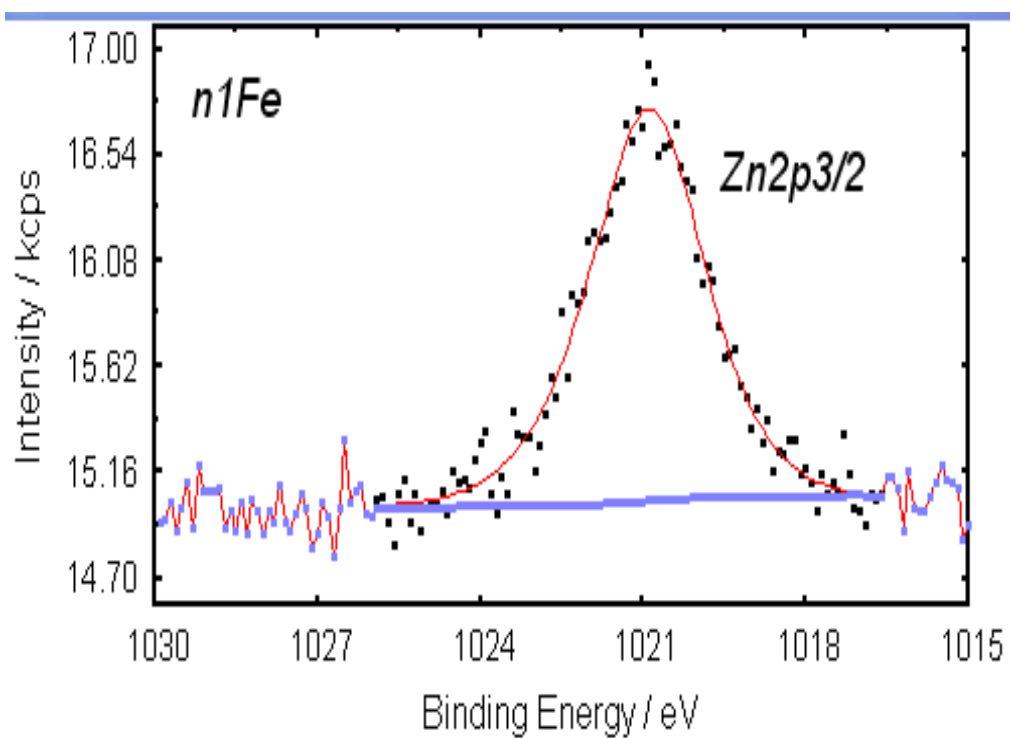


Рисунок 4.94 Энергетические спектры 2р электронов цинка с зоны трения стального образца.

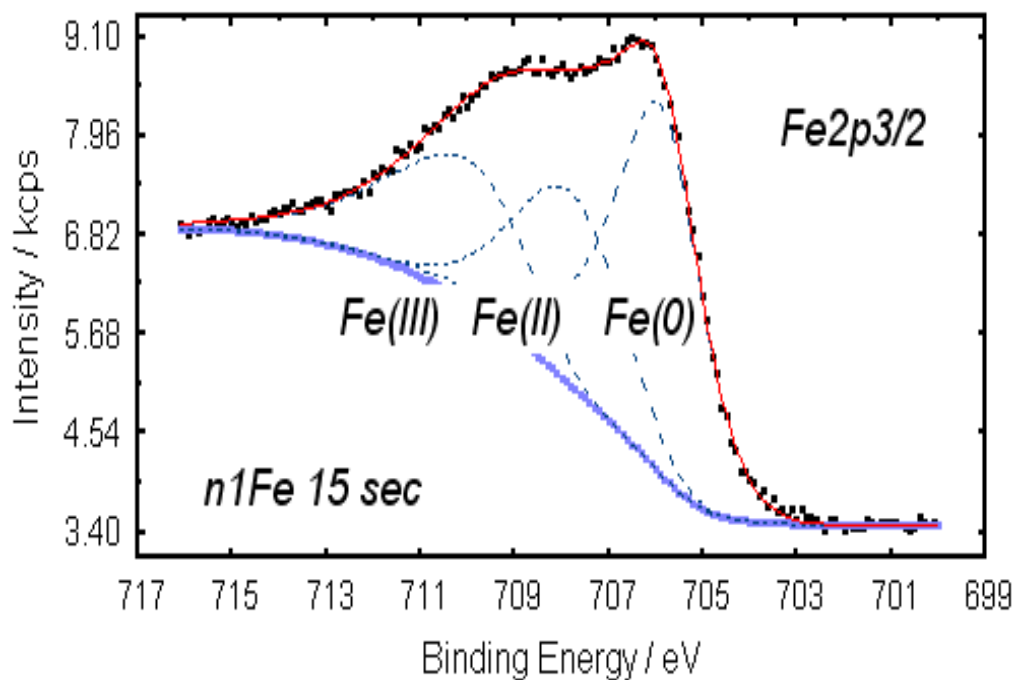


Рисунок 4.95 Энергетические спектры 2р электронов железа с зоны трения стального образца после травления ионами аргона

Дальнейшее травление зоны трения стального образца ионами аргона (рис.4.96) показало, что в поверхностном слое присутствует железо в металлическом состоянии и железо в окисленном состоянии (Fe_2O_3).

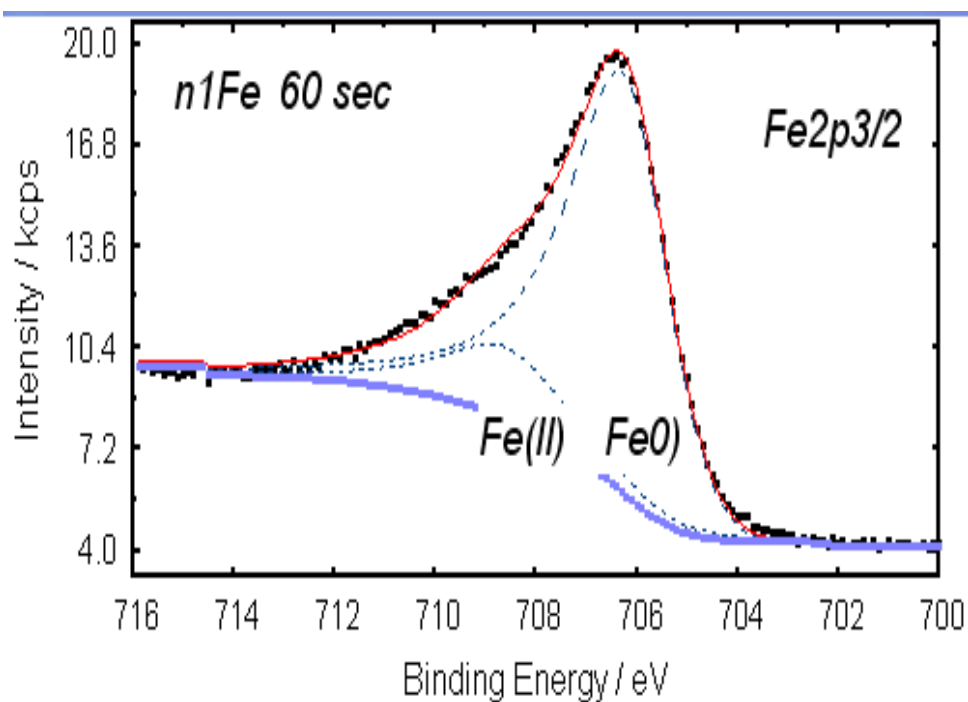


Рисунок 4.96 Энергетические спектры 2р электронов железа с зоны трения стального образца после травления ионами аргона

Травление зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 70 м (рис.4.97) свидетельствует о том, что железо находится в металлическом состоянии.

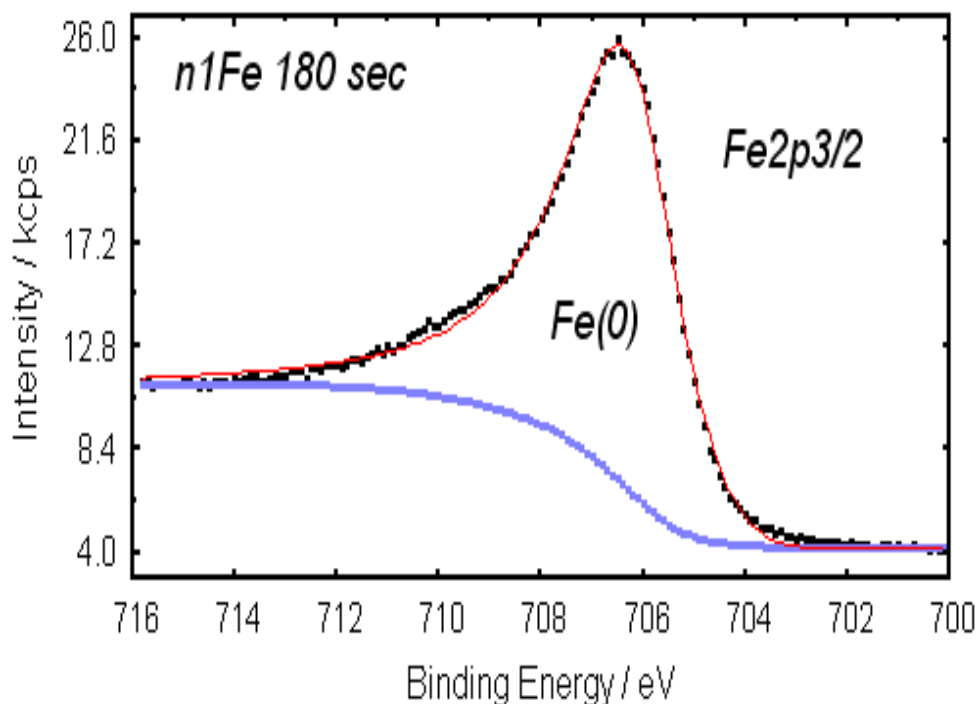


Рисунок 4.97 Энергетические спектры 2р электронов железа с зоны трения стального образца после травления ионами аргона в течение 180 сек

После травления зоны трения стального образца ионами аргона были получены энергетические спектры 1s электронов кислорода с поверхностного слоя (рис.4.98). Энергетический спектр кислорода с зоны трения стального образца может быть разложен на три компоненты, обусловленные разными состояниями кислорода-адсорбированные молекулы воды, гидроксильные группы и кислород, входящий в состав оксидов железа. При дальнейшем травлении зоны трения стального образца ионами аргона все энергетические пики кислорода уменьшаются.

Послойные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения стального образца, изношенного в паре с латунью на пути трения 70 м, позволяют представить схему строения и элементного состава металлсодержащей пленки в зоне трения стального образца, которая показана на рис. 4.99. В состав сформировавшейся металлсодержащей

пленки на стальном образце входит медь, цинк, кислород, углерод, а также железо.

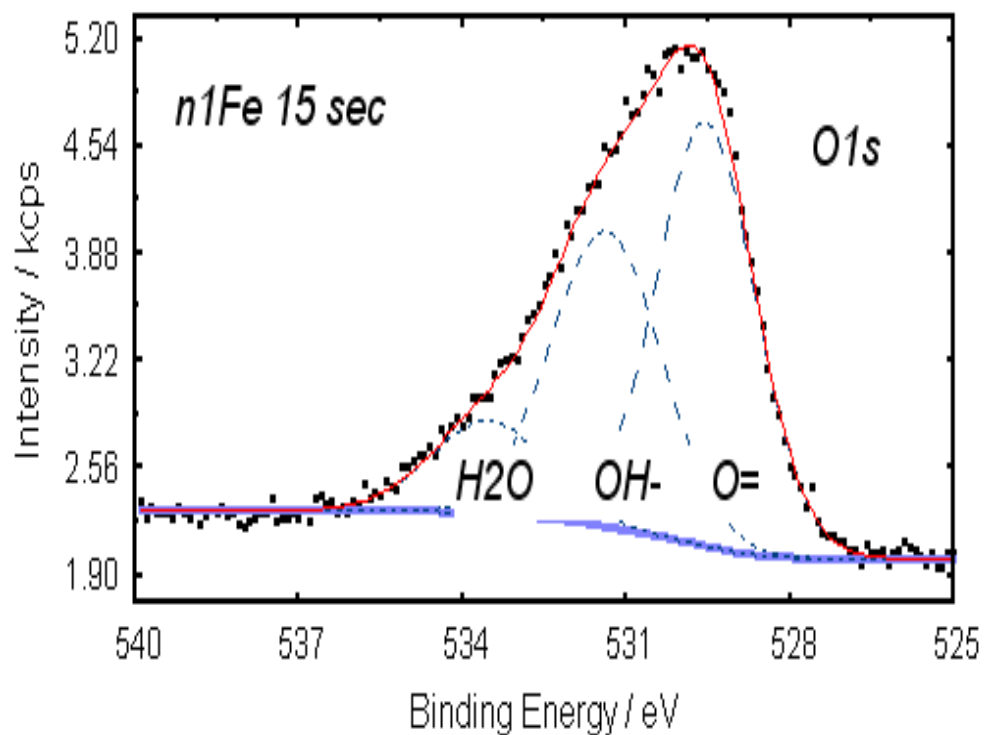


Рисунок 4.98 Энергетические спектры 1s электронов кислорода с зоны трения стального образца.

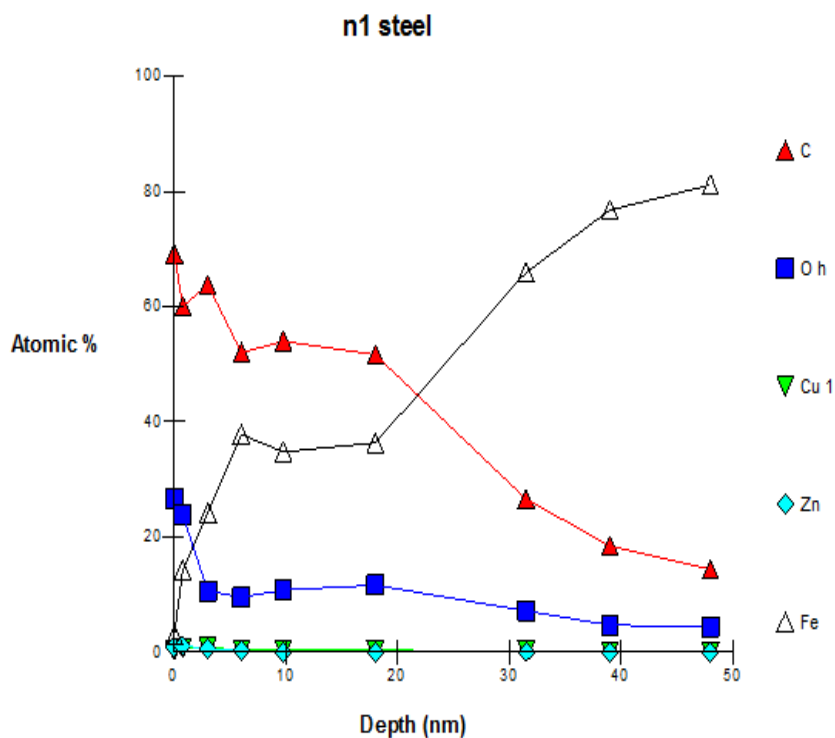


Рисунок 4.99 Элементный состав, строение и толщина металлсодержащей пленки в зоне трения стального образца, изношенного на пути трения 70 м

В связи с тем, что медь и цинк на поверхности трения находятся в металлическом состоянии, можно считать, что их перенос на сталь в начальный период взаимодействия триады трения происходит в результате микросхватывания. Исследования свидетельствуют о том, что на пути трения 70 м при изнашивании пары медный сплав-сталь в глицерине, в зоне трения стального образца образуется металлсодержащая пленка, толщиной порядка 50 нм.

После изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 210 м с зоны трения стального образца до травления ионами аргона были получены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры рис. 4.100.

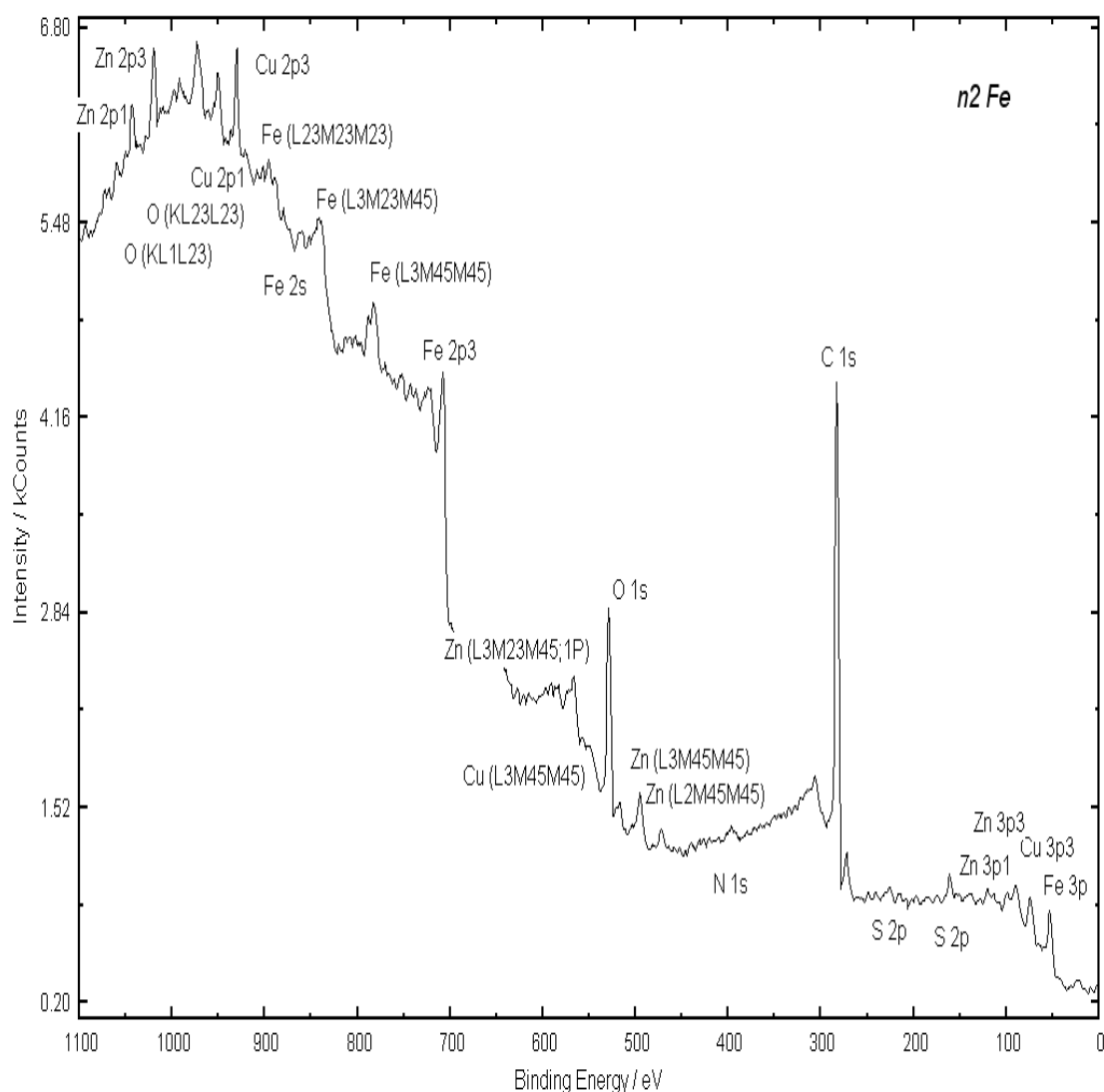


Рисунок 4.100 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 210 м до травления ионами аргона

Наблюдаются интенсивные пики, которые соответствуют углероду и кислороду. Также имеются незначительные пики, которые соответствуют железу, меди и цинку. Железо в зоне трения стального образца в различных участках поверхностного слоя находится в окисленном состоянии (Fe_3O_4), о чем свидетельствует энергетический спектр 2p электронов железа рис. 4.101.

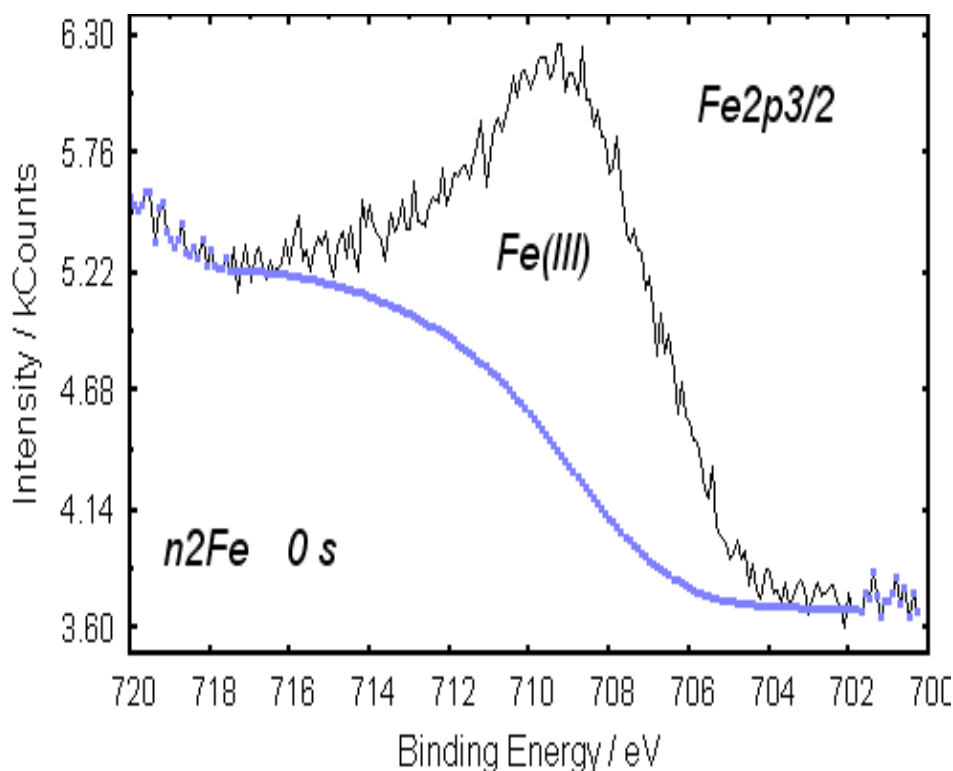


Рисунок 4.101 Энергетический спектр 2p электронов железа с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 210 м, до травления ионами аргона

На рис.4.102 представлены энергетические спектры 1s электронов кислорода с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 210 м в паре с антифрикционным сплавом, до травления ионами аргона. Энергетический спектр кислорода может быть разложен на три составляющие, обусловленные разным состоянием кислорода-адсорбированные молекулы воды, гидроксильные группы и кислород, входящий в состав окисленных соединений железа.

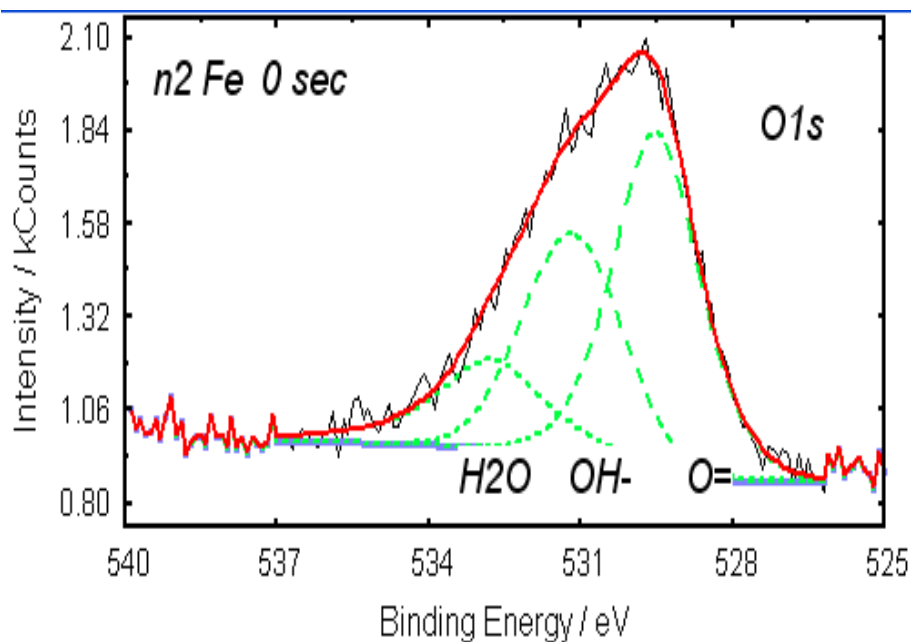


Рисунок 4.102 Энергетические спектры 1s электронов кислорода с зоны трения стального образца, изношенного в глицерине на пути трения 210 м

До травления зоны трения стального образца были получены энергетические спектры 2p электронов меди (рис.4.103) и цинка (рис.4.104), которые позволяют считать, что медь и цинк на поверхности трения находятся в металлическом состоянии.

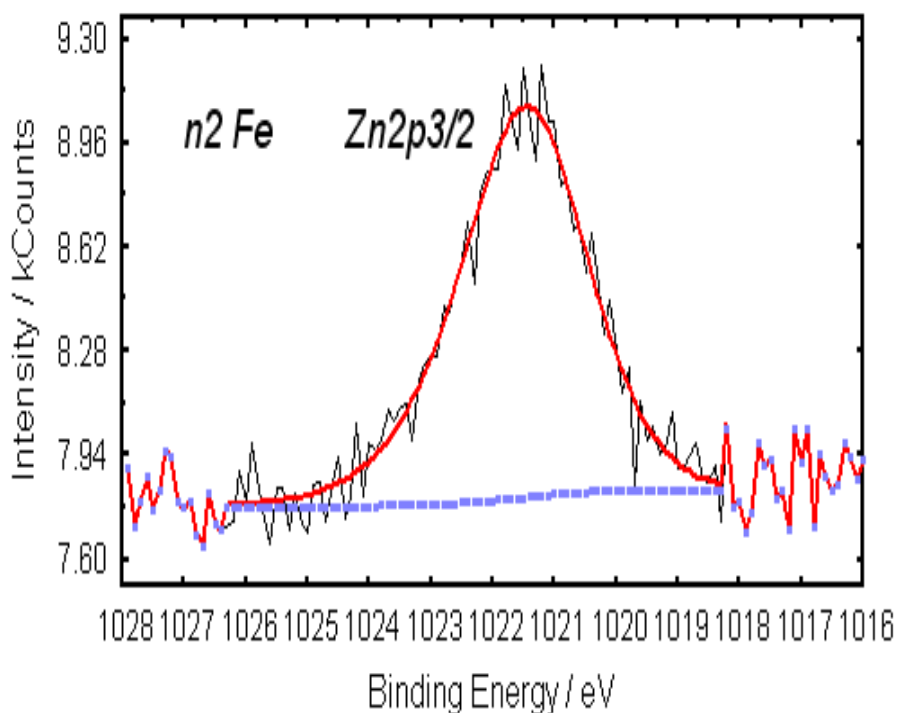


Рисунок 4.103 Энергетический спектр 2p электронов цинка с зоны трения стального образца, изношенного в глицерине на пути трения 210 м

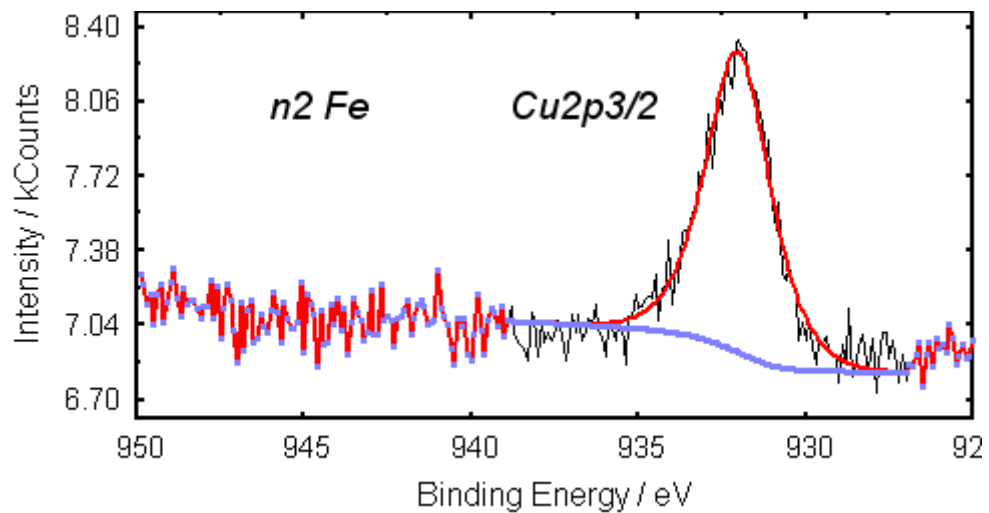


Рисунок 4.104 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 210 м

После травления зоны трения стального образца и удаления слоя были получены энергетические спектры 2р электронов железа, которые представлены на рис.4.105.

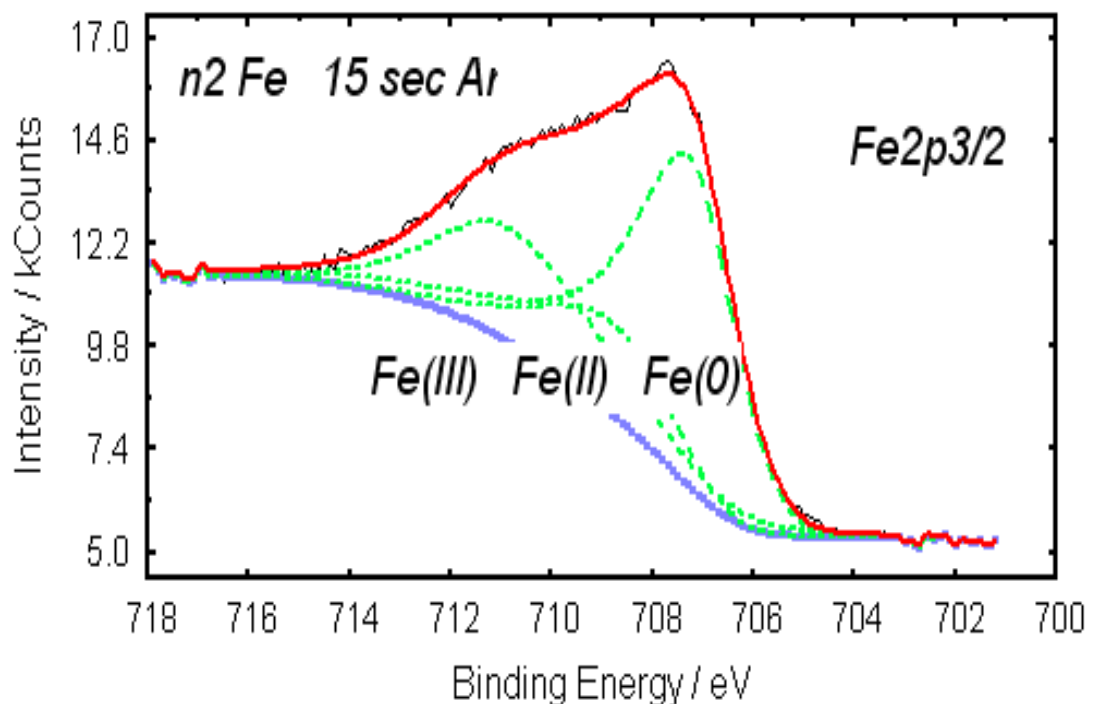


Рисунок 4.105 Энергетический спектр 2р электронов железа с зоны трения стального образца после удаления слоя порядка 30 нм

Энергетический спектр железа, видимо, можно разделить на три составляющие, соответствующие Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , а также металлическому состоянию. Медь и цинк присутствуют в зоне трения в металлическом состоянии. Дальнейшее травление зоны трения стального образца ионами аргона ведет к удалению окисленных соединений железа. Послойные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения стального образца, изношенного в паре с латунью в глицерине на пути трения 210 м позволяют представить состав, строение и толщину металлсодержащей пленки, которая образовалась в процессе взаимодействия триады трения (рис.4.106). Толщина металлсодержащей пленки порядка 50 нм и состоит из кислорода, углерода, меди, цинка и железа.

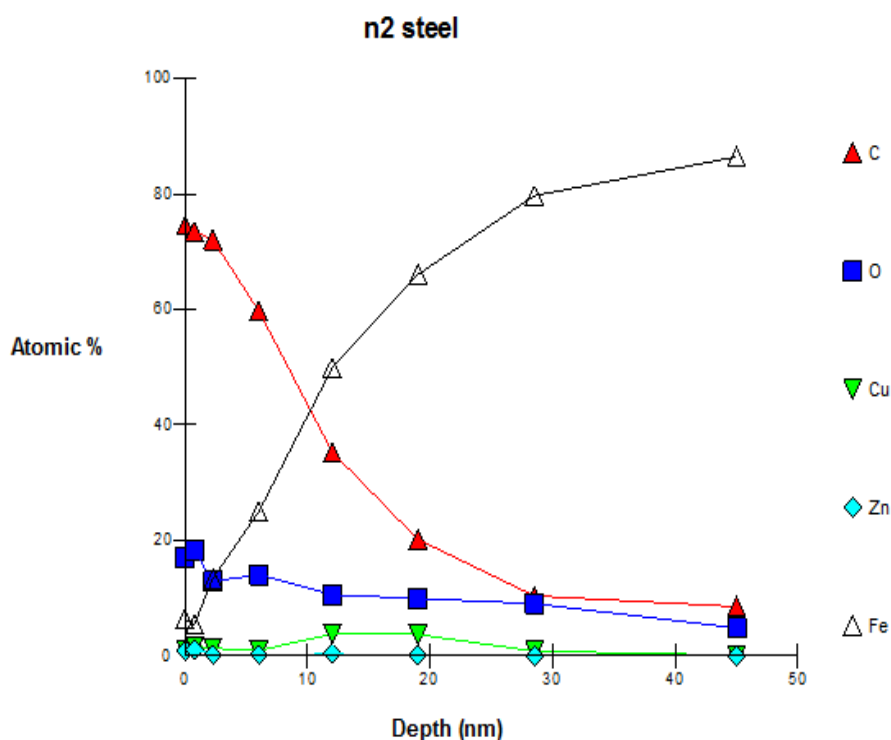


Рисунок 4.106 Состав, строение и толщина металлсодержащей пленки в зоне трения стального образца, изношенного на пути трения 210 м

На рис.4.107 представлены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного в паре с медным сплавом в глицерине на пути трения 350 м. В обзорном спектре наблюдаются энергетические спектры кислорода, углерода, меди, цинка и железа, которое находится в окисленном состоянии (рис.4.108).

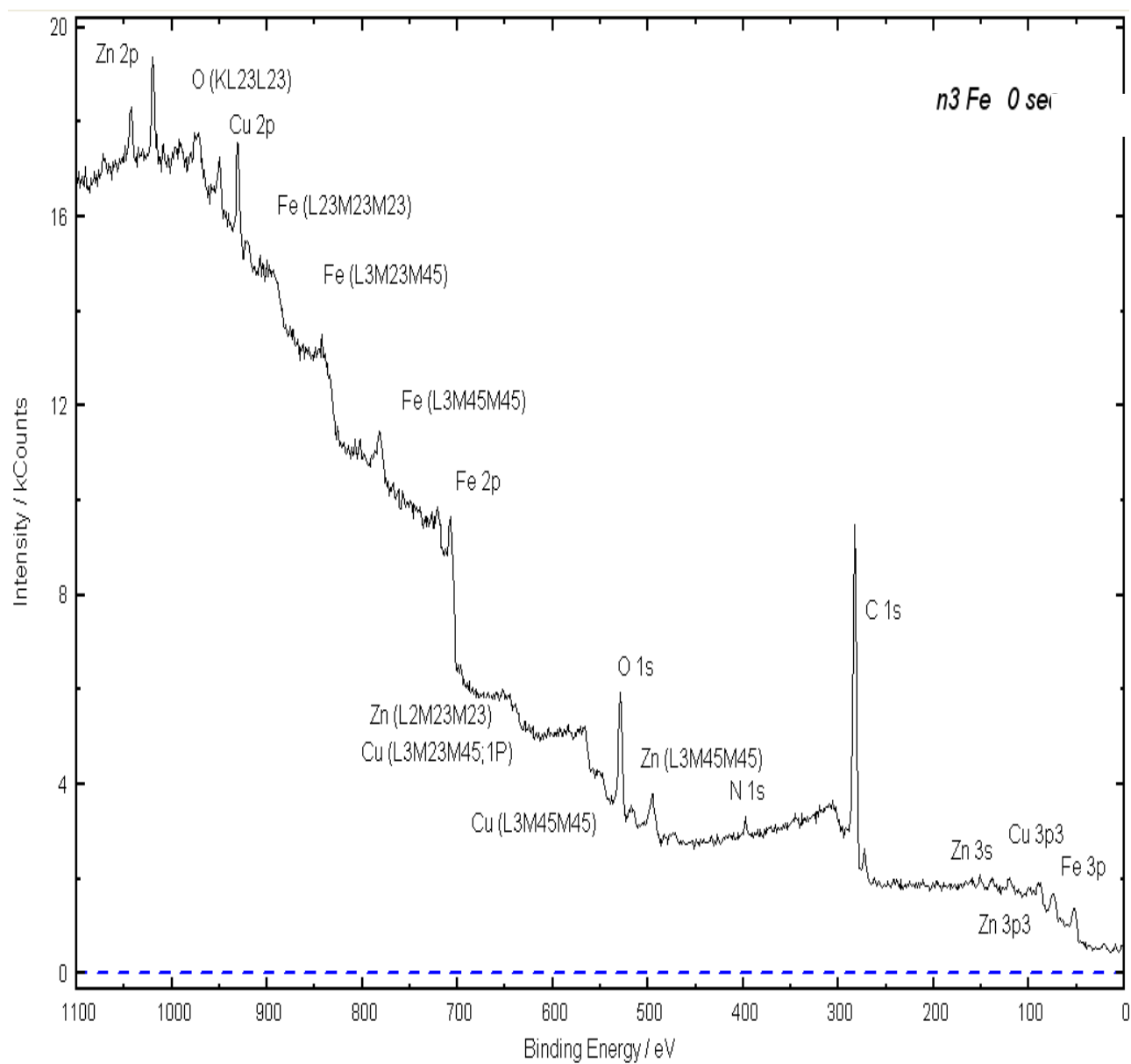


Рисунок 4.107 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 350 м

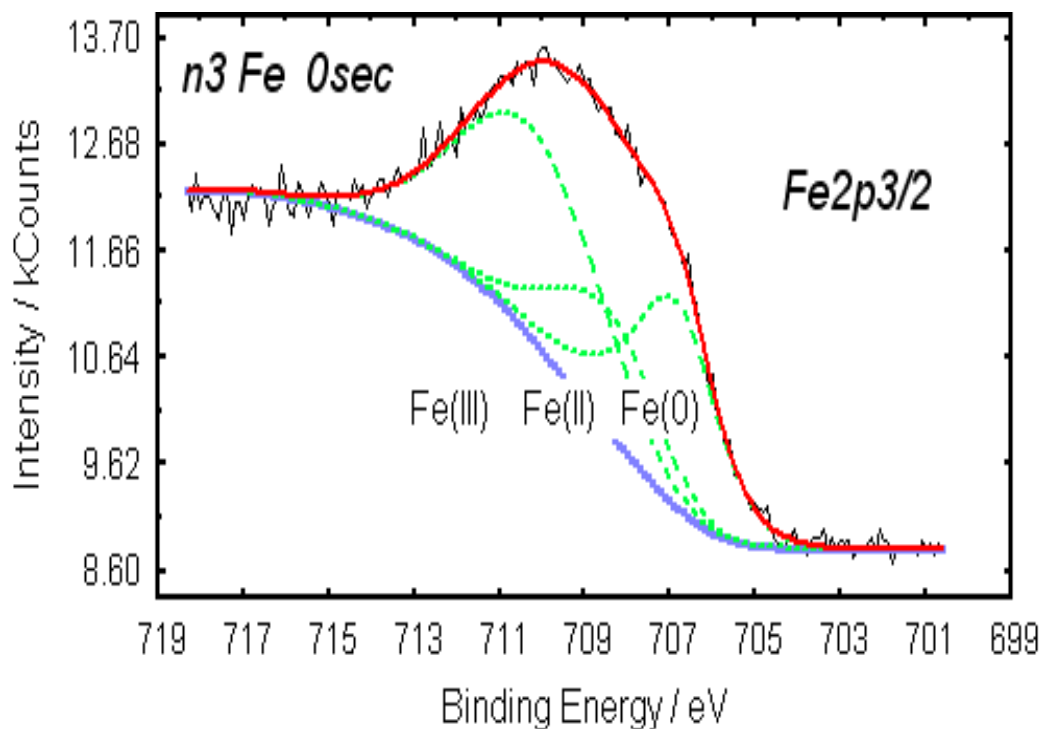


Рисунок 4.108 Энергетический спектр 2р электронов железа с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 350 м, до травления ионами аргона

Из данных рис.4.108 следует, что энергетический спектр железа можно разделить на три компоненты Fe_3O_4 , Fe_2O_3 и металлическое состояние. После травления зоны трения стального образца ионами аргона и удаления слоя порядка 30 нм были получены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры (рис.4.109). Сравнение данных обзорных рентгенофотоэлектронных спектров до травления ионами аргона зоны трения стального образца и после травления поверхностного слоя стального образца, показало, что интенсивность энергетических пиков углерода и кислорода снизилась. В то же время интенсивность энергетических пиков железа, меди и цинка увеличилась. Полученные энергетические спектры 2р электронов меди (рис.4.110) и цинка (рис.4.111) свидетельствуют о том, что в зоне трения стального образца медь и цинк находятся в металлическом состоянии. После травления зоны трения стального образца ионами аргона был получен энергетический спектр 2р электронов железа (рис.4.112). Можно отметить, что в зоне трения стального

образца железо находится как в окисленном, так и в металлическом состоянии.

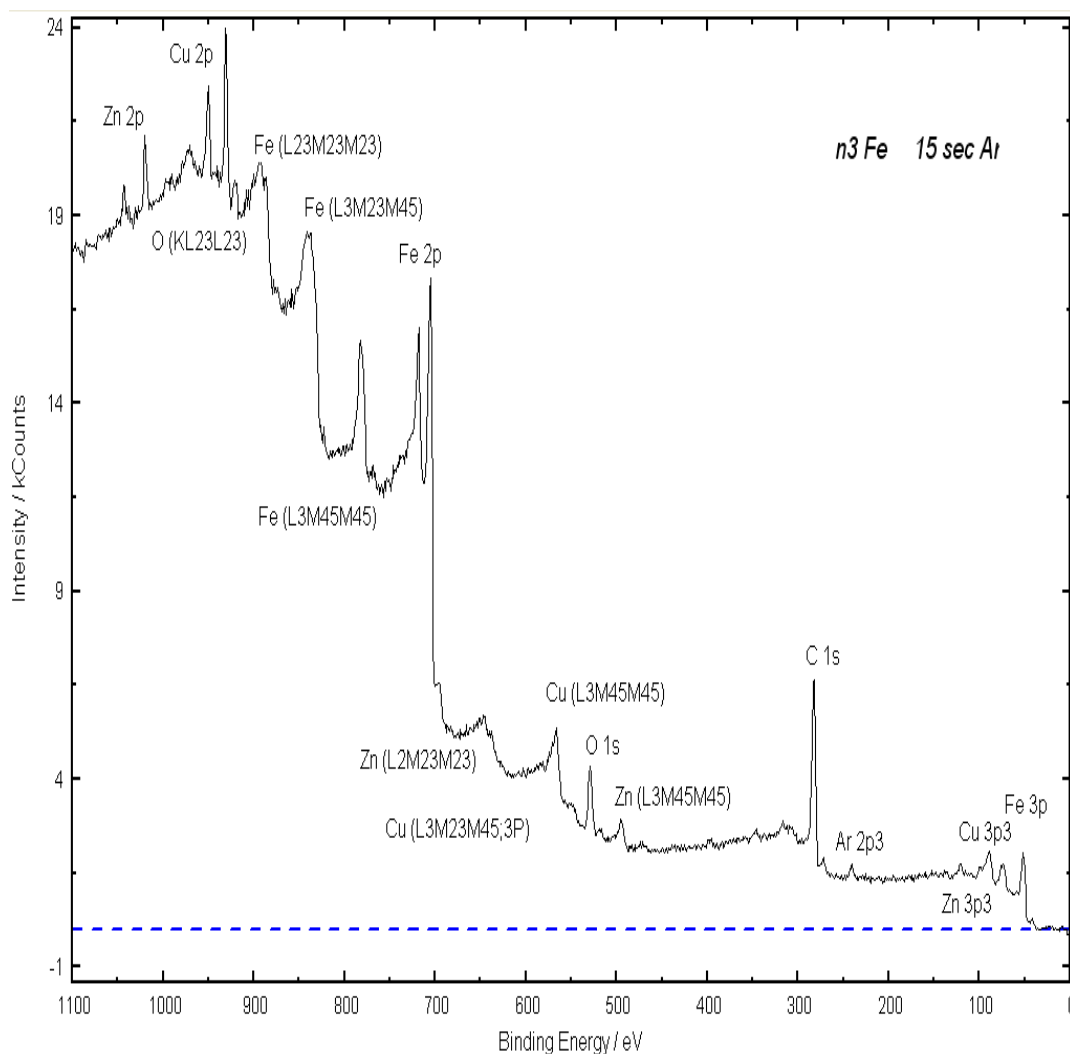


Рисунок 4.109 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца после травления ионами аргона

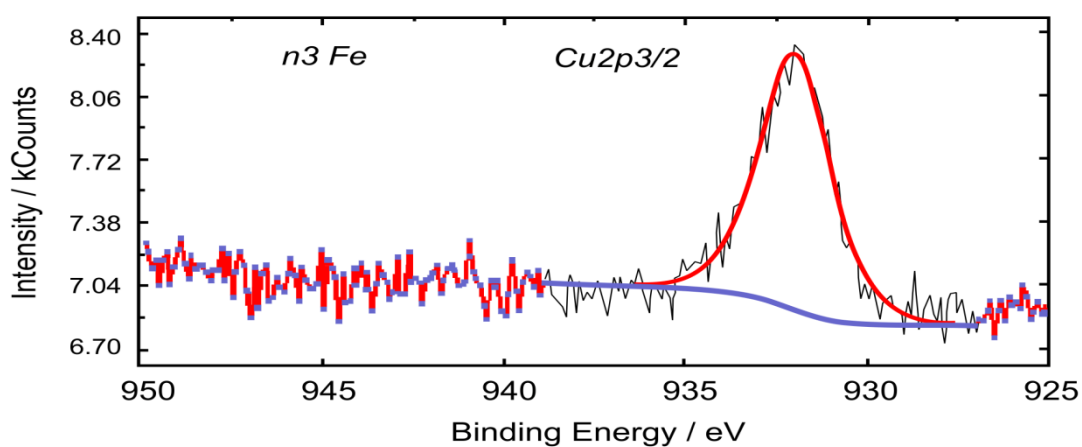


Рисунок 4.110 Энергетический спектр 2p электронов меди с зоны трения стального образца после травления ионами аргона в течение 15 сек

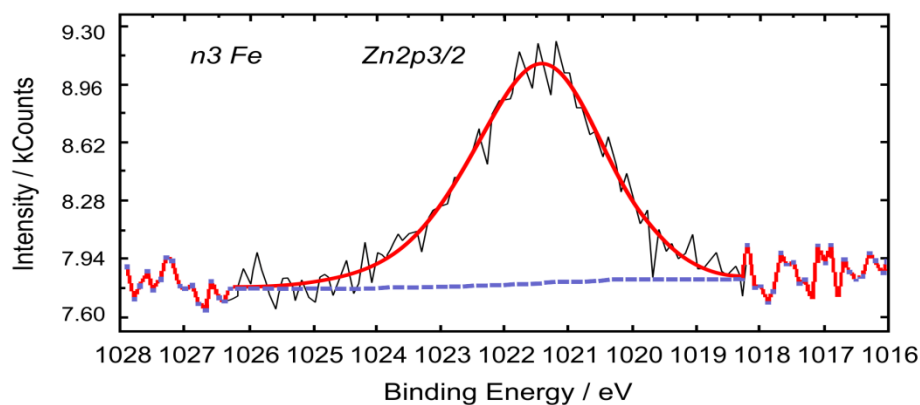


Рисунок 4.111 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 350 м

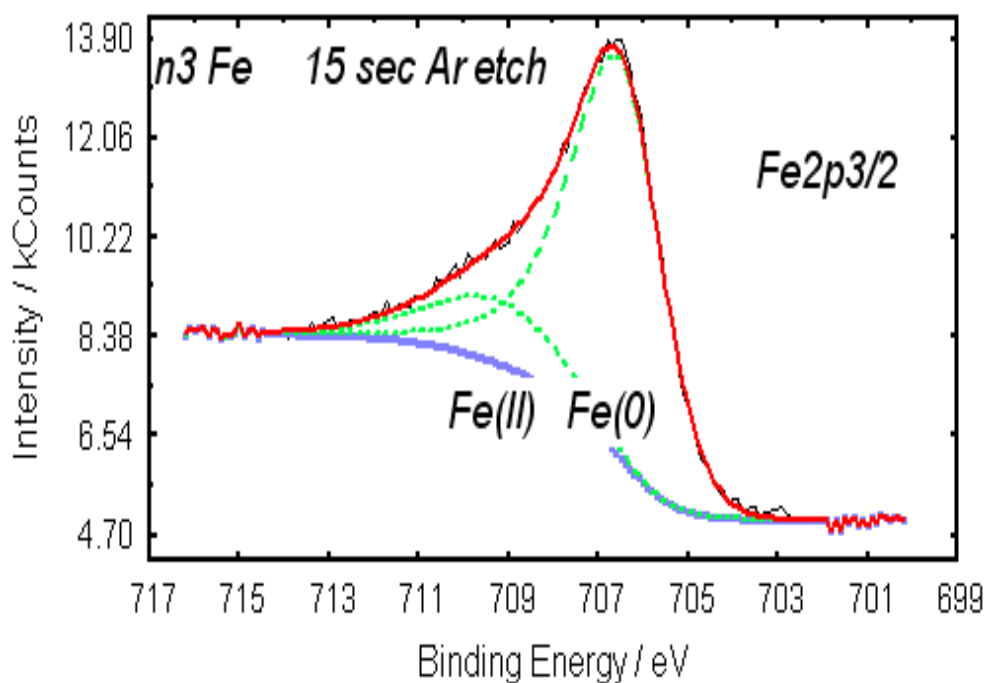


Рисунок 4.112 Энергетический спектр 2р электронов железа с зоны трения стального образца после травления ионами аргона.

В зоне трения стального образца, работавшего в глицерине в паре с антифрикционным сплавом на пути трения 350 м, скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 6 МПа, образовалась металлсодержащая пленка толщиной порядка 50 нм. В состав пленки входит кислород, углерод, железо, медь и цинк. Медь и цинк в составе пленки находятся в металлическом состоянии (рис.4.113).

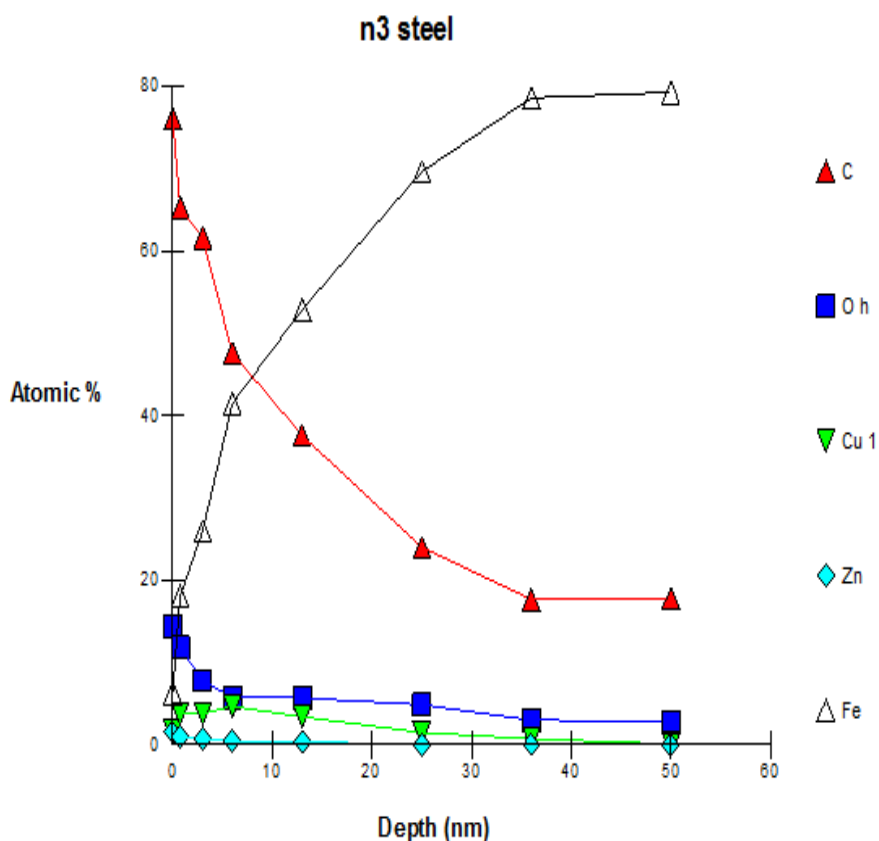


Рисунок 4.113 Состав, строение и толщина металлосодержащей пленки в зоне трения стального образца, изношенного на пути трения 350 м

После изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 700 м с зоны трения стального образца до травления ионами аргона были получены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры (рис.4.114). В обзорных спектрах имеются энергетические пики кислорода, углерода, меди и цинка. Интенсивность энергетических пиков железа до травления зоны трения стального образца незначительна. Железо в зоне трения стального образца до травления ионами аргона находится в окисленном состоянии (рис.4.115). Видимо, железо представлено соединениями с кислородом Fe_3O_4 , Fe_2O_3 . Травление зоны трения стального образца ионами аргона показало, что наряду с окисленными соединениями железа имеется железо и в металлическом состоянии (рис.4.116). Эксперименты показали, что медь и цинк в зоне трения стального образца, работавшего в паре с медным сплавом в глицерине на пути трения 700 м, находятся в металлическом состоянии (рис.4.117 и рис. 4.118).

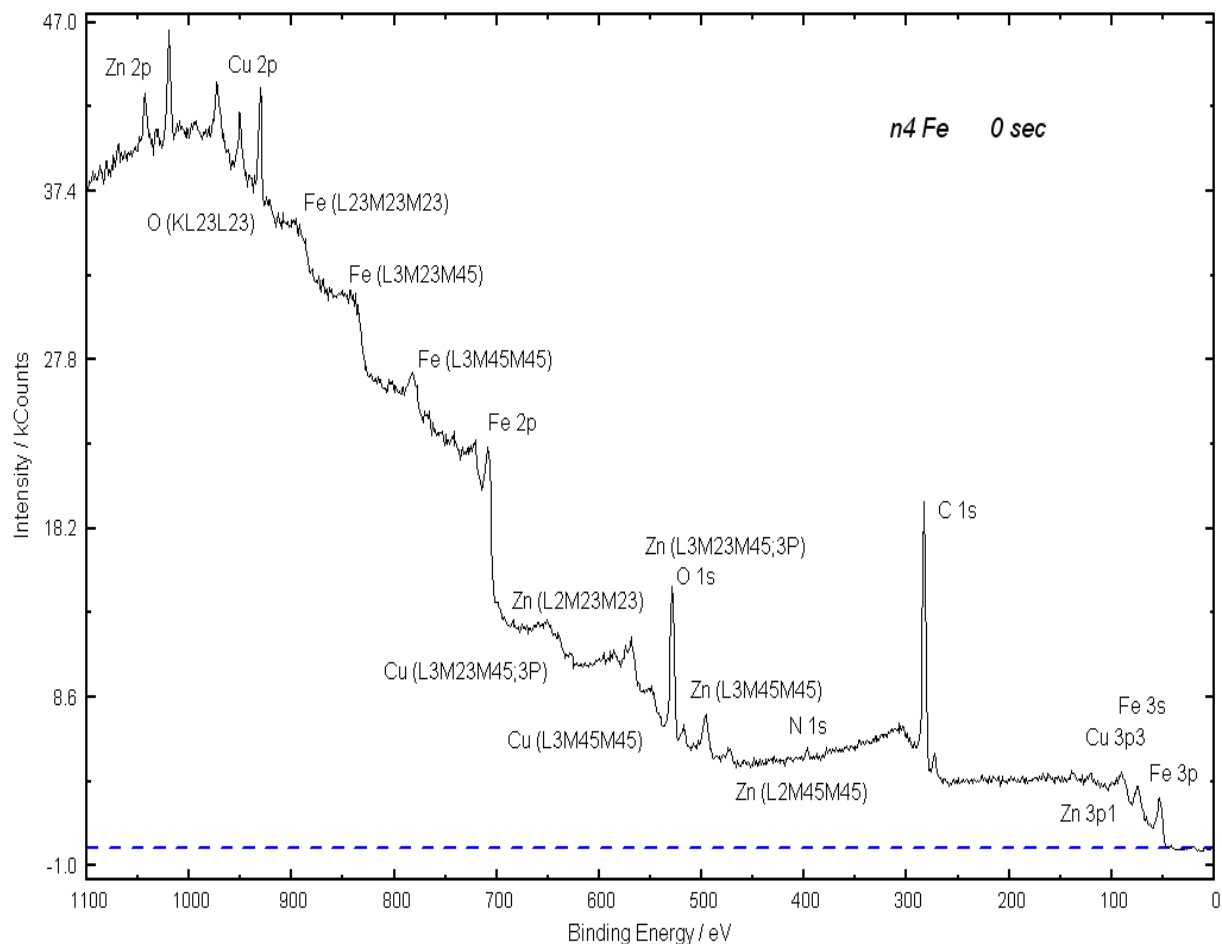


Рисунок 4.114 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 700 м

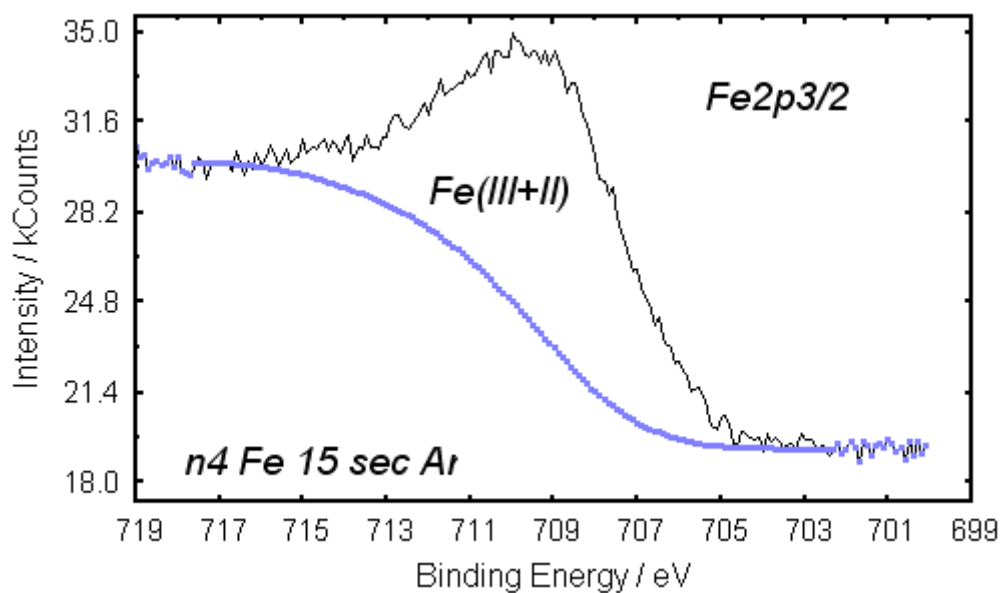


Рисунок 4.115 Энергетический спектр 2p электронов железа с зоны трения стального образца до травления ионами аргона

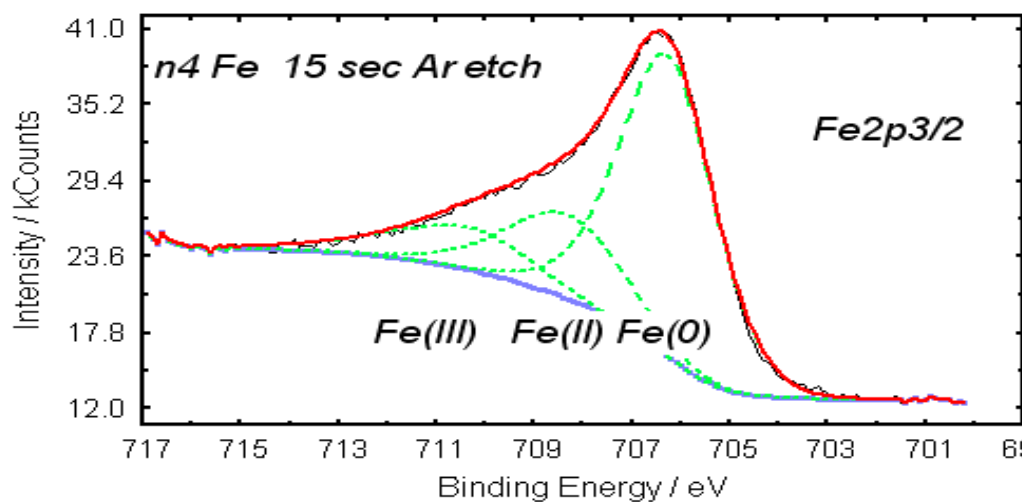


Рисунок 4.116 Энергетический спектр 2р электронов железа с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 700 м, после травления ионами аргона

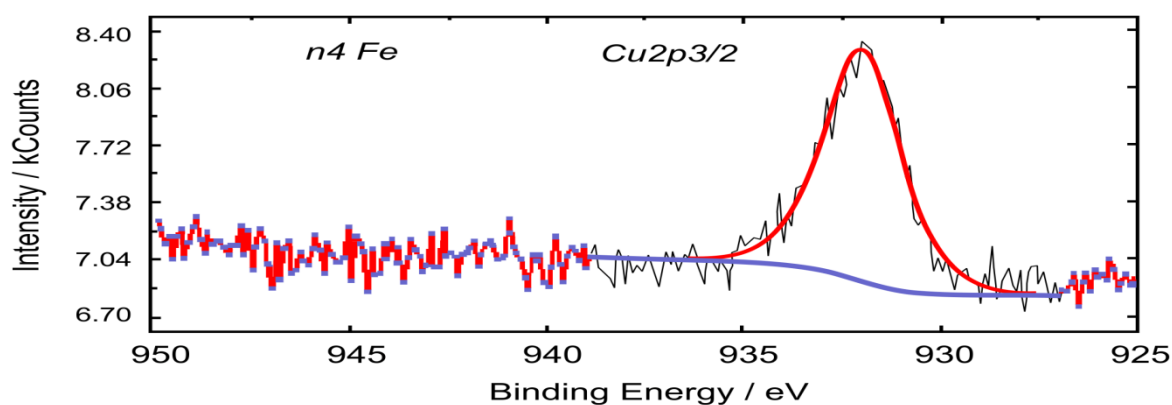


Рисунок 4.117 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения стального образца на пути трения 700 м

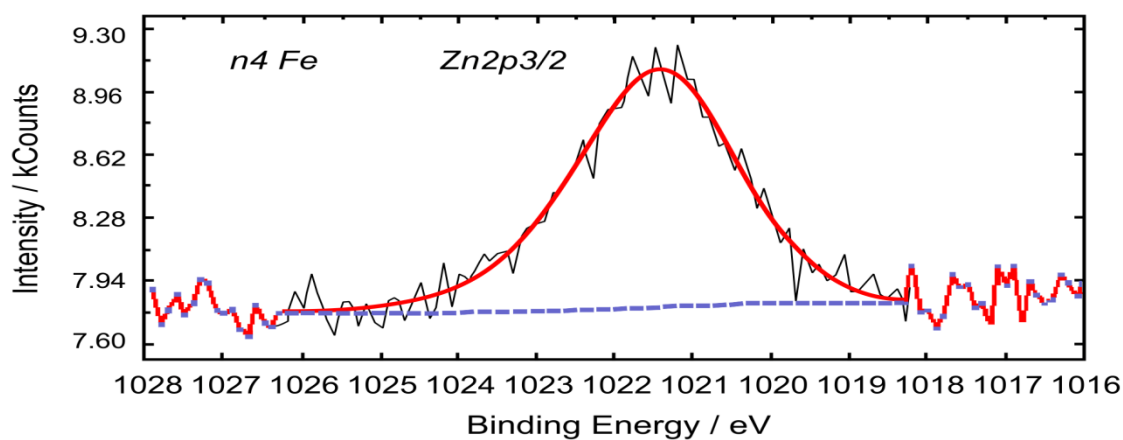


Рисунок 4.118 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 700 м

Сведения об элементарном составе, строении и толщине металлсодержащей пленки, сформировавшейся в процессе взаимодействия триады трения на стальном образце на пути трения 700 м, представлены на рис. 4.119. В состав защитной пленки на стальном образце входят кислород, углерод, медь, цинк, которые находятся в металлическом состоянии, и железо. Толщина металлсодержащей пленки порядка 50 нм.

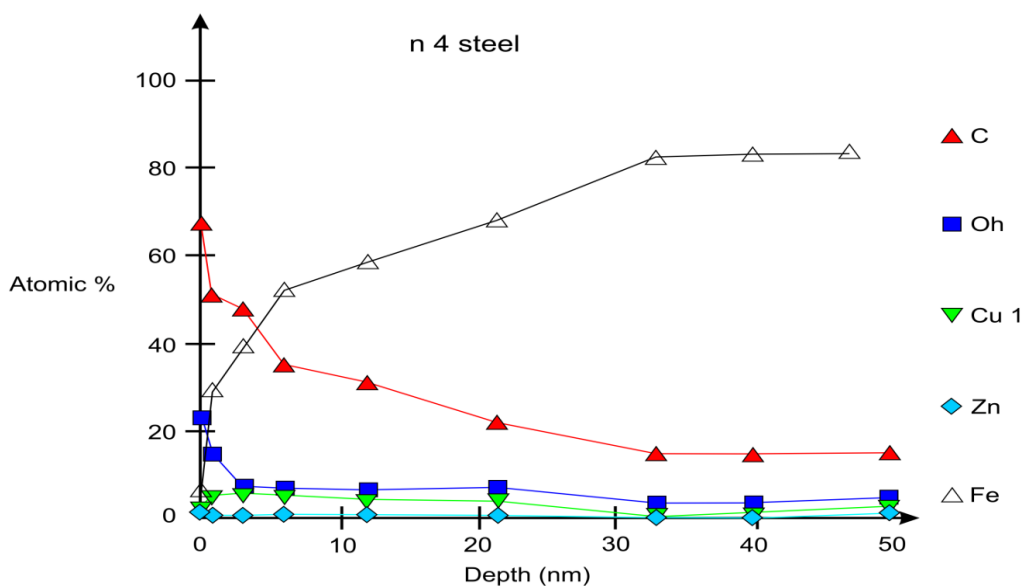


Рисунок 4.119 Элементный состав, строение и толщина металлсодержащей пленки в зоне трения стального образца, изношенного на пути трения 700 м

После работы пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 1400 м с поверхностного слоя стального образца до травления ионами аргона были получены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры (рис.4.120).

Можно отметить наличие интенсивных пиков 285Эв и 531Эв, которые соответствуют углероду и кислороду. Имеются энергетические пики железа (710Эв), а также интенсивный пик меди (931 эВ). Энергетический пик 1021 Эв, который соответствует цинку имеет малую интенсивность. В зоне трения стального образца имеются натрий и сера, содержание которых связано с атмосферой воздуха. После травления зоны трения ионами аргона в течение 15 сек. и удаления слоя был получен энергетический спектр 2р

электронов железа (рис.4.121). Энергетический спектр железа можно разделить на три составляющие - Fe_3O_4 , Fe_2O_3 и металлическому состоянию.

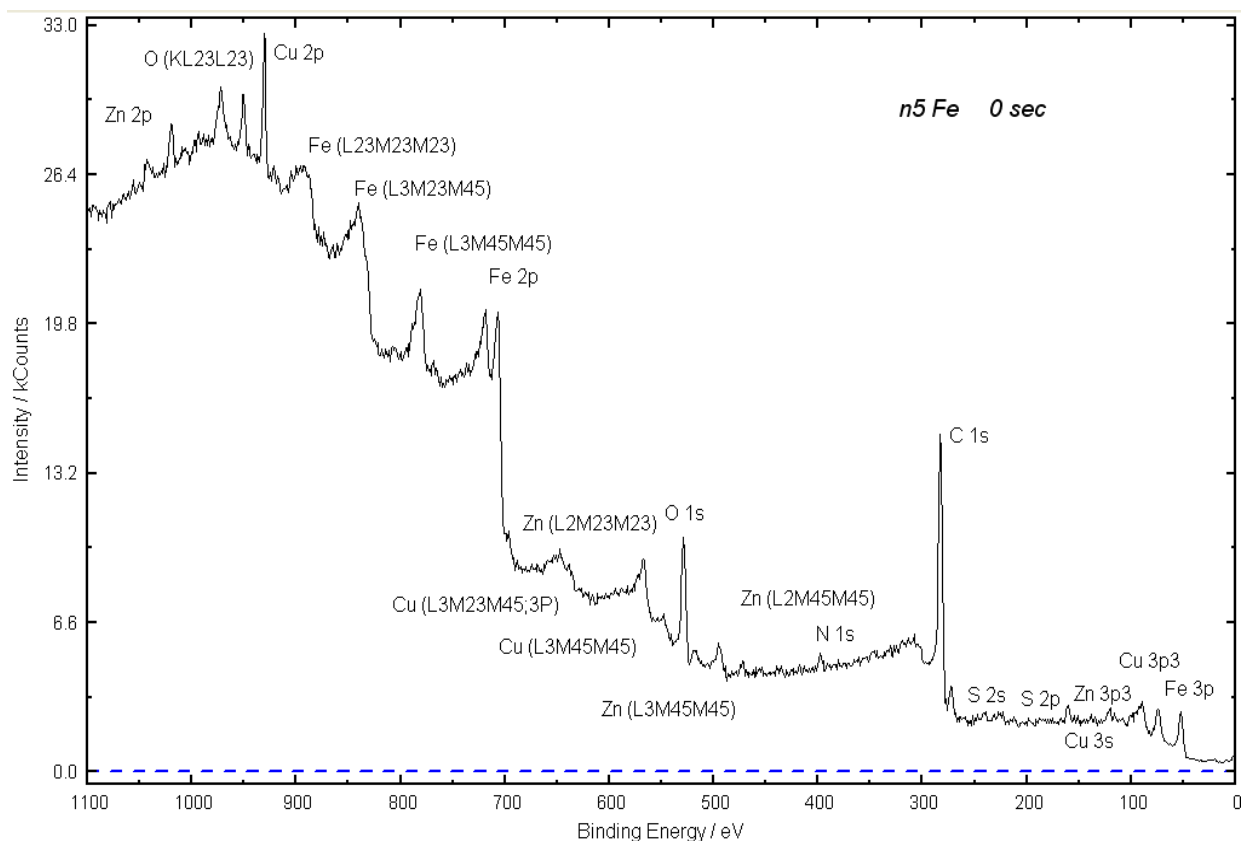


Рисунок 4.120 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 1400 м

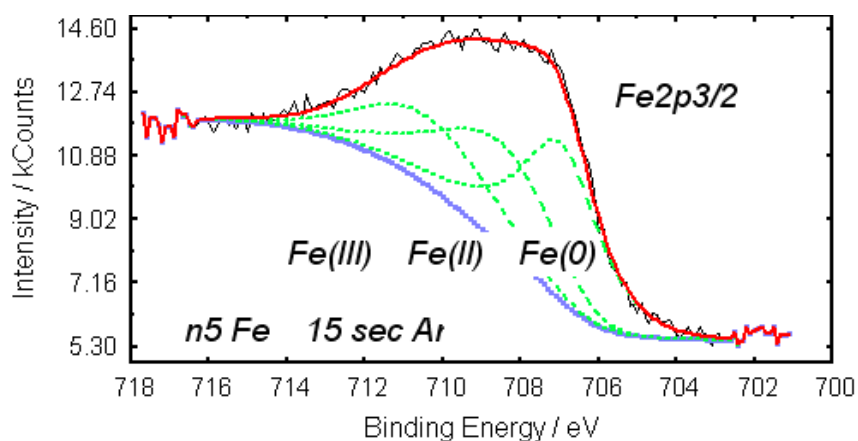


Рисунок 4.121 - Энергетический спектр 2p электронов железа с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 1400 м

Энергетический спектр 2p электронов меди с зоны трения стального образца после травления ионами аргона показал (рис.4.122), что медь в

поверхностном слое стального образца находится в соединении, видимо, с кислородом.

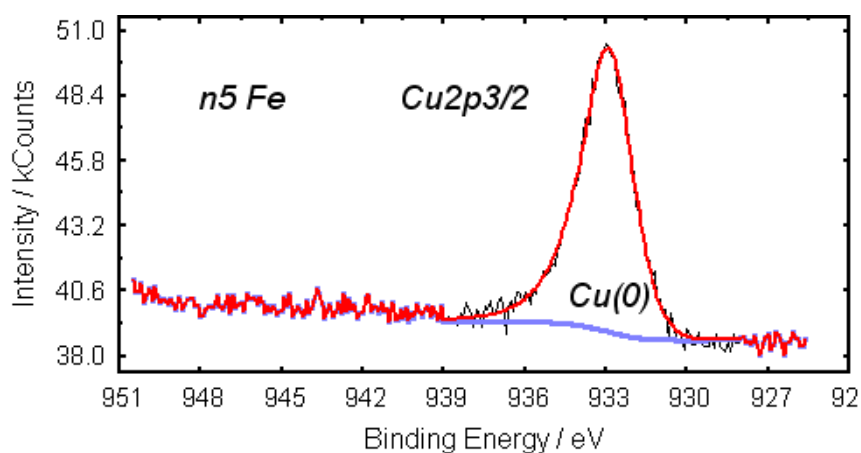


Рисунок 4.122 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения стального образца и удаления слоя порядка 10 нм

Сравнение энергии связи 1022,5 эВ цинка в зоне трения стального образца (рис.4.123) с энергией связи цинка в металлическом состоянии (1021 эВ) позволяет считать, что цинк в поверхностном слое стального образца находится в связанном состоянии. Дальнейшее травление зоны трения стального образца ионами аргона показало, что энергетические пики кислорода и углерода уменьшились. В то же время энергетические пики, соответствующие железу и меди, увеличились (рис.4.124). После травления зоны трения ионами аргона и удаления слоя был получен энергетический спектр 2р электронов железа, который представлен на рис.4.125. Анализируя энергетический спектр железа можно отметить, что железо находится как в окисленном, так и в металлическом состоянии. Энергия связи меди, полученная экспериментально с зоны трения стального образца, имеет значение 933 эВ, а энергия связи меди в металлическом состоянии соответствует 931 эВ. Это свидетельствует о том, что в зоне трения стального образца, изношенного на пути трения 1400 м, медь находится в соединении с кислородом. Дальнейшее травление зоны трения ионами аргона показало снижение содержания углерода в зоне трения стального образца и увеличение содержания железа. Медь и цинк в зоне трения стального образца находятся по всей толщине удаляемого слоя порядка 0,6 мкм (рис. 4.127).

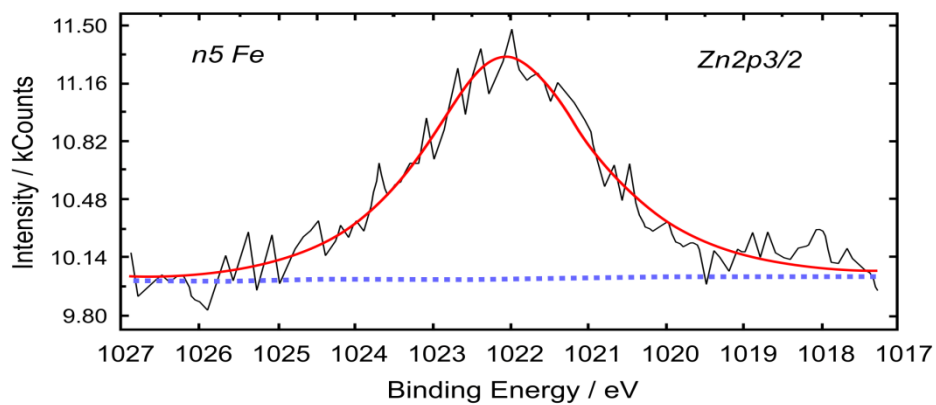


Рисунок 4.123 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения стального образца после травления ионами аргона

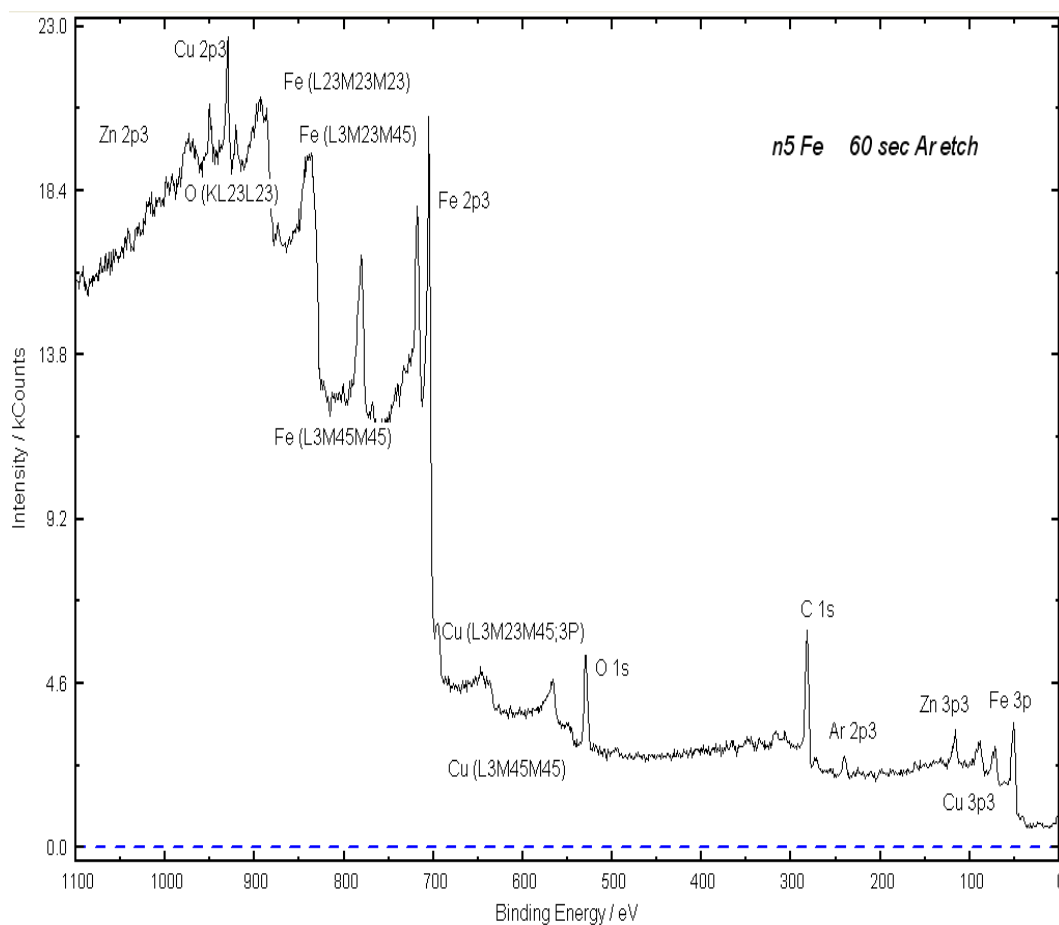


Рисунок 4.124 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 1400 м

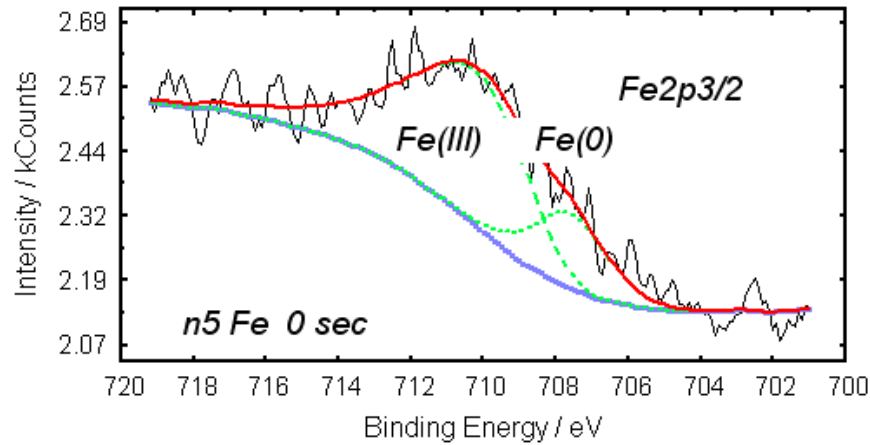


Рисунок 4.125 Энергетический спектр 2р электронов железа с зоны трения стального образца и травления ионами аргона

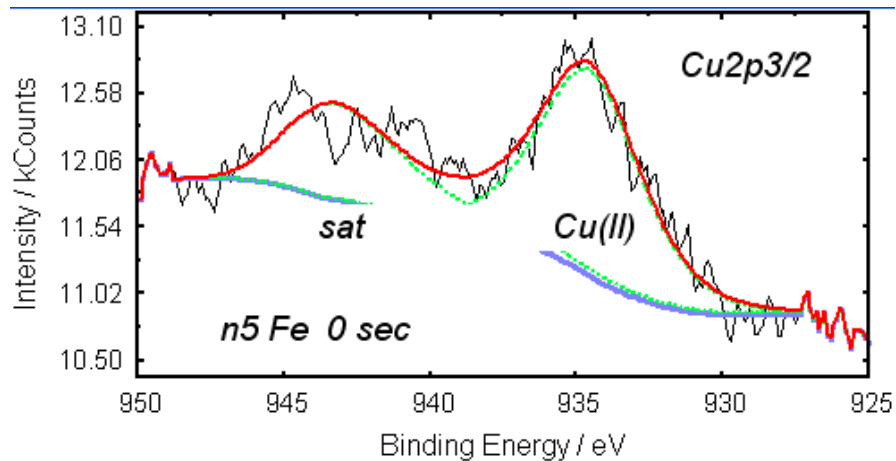


Рисунок 4.126 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения стального образца после травления ионами аргона (путь трения 1400 м)

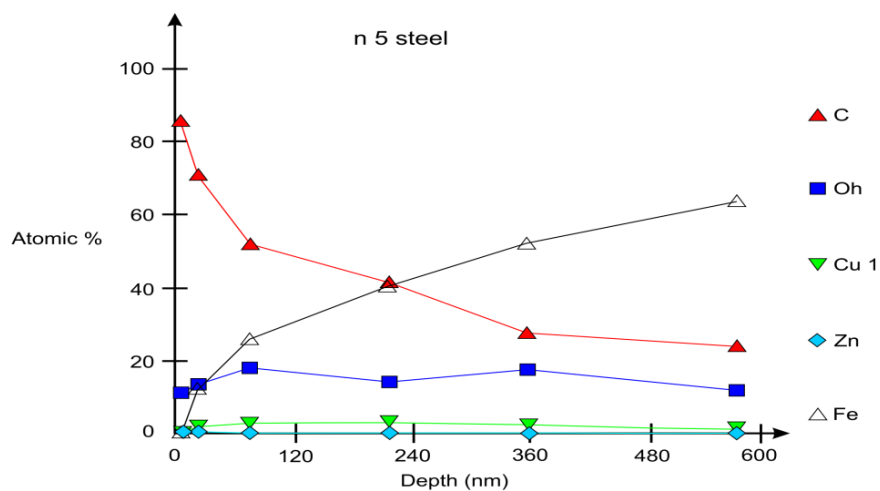


Рисунок 4.127 - Элементный состав, строение и толщина металлсодержащей пленки на стальном образце, изношенной на пути трения 1400 м

Выполненные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 1400 м, позволяют отметить, что на пути трения 700-1400 м в зоне трения стального образца формируется металлсодержащая пленка толщиной порядка 0,6 мкм. Анализ данных об элементном составе и строении металлсодержащей пленки на стальном образце в процессе взаимодействия триады трения позволяет сказать, что содержание углерода в поверхностном слое значительно увеличилось по сравнению с его содержанием в зоне трения образцов, изношенных на пути трения 70-700 м. Кроме того, медь и цинк находятся в связанном состоянии, а на пути трения 70-700 м медь и цинк в зоне трения стального образца находятся в металлическом состоянии.

С поверхностного слоя стального образца, изношенного в паре с антифрикционным сплавом в глицерине на пути трения 2100 м до травления ионами аргона, был получен энергетический спектр 2р электронов железа (рис.4.128). Энергетический спектр железа можно разделить на следующие составляющие компоненты Fe_3O_4 , Fe_2O_3 и металлическому состоянию. После травления зоны трения стального образца ионами аргона и удаления слоя были получены обзорные рентгенофотоэлектронные спектры, которые представлены на рис.4.129. Если до травления ионами аргона поверхностного слоя стального образца в зоне трения имелись углеводородные соединения и интенсивные энергетические пики кислорода и углерода, то после удаления слоя интенсивность энергетических пиков кислорода и углерода уменьшилась. Можно также отметить повышение интенсивности энергетических пиков железа. После травления зоны трения стального образца ионами аргона были получены энергетические спектры меди (рис.4.130) и цинка (рис.4.131). Энергия связи меди в металлическом состоянии имеет величину 931 эВ, а цинка 1021 эВ. Экспериментально полученные энергетические спектры 2р электронов меди и цинка с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 2100 м, имеют энергию связи 933,5 эВ и 1022,5 эВ соответственно. Энергетические пики

мед и цинка смещены в сторону больших энергий, что свидетельствует о их связанном состоянии, возможно с кислородом.

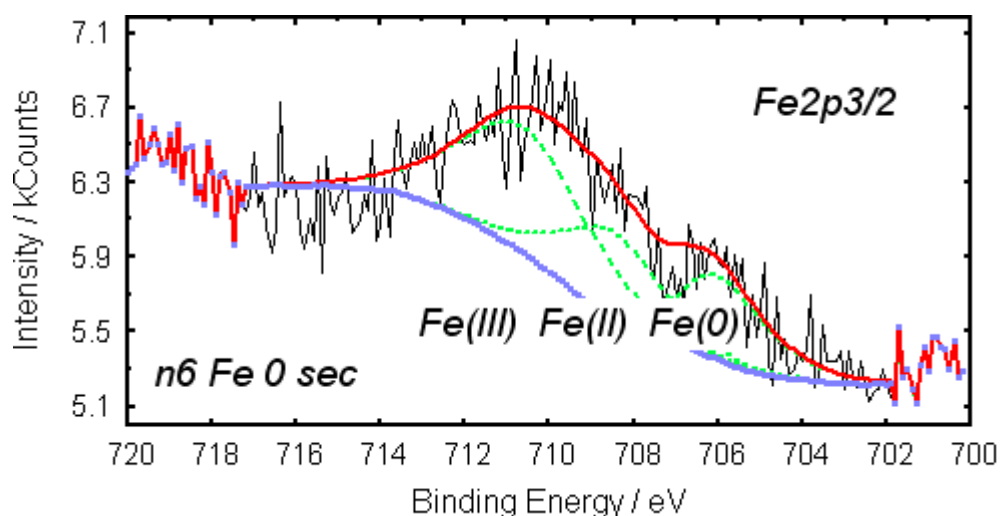


Рисунок 4.128 Энергетический спектр 2р электронов железа с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 2100 м, до травления ионами аргона

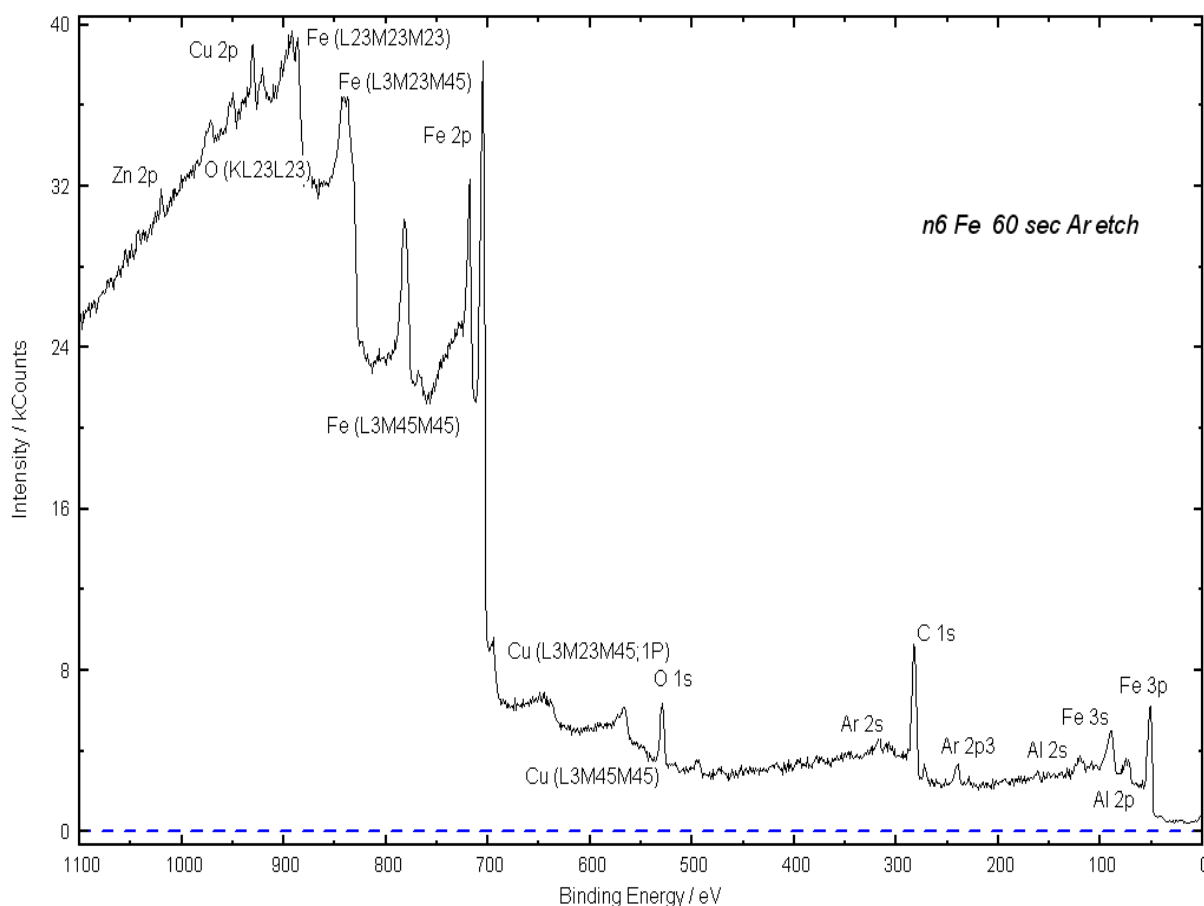


Рисунок 4.129 Обзорные рентгенофотоэлектронные спектры с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 2100 м, после травления ионами аргона

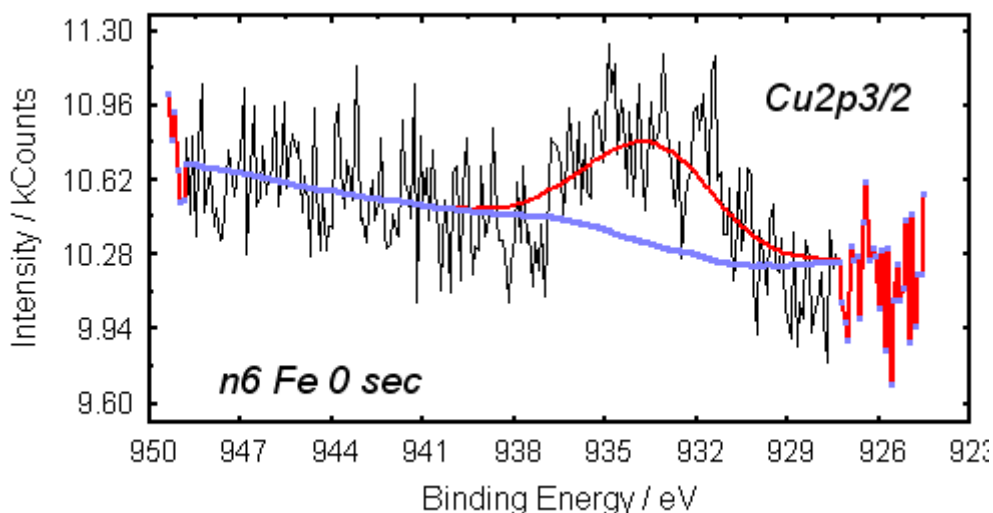


Рисунок 4.130 Энергетический спектр 2р электронов меди с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 2100 м, после травления ионами аргона

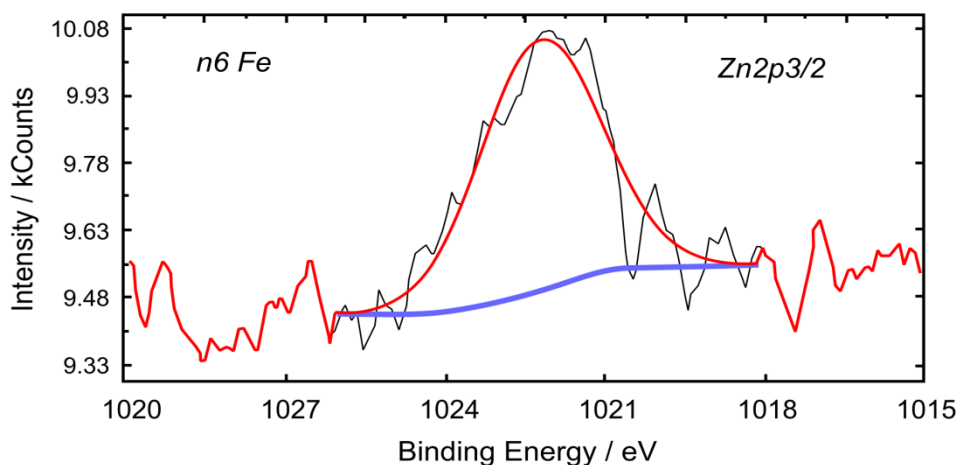


Рисунок 4.131 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 2100 м

На рис.4.132 представлены данные об элементном составе, строении и толщине металлсодержащей пленки на стальном образце, изношенном на пути трения 2100 м, при работе в паре с латунью в глицерине. Толщина защитной металлсодержащей пленки порядка 0,6 мкм. Необходимо отметить высокое содержание в поверхностном слое углерода. По всей толщине металлсодержащей пленки имеется медь и цинк, которые находятся в химически связанном соединении с кислородом.

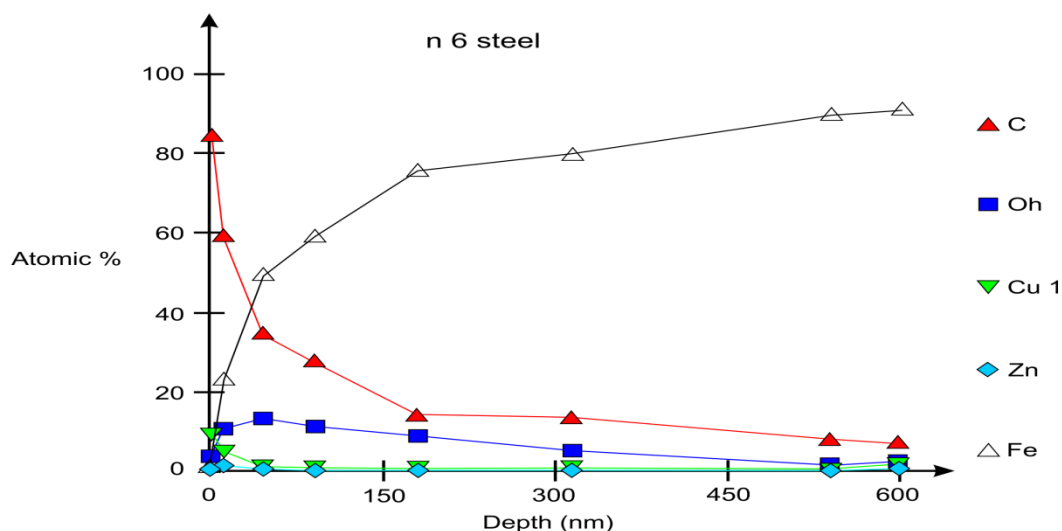


Рисунок 4.132 Энергетический спектр 2р электронов цинка с зоны трения стального образца, изношенного на пути трения 2100 м

Послойные рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения латуни, изношенной в паре со стальным образцом на пути трения 70-2100 м в глицерине, показали, что с увеличением времени работы трибосопряжения содержания меди в поверхностном слое антифрикционного сплава увеличивается, а цинка снижается. Содержание углерода и кислорода в зоне трения медного сплава в зависимости от пути трения мало изменяется. На пути трения 70-2100 м в зоне трения латуни имеется металлическая медь и медь в окисленном состоянии (Cu_2O). Металлсодержащая пленка порядка 0,6 мкм образуется в зоне трения медного сплава на пути трения 700-1400 м. Красный цвет сформировавшейся металлсодержащей пленки обеспечивает медь и окисленное соединение Cu_2O , которое также имеет красный цвет.

Рентгенофотоэлектронные исследования зоны трения стального образца, изношенного в паре с латунью в глицерине на пути трения 70-2100 м, показали, что на пути трения 70-700 м медь и цинк находятся в поверхностном слое в металлическом состоянии. На пути трения 700-2100 м медь и цинк в составе металлсодержащей пленки толщиной 0,6 мкм находятся в соединении, видимо, с кислородом. Содержание меди в зависимости от пути трения в поверхностном слое образца повышается и

наиболее интенсивно на пути трения 350-700 м. Содержание цинка в диапазоне работы пары медный сплав-сталь 70-2100 м увеличивается незначительно. Также необходимо отметить, что увеличение времени работы трибосопряжения ведет к повышению содержания углерода в зоне трения стального образца и снижению содержания кислорода. Железо в поверхностном слое стального образца находится в окисленном состоянии. Сформировавшаяся металлсодержащая пленка в зоне трения стального образца и медного сплава располагается в поверхностном слое трибосопряжения участками. Металлсодержащая пленка в зоне трения стального и медного сплава толщиной порядка 0,6 мкм формируется одновременно на пути трения 700-1400 м.

4.4 Исследование дисперсного состава частиц продуктов изнашивания пары медный сплав-сталь

Для выяснения механо-физико-химических процессов в зоне трения пары антифрикционный сплав-сталь, работавших в различных смазочных материалах, проведены исследования дисперсного состава частиц продуктов изнашивания. Изучение размера частиц износа и определение их содержания в смазочных материалах проводилось на лазерном анализаторе типа ST-1800 фирмы «Malvern».

На лазерном анализаторе исследовали глицерин, который работал в паре латунь-сталь при скорости скольжения 1м/с, удельной нагрузке 6 МПа на пути трения 2100 м. Для сравнения дисперсного состава частиц изнашивания были проведены также эксперименты с использованием в качестве смазочного материала в паре антифрикционный сплав-сталь индустриального масла И-40А при тех же нагрузочно-скоростных режимах. Полученные результаты исследований дисперсного состава частиц изнашивания в смазочных материалах на лазерном анализаторе представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

**Содержание частиц изнашивания пары медный сплав-сталь
в смазочных материалах**

№№ п/п	Размер частиц 10^{-6}м	Содержание частиц, %	
		Глицерин	Масло И-40А
1.	1,90	46,47	10,17
2.	2,38	27,77	11,24
3.	3,05	13,17	10,14
4.	3,81	7,17	10,98
5.	4,86	3,28	10,86
6.	6,19	1,39	10,72
7.	7,90	0,53	10,28
8.	10,10	0,18	9,57
9.	12,95	0,05	8,18
10.	16,76	0,01	5,23
11.	21,52	-	5,23
12.	28,10	-	2,30
13.	37,62	-	-

Анализ результатов исследований дисперсного состава продуктов изнашивания и их содержания в смазочных материалах, позволяет отметить, что дисперсный состав частиц изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине и минеральном масле И-40А значительно отличается по размерам частиц и их содержанию. При изнашивании пары антифрикционный сплав-сталь в индустриальном масле процентное содержание частиц изнашивания в диапазоне размеров 1,90-12,95 мкм практически одинаково и составляет порядка 10% каждого размера. В процессе работы пары латунь-сталь в глицерине отмечается наличие в отработанном смазочном материале большого количества фракции весьма мелких частиц размером 1,90 мкм.

Образование значительного содержания мелких частиц продуктов изнашивания, видимо, связано с эффектом адсорбционного понижения прочности при наличии в смазочном материале поверхностно-активных веществ. При взаимодействии пары медный сплав-сталь в глицерине в

результате хемосорбции и механохимических превращений смазочного материала образуются и новые поверхностно-активные вещества [20, 76].

Адсорбционно-активный смазочный материал всегда пластифицирует тонкие слои более мягкого металла [55], что лежит в основе механизма снижения внешнего трения. В процессе приработки, вследствие значительной величины микронеровностей поверхностей пары медный сплав-сталь, адсорбционная среда, пластифицируя поверхностные слои, ускоряет полезный износ, т.е. сглаживание поверхностных микронеровностей, а, следовательно, ускоряет процесс приработки. Пластифицирующее действие поверхностно-активных веществ глицерина подтверждается снижением величин среднего арифметического отклонения неровностей профиля от средней линии на пути трения 70-2100 м. Такой тенденции по снижению величины R_a при изнашивании пары медный сплав-сталь в инактивной среде (минеральное масло) не установлено.

В процессе взаимодействия триады трения при наличии в смазочном материале адсорбционно-активных веществ происходит раскрытие значительного числа зародышевых дефектов в поверхностном слое латуни - микротрещин на единицу объема разрушаемого тела вследствие понижения работы образования их поверхности. Такое явление особенно ярко выражено в процессах тонкого измельчения – диспергирования твердых тел [55]. Известно, что по мере повышения дисперсности и образования мелких частиц работа измельчения возрастает. Это связано с повышением прочности частиц мелких размеров из-за меньшей вероятности встречи в них опасных дефектов – зародышей разрушения, но и, возможно, и с упрочнением поверхностного слоя частиц вследствие пластического деформирования [55].

Таким образом, наличие в глицерине адсорбционно-активных веществ оказывает пластифицирующее и диспергирующее действие в процессе взаимодействия триады трения.

4.5 Спектральный анализ качественного и количественного содержания элементов в продуктах изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине

Спектральный анализ глицерина, работавшего в паре медный сплав-сталь на пути трения от 70 до 2100 м при скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 6 МПа, проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Жобэн Ивон, Ж 70П (Франция).

На рис. 4.133 представлены данные о влиянии пути трения пары медный сплав-сталь в глицерине при скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 6 МПа на изменение содержания элементов продуктов изнашивания подвижных сопряжений. Исследования глицерина до работы на атомно-эмиссионном спектрометре показали, что в нем в незначительном количестве имеется железо, медь, цинк.

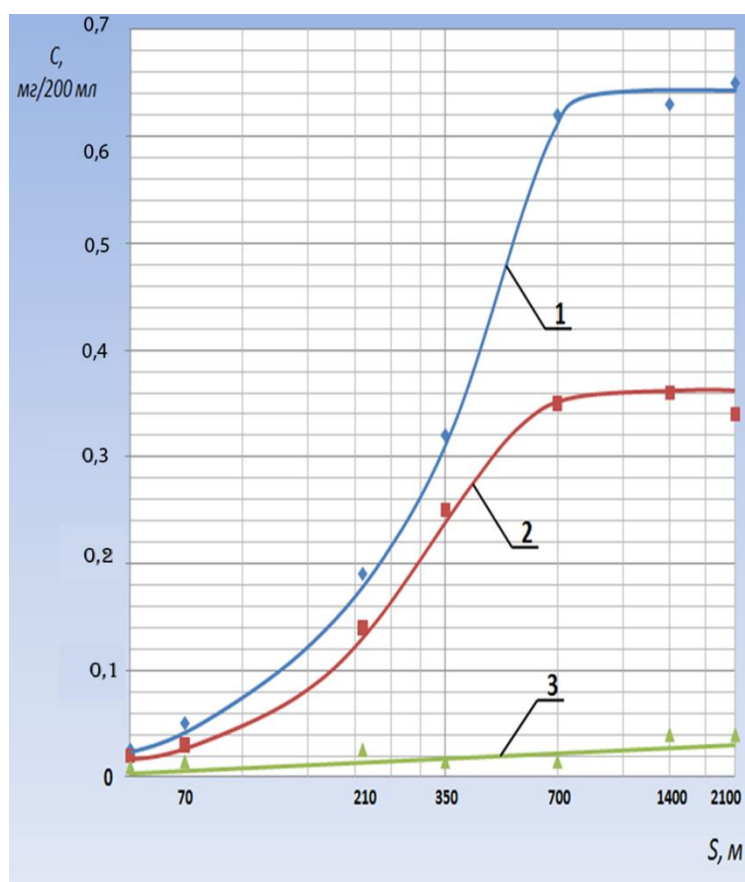


Рисунок 4.133 Изменение содержания элементов трибосопряжения в глицерине от пути трения: 1 – медь; 2 – цинк; 3 – железо

Как видно из данных, представленных на рис.4.133, содержание меди и цинка в глицерине в зависимости от пути трения от 70 до 2100 м можно разбить на два участка. Первый участок на пути трения 70-700 м характеризуется увеличением содержания элементов латуни Л63. На втором участке на пути трения 700-2100 м содержание меди и цинка в смазочном материале практически не меняется.

В технической литературе имеются сведения о том, что в результате механо-физико-химических процессов в отработанном глицерине имеются различные органические соединения, в том числе кислоты [87,99]. Рентгеноспектральные исследования поверхностного слоя латуни на пути трения 70-2100 м показали, что на пути трения 70-700 м происходит обесцинкование медного сплава. Видимо, в результате коррозионного воздействия агрессивных продуктов превращений глицерина и коррозионно-механического изнашивания медного сплава в глицерине на пути трения 70-700 м содержание цинка в смазочном материале повышается.

Известно, что в результате обесцинкования латуни образуется поверхностный пористый слой медной массы с чрезвычайно низкими прочностными характеристиками антифрикционного сплава [34]. Повышение содержания меди в глицерине на пути трения 70-700 м связано с механическим изнашиванием поверхностного слоя медной массы с низкими прочностными свойствами.

На пути трения 700-2100 м содержание меди и цинка в глицерине практически не изменяется, так как в этом диапазоне пути трения на поверхностях трибосопряжения медный сплав-сталь формируется защитная металлсодержащая пленка толщиной порядка 0,6 мкм. Защитная пленка имеет толщину более высоты микронеровностей зон трения подвижных сопряжений, и все сдвиговые деформации локализуются в самой пленке. Наличие металлсодержащей пленки на поверхностях трения подвижных сопряжений препятствует коррозионному воздействию кислот на поверхностный слой антифрикционного сплава.

Незначительное повышение содержания железа в глицерине на пути трения 70-2100 м возможно связано с агрессивным действием кислот, которые образуются в процессе взаимодействия триады трения.

4.6 ИК-спектральные исследования металлсодержащей пленки на стальном образце

ИК-спектроскопия – раздел молекулярной спектроскопии, изучающей спектры поглощения и отражения электромагнитных волн в ИК области (50-5000 см^{-1}) [6] ИК-спектры возникают в результате переходов между колебательными уровнями основного электронного состояния изучаемой системы. Их измеряют с помощью спектрометров различных типов.

В связи с тем, что с поверхностных слоев пары антифрикционный сплав-сталь, изношенных в глицерине, не представляется возможным выполнить ИК-спектральные исследования сформировавшейся металлсодержащей пленки, нами в работе были изношены 20 пар медный сплав-сталь в глицерине при удельной нагрузке 6 МПа, скорости скольжения 1 м/с на пути трения 2100 м. С поверхностных слоев 20 стальных образцов механически снималась металлсодержащая пленка. Со стальных образцов было получено продукта порядка пяти спичечных головок. ИК-спектральные исследования металлсодержащей пленки со стального образца для получения спектров отражения выполнялись на спектрометре фирмы «Bruker» (Англия), снабженном ЭВМ, которая автоматически проводила распечатку длин волн, соответствующих пиков на диаграмме интенсивность-длина волны. Металлсодержащая пленка со стального образца исследовалась в диапазоне длин волн 3800-600 см^{-1} , так как в этом диапазоне область инфракрасного спектра охватывает отражения, обусловленные почти всеми группировками органических соединений.

На рис.4.134 представлен ИК-спектр, полученный с металлсодержащей пленки, которая сформировалась на поверхности трения стального образца в

процессе взаимодействия триады трения. Можно отметить наличие полосы отражения $3500\text{--}3000\text{ см}^{-1}$, которая соответствует валентным колебаниям группы ОН с межмолекулярной водородной связью.

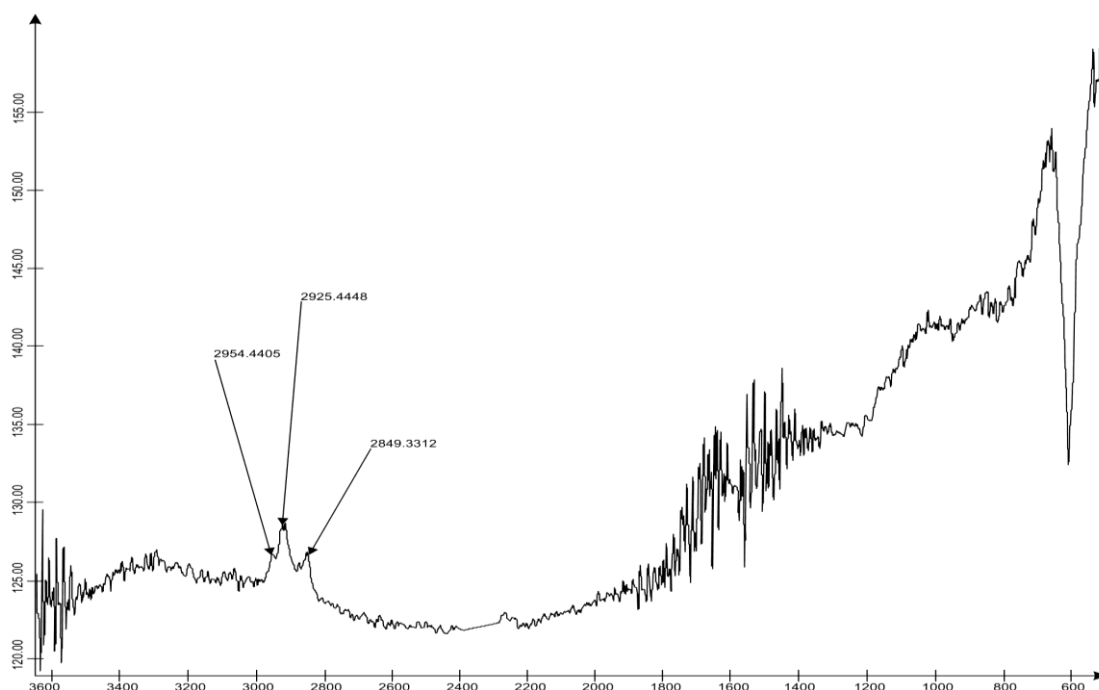


Рисунок 4.134 ИК-спектральные исследования металлсодержащей пленки на стальном образце.

Также имеются полосы отражения $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$, характеризующие валентные колебания СН в группах CH_2 и CH_3 . На ИК-спектре видны полосы отражения $1800\text{--}1400\text{ см}^{-1}$, свидетельствующие о присутствии в составе металлсодержащей пленки атмосферной воды. Кроме того, установлено наличие группы CO_2 (полоса отражения 2350 см^{-1} , рис.4.134). Наличие атмосферной воды и углекислого газа связано с атмосферой воздуха. Рассмотрение ИК-спектров, полученных с металлсодержащей пленки на стальном образце рис.4.135, позволяет отметить наличие полос отражений в области $1200\text{--}1000\text{ см}^{-1}$, которые связаны с наличием в составе металлсодержащей пленки структур C-O-C-O-C . На ИК-спектре отмечаются полосы отражения в области $900\text{--}800\text{ см}^{-1}$, наличие которых, видимо, связано

с присутствием в составе металлсодержащей пленки тризамещенных связей $C=C$.

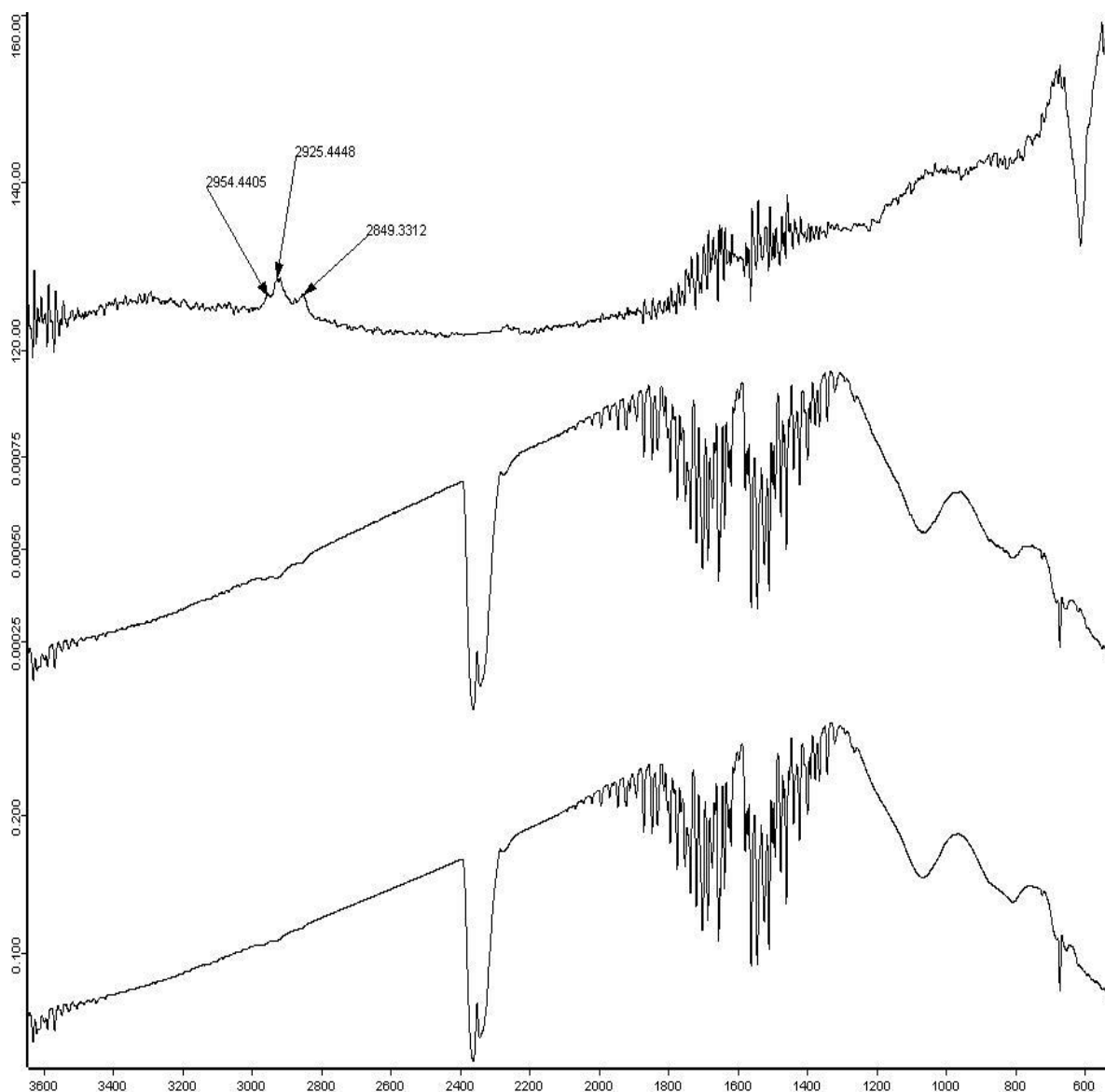


Рисунок 4.135 ИК-спектральные исследования металлсодержащей пленки на стальном образце, изношенного в паре с латунью в глицерине.

Сравнение ИК-спектра металлсодержащей пленки, сформировавшейся в зоне трения стального образца при работе в паре с медным сплавом в глицерине, и ИК-спектра глицерина показало, что в рассматриваемых случаях имеются группы OH с межмолекулярной водородной связью, также валентные колебания $C-H$ в группах CH_2 и CH_3 . Однако, интенсивность этих полос в глицерине на порядок и более выше аналогичных полос отражения в ИК-спектрах с металлсодержащей пленки.

На основании выполненных ИК-спектральных исследований металлсодержащей пленки, сформировавшейся на стальном образце при изнашивании подвижных сопряжений в глицерине, установлено, что в ИК-спектре, полученном с металлсодержащей пленки, имеются полосы отражения в области $1300\text{--}700\text{ см}^{-1}$. Размытый характер этих полос характерен для высокомолекулярных соединений.

5 МЕХАНО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ ПАРЫ МЕДНЫЙ СПЛАВ-СТАЛЬ В ГЛИЦЕРИНЕ

5.1 Особенности взаимодействия триады трения при реализации эффекта безызносности

Выполнение исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь при удельной нагрузке 6 МПа и скорости скольжения 1 м/с в смазочных материалах показало, что на пути трения от 70 до 2100 м коэффициент трения при работе трибосопряжений в глицерине и индустриальном масле снижается. При изнашивании в масле на пути трения 2100 м коэффициент трения пары антифрикционный сплав-сталь имел величину 0,06, а при тех же условиях в глицерине коэффициент трения был на порядок ниже.

Износ образца из латуни Л63 при работе пары медный сплав-сталь в индустриальном масле И-40А на два порядка больше, чем в глицерине. Необходимо отметить, что при изнашивании пары медный сплав-сталь как в глицерине, так и в масле И-40А на пути трения 2100 м масса стального образца увеличивалась.

Оценка изменений характеристик микрогеометрии поверхностных слоев пары медный сплав-сталь, работавшей в глицерине, показала, что на пути трения от 70 до 2100 м имеет место повышение качества поверхностных слоев как стального, так и медного сплава. При изнашивании пары антифрикционный сплав-сталь в масле И-40А такой тенденции снижения величины характеристик микрогеометрии поверхностных слоев образцов не отмечается.

Рентгеноспектральные исследования зоны трения стальных образцов, изношенных в глицерине в паре с медными сплавами, показали, что в одних и тех же участках стального образца в поверхностном слое присутствуют элементы медных сплавов. Такое распределение элементов медных сплавов в зоне трения стального образца свидетельствует о том, что в начальный

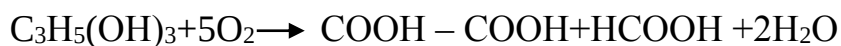
период взаимодействия триады трения имеет место микросхватывание и перенос антифрикционного сплава на сталь.

Исследования зоны трения антифрикционного сплава на растровом электронном микроскопе в режиме упруго-отраженных электронов на пути трения 70-700 м показало, что при изнашивании пары медный сплав-сталь в глицерине в поверхностном слое медного сплава имеются следы режущего и царапающего действия абразивных частиц. Абразивное действие частиц износа отмечается под разным углом к направлению движения стального образца. Известно, что твердость окисленных соединений меди близка к твердости самого металла [79]. Видимо, изношенные окисленные соединения меди оказывают абразивное действие на поверхностный слой антифрикционного сплава.

В процессе взаимодействия триады трения в составе поверхностного слоя латуни происходят значительные изменения. Рентгеноспектральные исследования зоны трения латуни, изношенной в паре со стальным образцом в глицерине на пути трения 70-700 м, свидетельствуют о том, что происходит увеличение содержания меди в поверхностном слое антифрикционного сплава и снижение содержания цинка. Если в составе латуни Л63 до работы содержание меди составляло 63,95%, то после изнашивания пары антифрикционный сплав-сталь на пути трения 700 м содержание меди составило 90%. Рентгеноспектральным анализом латуни до работы установлено, что в поверхностном слое медного сплава содержание цинка составляет 36,05%. После работы трибосопряжения в глицерине на пути трения 700 м содержание цинка составило 10%. Эксперименты показали, что на пути трения 700-2100 м содержание меди и цинка в поверхностном слое латуни не изменяется.

Обесцинкование поверхностного слоя латуни на пути трения 70-700 м ведет к образованию пористого слоя лишенной цинка медной массы с чрезвычайно низкими прочностными свойствами [34]. Обесцинкование поверхностного слоя латуни связано с окислением глицерина. Известно, что

кислород воздуха на химически чистый глицерин не действует. Глицерин окисляется кислородом в присутствии катализаторов. Так, при наличии в глицерине окисленных соединений некоторых металлов, в том числе и меди при температуре 65° С глицерин окисляется главным образом по схеме [90]:



Наличие в глицерине щавелевой и муравьиной кислот ведет к коррозионно-механическому изнашиванию антифрикционного сплава. Содержание меди и цинка в глицерине в диапазоне пути трения 70-700 м при изнашивании пары медный сплав-сталь значительно повышается. Спектральный анализ отработанного глицерина показал, что на пути трения 70-700 м содержание меди в глицерине увеличилось в 6 раз, а цинка в 3,5 раза. Рентгеноспектральным анализом зоны трения стального образца установлено, что на пути трения 70-700 м содержание меди увеличилось в 2,5 раза, а цинка в 0,2 раза. Увеличение содержания элементов латуни в глицерине, видимо, связано с коррозионно-механическим изнашиванием антифрикционного сплава, а повышение содержания меди в зоне трения стального образца происходит в результате обесцинкования поверхностного слоя латуни, микросхватывания и переноса меди на стальной образец.

Изучение содержания частиц в смазочных материалах после изнашивания подвижных сопряжений при нагрузке 6 МПа, скорости скольжения 1 м/с на пути трения 2100 м на лазерном анализаторе показало, что дисперсный состав частиц изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине и минеральном масле значительно отличается по размерам частиц и их содержанию. При изнашивании пары медный сплав-сталь в масле И-40А процентное содержание частиц изнашивания в диапазоне размеров 1,90-12,95 мкм практически одинаково и составляет порядка 10% каждого. В процессе работы пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине отмечается наличие в отработанном глицерине большого количества фракций весьма мелких

частиц размером 1,90 мкм [73]. В процессе взаимодействия пары латунь-сталь в глицерине образуются новые поверхностно-активные вещества, которые наряду с пластифицирующим оказывают и диспергирующее действие.

Послойные рентгенофотозлектронные и Оже-спектральные исследования зоны трения антифрикционного сплава, изношенного в паре со стальным образцом в глицерине в динамике пути трения, представлены в таблице 5.1. Можно отметить, что на пути трения 70 м в состав защитной пленки входит углерод, который находится в связи с кислородом, медь в металлическом стоянии, а также окисленные соединения меди и цинка – Cu_2O , ZnO . Такой состав защитной пленки в зоне трения латуни толщиной порядка 40 нм сохраняется в диапазоне пути трения 70-700 м.

Таблица 5.1

Состав и толщина металлсодержащей пленки на латунном образце в зависимости от пути трения пары Л63-сталь

№№ п/п	Путь трения, м	Толщина пленки, нм	Состав пленки
1	70	40	Cu, Cu_2O , ZnO , C
2	210	40	Cu, Cu_2O , ZnO , C
3	350	40	Cu, Cu_2O , ZnO , C
4	700	40	Cu, Cu_2O , ZnO , C
5	1400	600	Cu_2O , ZnO , C
6	2100	600	Cu_2O , ZnO , C

После изнашивания пары Л63-сталь в глицерине на пути трения 700-1400 м в зоне трения антифрикционного сплава медь в металлическом состоянии отсутствует. Защитная пленка представляет собой высокомолекулярное металлсодержащее соединение, в состав которого входит углерод и окисленные соединения меди и цинка – Cu_2O и ZnO . На пути трения 1400-2100 м состав и толщина защитной пленки не меняется. Высокомолекулярная металлсодержащая пленка образуется в зоне трения латуни на подслое окисленных соединений Cu и Zn, защитная пленка имеет красный цвет, который характерен для соединения Cu_2O .

В таблице 5.2 представлены данные о составе и толщине металлсодержащей пленки на стальном образце от пути трения пары Л63-сталь.

Таблица 5.2

Состав и толщина металлсодержащей пленки на стальном образце в зависимости от пути трения пары Л63-сталь

№№ п/п	Путь трения, м	Толщина пленки, нм	Состав пленки
1	70	50	C=0, Fe, FeO, Fe ₂ O ₃ , H ₂ O, OH, Cu, Zn
2	210	50	C, Fe, FeO, Fe ₂ O ₃ , H ₂ O, OH, Cu, Zn
3	350	50	C, Fe, FeO, Fe ₂ O ₃ , Cu, Zn
4	700	50	C, Fe, FeO, Fe ₂ O ₃ , Cu, Zn
5	1400	600	C, Fe, FeO, Fe ₂ O ₃ , Cu ₂ O, ZnO
6	2100	600	C, Fe, FeO, Fe ₂ O ₃ , Cu ₂ O, ZnO

Анализ представленных данных позволяет отметить, что на пути трения 70 м в состав защитной пленки в зоне трения стального образца входят углерод, железо, а также окисленные соединения Fe, медь и цинк присутствуют в металлическом состоянии в результате микросхватывания с поверхностным слоем антифрикционного сплава. Кроме того, в зоне трения стального образца присутствуют адсорбционные молекулы воды и гидроксильные группы OH.

Состав и толщина защитной пленки в зоне трения стального образца на пути трения 70-210 м не изменяется. Можно предположить, что на участке пути 210 м происходит окисление глицерина до кислот (муравьиной и щавелевой), которое характеризуется присутствием воды. Образовавшиеся в процессе окисления глицерина молекулы воды и гидроксильные группы (возможно, из воздуха) входят в состав защитной пленки.

На пути трения 350-700 м в состав защитной пленки в зоне трения стального образца входят углерод, железо, окисленные соединения железа, а медь и цинк находятся в металлическом состоянии. Возможно, на этом участке пути трения происходит взаимодействие кислот с соединениями меди и образование катализаторов. Так как имеет место абразивное,

коррозионно-механическое изнашивание медного сплава, повышается количество частиц износа в смазочном материале, а также увеличивается содержание элементов медного сплава в зоне трения пары медный сплав-сталь.

На пути трения 700-1400 м в состав защитной пленки на стальном образце входит высокомолекулярное металлсодержащее соединение, в котором медь и цинк находятся в соединении с кислородом, а толщина пленки становится порядка 600 нм. В этом диапазоне пути трения пары антифрикционный сплав-сталь процессы взаимодействия триады трения стабилизируются, износ медного сплава практически отсутствует.

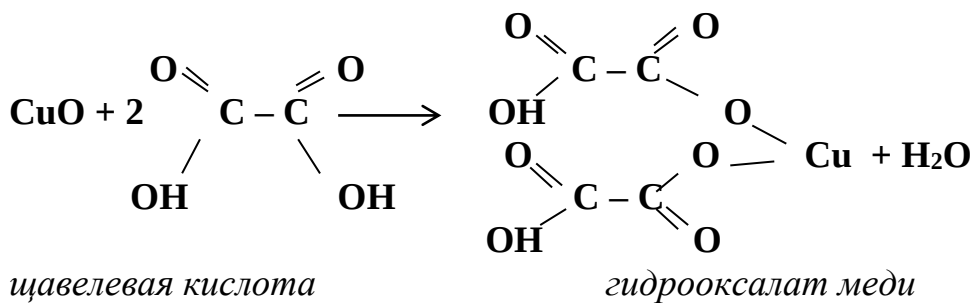
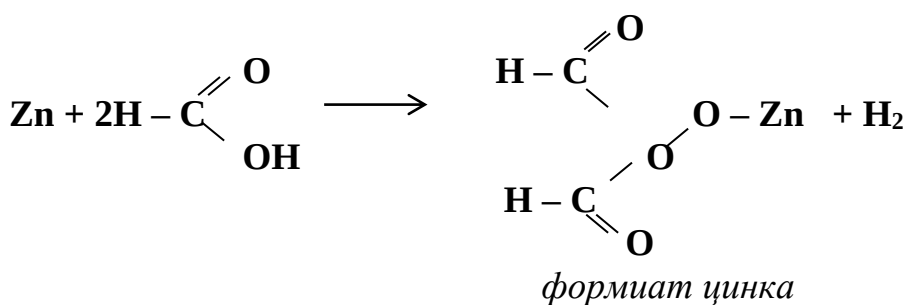
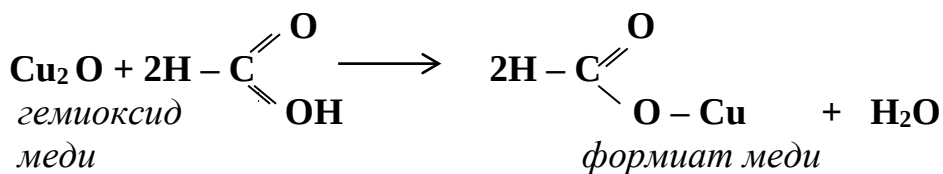
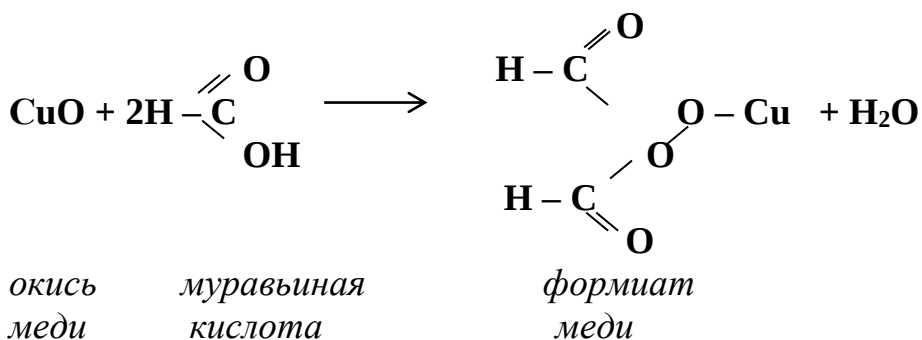
На пути трения 1400-2100 м состав защитной пленки в зоне трения стального образца не меняется. Высокомолекулярная металлсодержащая защитная пленка (Cu, Zn) сформировалась на подслое окисленных соединений железа, меди и цинка. Медь и цинк присутствуют по всей толщине высокомолекулярной пленки как в зоне трения стального образца, так и антифрикционного сплава.

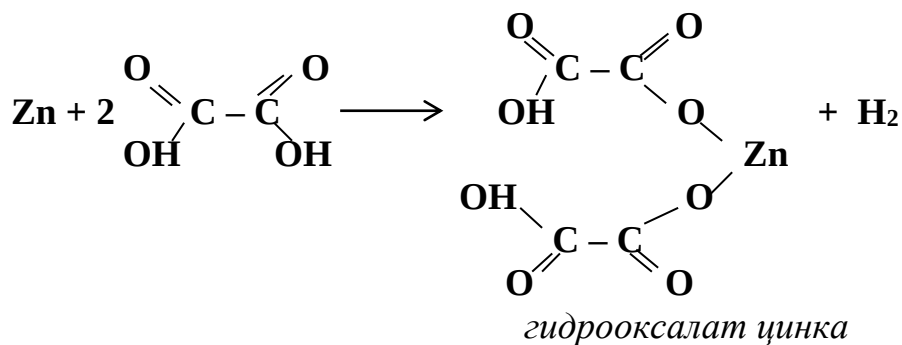
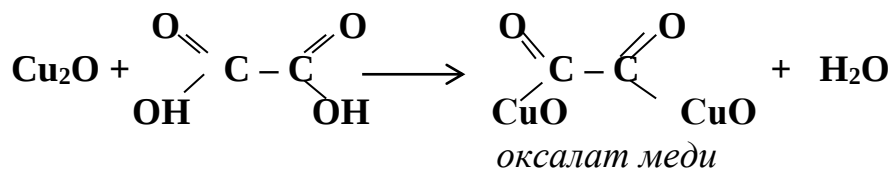
Кроме того, необходимо отметить, что высокомолекулярная металлсодержащая пленка толщиной порядка 0,6 мкм формируется на пути трения 700-1400 м как в зоне трения стального образца, так и в зоне трения антифрикционного сплава. В диапазоне пути трения 1400-2100 м состав, строение, толщина металлсодержащей пленки на поверхностях трения трибосопряжений не изменяется, что свидетельствует об установившемся режиме трения.

В процессе взаимодействия триады трения важная роль принадлежит окисленным соединениям поверхностного слоя антифрикционного сплава, состав которых установлен электронографическим анализом [67]. В начальный период взаимодействия пары медный сплав-сталь в результате механического изнашивания окисленные соединения меди и медного сплава переходят в смазочный материал. Если окисленных соединений медного сплава в глицерине не будет, то при изнашивании пары медный сплав

(латунь)-сталь низкие триботехнические характеристики трибосопряжения не отмечаются. Это установлено экспериментально, когда непосредственно перед экспериментом мелкой шкуркой были удалены окисленные соединения медного сплава с поверхностного слоя.

В результате окисления глицерина до кислот в процессе взаимодействия триады трения, рассмотрим их взаимодействие с окисленными соединениями меди и элементами медного сплава.





Во всех возможных случаях взаимодействия кислот с элементами медного сплава образуются соединения, в которых медь и цинк связаны с кислородом. Связь меди и цинка с кислородом подтверждена послойными рентгенофотозлектронными исследованиями.

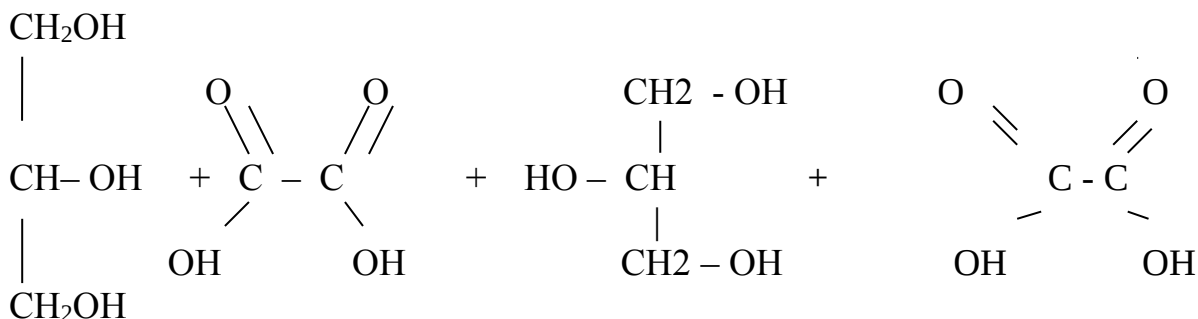
Необходимо отметить, что после изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине на пути трения 700 м происходит стабилизация механо-физико-химических процессов как на поверхностях трения, так и в смазочном материале.

Рентгеноспектральными исследованиями установлено, что на пути трения 700-2100 м состав поверхностного слоя латуни, а также содержание элементов медного сплава в зоне трения стального образца практически не меняется. Спектральный анализ глицерина, работавшего в паре медный сплав-сталь, также показал, что на пути трения 700-2100 м содержание элементов медного сплава в смазочном материале постоянно. В этот же период времени коэффициент трения пары медный сплав-сталь снизился до значений, характерных для режима жидкостной смазки.

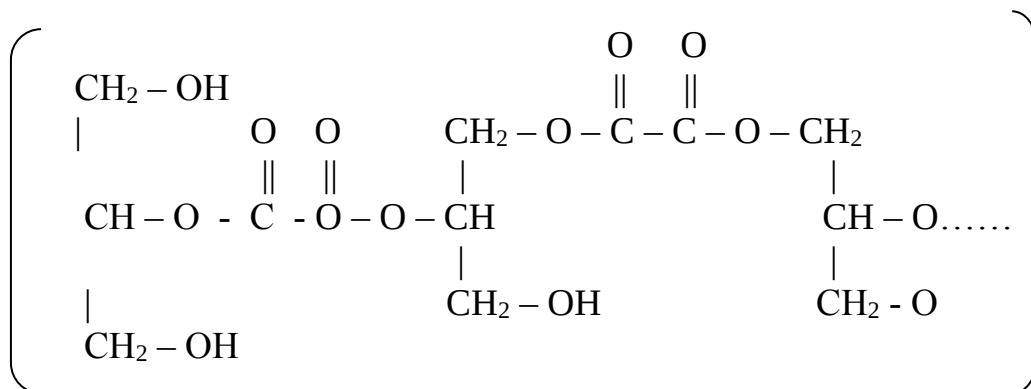
ИК-спектральные исследования металлсодержащей пленки, сформировавшейся в процессе взаимодействия триады трения, показали, что в ней, наряду с другими функциональными группами, присутствуют

высокомолекулярные соединения. В технической литературе имеются сведения о том, что при взаимодействии глицерина и двухосновной кислоты (щавелевой) образуются полиэфиры, а некоторые соединения металлов являются катализаторами [62]. Наличие кислот в отработанном глицерине при изнашивании пары медный сплав-сталь установлено как экспериментально [87, 99], так и показано в технической литературе [90].

Жидкость можно перевести в твердое состояние путем увеличения молекулярного веса молекулы при помощи химических реакций поликонденсации и полимеризации. В этих процессах молекулы жидкости, называемые мономерами, соединяются друг с другом химическими силами в длинные (полимерные) цепи. Если хоть один из компонентов обладает тремя активными группами (глицерин имеет три гидроксильные группы OH), то поликонденсация может развиваться не только линейно, но и давать разветвления, что в свою очередь приводит к образованию пространственного полимера [32]. При этом можно себе представить различные типа реакций, например, [53]:



глицерин *щавелевая*
 кислота



На основании проведенных исследований процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь в глицерине и выполненных экспериментов по изучению поверхностей трения и смазочного материала с привлечением современных методов анализа можно представить следующие процессы при взаимодействии триады трения:

Механические процессы при взаимодействии триады трения

- Механическое изнашивание медного сплава;
- Микросхватывание и перенос антифрикционного сплава на сталь;
- Абразивное изнашивание медного сплава продуктами износа;
- Коррозионно-механическое изнашивание медного сплава;
- Микросхватывание и перенос меди на сталь.

Физико-химические процессы

- Окисление глицерина соединениями меди до кислот;



- Коррозионное воздействие кислот на поверхностный слой медного сплава, обесцинкование антифрикционного сплава;
- Адсорбционное понижение прочности и диспергирующее действие ПАВ (эффект Ребиндера П.А.);
- Взаимодействие кислот с элементами медного сплава и образование катализаторов;
- Формирование медь, цинк содержащих высокомолекулярных соединений на поверхностях трения трибосопряжений.

Важным следствием результатов экспериментов является образование металлсодержащей пленки на стальном образце за счет микросхватывания и переноса антифрикционного сплава и меди на сталь. Медный цвет металлсодержащей пленки в зоне трения антифрикционного сплава связан с наличием в поверхностном слое меди и гемиоксида меди (Cu_2O), а в зоне

трения стального образца с содержанием гемеоксида меди, который имеет красный цвет. Дополнительным эффектом медного цвета металлсодержащей пленки в зонах трения подвижных сопряжений является то, что в присутствии кислорода воздуха высокомолекулярная пленка желтеет [62].

Низкий коэффициент трения и высокую износостойкость пары медный сплав-сталь в глицерине обеспечивает высокомолекулярная пленка, толщина которой больше высоты микронеровностей поверхностных слоев трибосопряжения. Высокомолекулярная пленка в процессе трения изнашивается и вновь восстанавливается в результате взаимодействия не реагировавших молекул глицерина с двухосновной кислотой в присутствии катализаторов-соединений меди и цинка.

5.2 Разработка практических рекомендаций по составу смазочных материалов, обеспечивающих формирование высокомолекулярных металлсодержащих пленок на поверхностях трения подвижных сопряжений

Реализация эффекта избирательного переноса в паре медный сплав-сталь в огромной степени зависит от природы смазочного материала, в котором происходит работа трибосопряжения. Глицерин, в котором избирательный перенос проявляется наиболее ярко и который служит в основном для исследований этого явления в лабораторных условиях, в реальных подвижных сопряжениях применяется крайне редко.

Исследования по вопросу создания смазочных материалов для обеспечения эффекта избирательного переноса в паре антифрикционный сплав – сталь были проведены в работе [12]. Выполнены ИК-спектральные исследования различных органических соединений, обеспечивающие формирование медьсодержащей пленки на поверхностях трения пары антифрикционный сплав – сталь. ИК-спектральные исследования не позволили установить функциональные группы органических соединений,

которые способствуют реализации эффекта избирательного переноса. Изучение процессов трения и изнашивания пары медный сплав-сталь показало, что избирательный перенос реализуется при использовании в качестве смазочных материалов многоатомных спиртов, карбоновых кислот, сложных эфиров, нафтеных углеводородов. Известно, что пластичная смазка ЦИАТИМ-201 и гидравлическая жидкость АМГ-10 также образуют на поверхностях трения пары медный сплав-сталь медьсодержащую антифрикционную и противоизносную пленку [14]. Методом ИК-спектроскопии было установлено, что в смазке ЦИАТИМ-201 и в жидкости АМГ-10 имеются полосы поглощения, соответствующие нафтенным углеводородам, а их положительное влияние на реализацию избирательного переноса также было отмечено в одной из первых работ по созданию смазочных материалов для обеспечения избирательного переноса [88].

Проведенные исследования по влиянию эфиров и сложных эфиров органических кислот на процессы трения и изнашивания пары медный сплав-сталь показали наличие на поверхностях трения медной пленки [2,3,11], однако, перенесенная на поверхность стальных образцов антифрикционная пленка не является необходимым и достаточным условием получения низких триботехнических характеристик подвижных сопряжений [54].

Рассматривая влияние некоторых карбоновых кислот и сложных эфиров на процессы трения и изнашивания металлических пар, можно отметить, что, например, олеиновая кислота и дибутиловый эфир трихлорметилфосфоновой кислоты не только обеспечивают избирательный перенос при их введении в минеральное масло, но и образуют на поверхностях трения полимерные пленки [25,86].

Подтверждением полученных нами данных с использованием метода ИК-спектроскопии об образовании на поверхностях трения пары медный сплав-сталь в глицерине высокомолекулярных соединений, являются выполненные Кужаровым А.С с сотр. в работе [42] исследования зоны

трения образцов методом туннельной микроскопии. Ими показано, что при изнашивании пары медный сплав-сталь в глицерине медный слой, образовавшийся на поверхностях трения, покрыт защитной диэлектрической пленкой, имеющей полимерную структуру.

Полиэфиры – продукты поликонденсации различных спиртов или кислот (или их ангидридов) широко используются в электротехнических материалах [4].

На основании анализа технической литературы и собственных исследований для формирования высокомолекулярных металлсодержащих пленок на поверхностях трения трибосопряжений и обеспечения высокой износостойкости и низкого коэффициента трения подвижных сопряжений можно сделать следующие рекомендации по составу смазочных материалов.

Для пары медный сплав-сталь при наличии в поверхностном слое антифрикционного сплава оксидных пленок и условий пластической деформации зоны трения необходимо вводить в смазочный материал вещества, содержащие, например, олеиновую кислоту, касторовое масло и др. Кроме того, эффективно наличие в смазочном материале соединений многоатомных спиртов и двухосновных кислот. Из многоатомных спиртов предпочтительно применение 2х-атомных, в связи с тем, что высокомолекулярные соединения из двух атомных спиртов (гликолей), имеющих две гидроксильные группы ОН в молекуле, и двухосновных кислот, имеющих две карбоксильные группы СООН в молекуле, создают условия для формирования особой - термопластичной пленки [4]. Термопластичные высокомолекулярные соединения сохраняют способность плавиться и растворяться. Эффективность соединений двухатомных спиртов по сравнению с трехатомными (глицерин), которые с двухосновными кислотами образуют термореактивные высокомолекулярные соединения, подтверждена экспериментально при изнашивании пары антифрикционный сплав-сталь [74].

Для подвижных соединений, в которых антифрикционный сплав отсутствует, необходимо наличие в смазочном материале соединений, которые используются для получения полиэфиров [100], а также соединение металла-катализатора [62].

5.2.1. Разработка состава антифрикционной присадки к смазочным материалам

Разработан состав и технология изготовления присадки к смазочным материалам, формирующей высокомолекулярные металлсодержащие пленки в зоне трения подвижных сопряжений, которая содержат в своем составе следующие химические соединения:

- 1) Пальмитат меди – соль меди и пальмитиновой кислоты. Химическая формула: $\text{Cu}(\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COO})_2$. Представляет собой сине-зеленый порошок, нерастворимый в воде
- 2) Стеарат меди – соль меди и стеариновой кислоты. Химическая формула: $\text{Cu}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$. Представляет собой сине-зеленое аморфное вещество, нерастворимое в воде
- 3) Касторовое масло – смесь триглицеридов, олеиновой, линолевой и рацинолевой кислот. Большая часть представляет собой глицериды вязкой рацинолевой кислоты, содержащей в огромной молекуле лишь одну ненасыщенную связь. Химическая формула: $\text{C}_3\text{H}_5(\text{C}_{18}\text{H}_{33}\text{O}_2)_3$.
- 4) Смесь цинкового порошка и диоксида кремния $\{\text{SiO}_2\}_n$ с размерами частиц не более 3 мкм.
- 5) Пропиленгликоль $\text{C}_3\text{H}_6(\text{OH})_2$ – двухатомный спирт.
- 6) Олово двухлористое, двухводное, $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- 7) Графит терморасширенный

Предлагаемая антифрикционная присадка может использоваться в любых смазочных материалах, как на жидкой (минеральные и синтетические масла), так и на консистентной основе. При этом в качестве мыльных пластических смазок могут использоваться, например, такие пластичные смазки, как Циатим-201, Литол-24, ОКБ-122-7 и др.

В случае, если пара трения составлена таким образом, что одним из контрагентов является медный сплав (латунь, бронза), то формирование сербовитной медесодержащей пленки на контакте происходит за счет этого медного сплава и добавленной в смазку антифрикционной присадки. Однако, во многих случаях, пары составлены таким образом, что в узле трения нет сплавов, содержащих медь. Для подвижных сопряжений, в которых антифрикционный сплав отсутствует, необходимо вводить в присадку органические соли некоторых металлов. В частности, для этого в состав присадки были введены пальмитат меди и стеарат меди, т.е. соли пальмитиновой и стеариновой кислот соответственно.

Пальмитат меди и стеарат меди введены в состав антифрикционной присадки для стабилизации ее свойств в области повышенных температур и тангенциальных сил трения. Кроме того, в присутствии данных соединений происходит окисление двухатомного спирта до кислот, которые в дальнейшем взаимодействуют с элементами медного сплава, образуя катализаторы процесса формирования сербовитной пленки. Пальмитат меди способствует также удерживанию пропиленгликоля в составе композиции и, вследствие контактного вытеснения меди ионами железа из органической соли, обеспечивает устойчивую работу узла трения в режиме избирательного переноса.

Выполнены экспериментальные исследования по влиянию предложенной присадки к смазочным материалам на процессы трения и изнашивания металлических пар. При изнашивании пар трения Л63, А020-1 со сталь 40Х в Индустриальном масле И-40А с добавлением в него 2,5% от объема всей смазки, установлены низкие триботехнические характеристики подвижных сопряжений по сравнению с их значениями при работе пар в базовом смазочном материале (см. Табл.5.3, 5.4).

По результатам проведенных исследований подана заявка на патент РФ на «Антифрикционную присадку к смазочным материалам».

Предложенные смазочные композиции переданы ряду организаций для использования в практической работе и внедрены в производство при изготовлении пластичной смазки «Росойл» для холодной штамповки изделий.

5.3 Исследование процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений в разработанных смазочных материалах

На основании разработанных практических рекомендаций по составу смазочных материалов, обеспечивающих формирование высокомолекулярных металлосодержащих пленок на поверхностях трения трибосопряжений, в работе предложены два состава смазочных композиций. Первый состав на основе касторового масла содержит производную многоатомных спиртов, полностью растворим в минеральных и синтетических смазочных материалах и предназначен для подвижных сопряжений, имеющих в своем составе антифрикционные сплавы.

В таблице 5.3 представлены результаты исследований по влиянию смазочных материалов на процессы трения и изнашивания пар латунь Л63-сталь 40Х. Анализ представленных данных показывает, что введение в индустриальное масло И-40А предложенной антифрикционной присадки в количестве 2,5% от объема обеспечивает значительное снижение износа антифрикционного сплава по сравнению с работой подвижных сопряжений в базовом смазочном материале, а также снижает коэффициент трения пары антифрикционный сплав-сталь. Осмотр поверхностного слоя зоны трения пары Л63-сталь в масле с присадкой показал образование медьсодержащей пленки. При работе пары алюминиевый сплав А020-1-сталь в масле с присадкой на поверхности стального образца визуально отмечалось наличие пленки серого цвета.

Второй состав смазочной композиции отличается от первого содержанием в своем составе соединения меди, которое будет работать как катализатор в процессе взаимодействия триады трения. В таблице 5.4

представлены результаты влияния медьсодержащей композиции в индустриальном масле И-40А на процессы трения и изнашивания пары колodka-ролик. Эксперименты показали, что образование медьсодержащей пленки на поверхностях трения подвижных сопряжений ведет к снижению износа металлических пар и коэффициента трения по сравнению с работой трибосопряжения в базовом смазочном материале.

Образование на поверхностях трения металлических пар медьсодержащей пленки способствует повышению контактной выносливости тел качения (рис.5.1). Выполненные эксперименты на 4-х шариковой машине трения «Plint» (США) при нагрузке на шпиндель машины 4500Н и частоте вращения верхнего шара 10000 об/мин показали, что формирование на дорожках качения шаров из стали ШХ-15 медьсодержащей пленки обеспечивает повышение контактной выносливости тел качения в 1,3 раза по сравнению с работой металлических пар в масле И-40А.

Таблица 5.3

Влияние смазочных материалов на процессы трения
и изнашивания подвижных сопряжений.
Р=6МПа, V=1м/с, S=2100 м

№№ п/п	Смазочный материал	Пара трения	Износ $\cdot 10^{-7}$	Коэффициент трения
1	Масло индустриальное И-40А	Л63-сталь	610	0,06
2	И-40А+2,5% присадки	Л63-сталь	19	0.008
3	И-40А	А020-1-сталь	34	0,014
4	И-40А+2,5% присадки	А020-1-сталь	8	0,009

Таблица 5.4

Влияние смазочных материалов на процессы трения
и изнашивания подвижных сопряжений.

$P=8$ МПа, $V=1$ м/с, $S=2100$ м

№№ п/п	Смазочный материал	Пара трения	Износ $\cdot 10^{-4}$ г.	Коэффициент трения
1	Масло индустриальное И-40А	сталь 40Х- сталь 40Х	21	0,020
2	И-40А+2,5% присадки	сталь 40Х- сталь 40Х	7	0,010

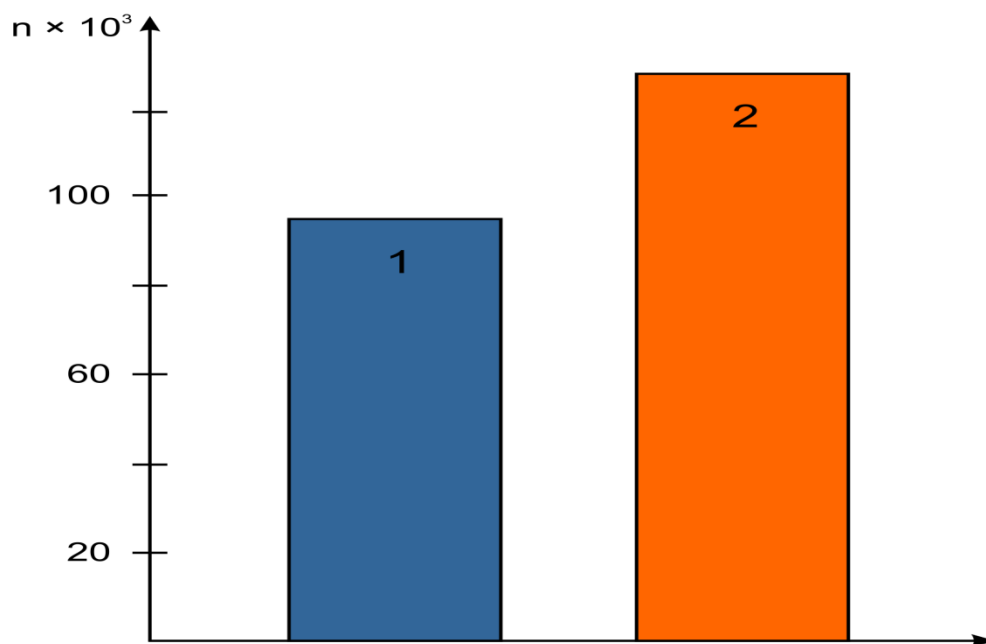


Рисунок 5.1 - Контактная выносливость тел качения в смазочных материалах: 1 - масло индустриальное И-40А; 2 - масло И-40А+2,5% присадки

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальными исследованиями процессов трения и изнашивания показано, что при контактном взаимодействии пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине формирование металлосодержащих защитных пленок в приповерхностном микрообъеме происходит в результате микросхватывания, механического, абразивного и коррозионно-механического изнашивания медного сплава.

2. На основании рентгеноспектрального и послойного рентгенофотоэлектронного анализа установлен процесс формирования диффузионного макроскопического потока цинка на пути трения пары медный сплав – сталь 700 м.

3. Установлено, что при контактном взаимодействии со сталью в поверхностно-активных смазочных материалах двухфазных медных сплавов реализуются условия избирательного переноса с формированием металлосодержащей защитной пленки.

4. Проведенными исследованиями установлено, что структура защитной металлосодержащей пленки представляет собой композиционный материал толщиной 0,6 мкм, состоящий из оксидных соединений, медной и высокомолекулярной пленок, содержащих медь и цинк, взаимосвязано образующихся на поверхностях трения пары медный сплав – сталь в глицерине на пути трения 700 – 1400 м.

5. Разработаны практические рекомендации по составу смазочных материалов, обеспечивающих реализацию явления избирательного переноса при контактном взаимодействии металлических пар, которые переданы ряду организаций для использования в практической работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабель В.Г., Байракумов М.Д. Об использовании композиций, содержащих галогены металлов переменной валентности и исследование механизма их смазочного действия. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, вып.2. 1987 с.7-19.
2. Барчан Г.И., Крагельский И.В., Пономаренко А.Г. Сложные эфиры органических кислот - жидкости, вызывающие избирательный перенос. В кн.: Применение избирательного переноса в узлах трения машин. М.: ВИСМ, 1976, т.2, с.9-13.
3. Барчан Г.П., Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г. Исследование избирательного переноса в сложных эфирах монокарбоновой кислоты. Химия и технология топлив и масел. 1978, № 10, с.59-61.
4. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. Электротехнические материалы. М.: Энергоатомиздат, 1985, 304 с.
5. Бортник Г.И. Влияние микроабразива на контактное взаимодействие трущихся пар при избирательном переносе. Сб. Избирательный перенос при трении. М.: Наука, 1975, с.46-49.
6. Бранд Дж., Эглинтон Г. Применение спектроскопии в органической химии. М.: Мир, 1967, 279 с.
7. Брюзгина Н. Д., Гороховский Г. А., Дмитриева Т. В., Логвиненко П. Н. О влиянии продуктов механохимических превращений олеиновой кислоты на диспергирование металлов. Трение и износ, 1983, т. 4, №4, с. 621-625.
8. Бурлакова В.Э. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности, Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2005, 209 с.
9. Буше Н.А., Копытко В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981, 127 с.

10. Верещак А.В., Гриначевский А.Н., Горский В.Р. Влияние скорости относительного скольжения на строение и состав контактной зоны меди в паре трения медь-сталь 45. Трение и износ, 1982, т.13, № 2, с.295-299.

11. Волкова М.С. Повышение износостойкости пар трения медный сплав-сталь при смазывании промышленными маслами на основе сложных эфиров. Дисс.на соиск.уч.ст.к.т.н., М.: МИНХ и ГП им. И.М.Губкина, 1985, 198 с.

12. Вольфович А.Н. Повышение износостойкости подвижных сопряжений трибомодификацией поверхностей трения. Дисс. на соиск. уч. ст к.т.н., М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 1999, 237 с.

13. Воробьева С. А., Лавринович Е. А., Мушинский В. В., Лесникович А. И. Влияние высокодисперсных металлоплакирующих присадок на антифрикционные и противоизносные свойства моторного масла. Трение и износ, 1996, т. 17, №6, с. 827-831.

14. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов. М.: МСХА, 2004, 384 с.

15. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. Берлин: ВЕБ Техник, 1981, 192 с.

16. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. М.: МСХА, 2001, 616 с.

17. Гаркунов Д.Н., Дякин С.И., Курлов О.Н. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения. М.: Машиностроение, 1982, 207 с.

18. Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н., Поляков А.А. О механизме взаимного атмосферного переноса меди при трении. Докл. АН СССР, 1960, т.113, № 5, с.1128-1129.

19. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. М.: Транспорт, 1969, 104 с.

20. Гаркунов Д.Н., Симаков Ю.С. Избирательный перенос как проявление эффекта безызносности. Сб. Избирательный перенос при трении. М.: Наука, 1975, с.3-5.

21. Гольштейн Ш.И., Ньюбфи Д.Е., Эхлин П. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Пер. с англ. М.: Мир, т.1-303 с, т.2., 348 с.

22. Гузенков П.Г. Детали машин. М.: Высшая школа, 1982, 351 с.

23. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980, 227 с.

24. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. М.: Химия, 1991, 312 с.

25. Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Механизм действия противоизносных присадок к маслам. М.: Химия, 1978, 224 с.

26. Заславский Р. Н. Перспективы использования трибополимерообразующих соединений для создания смазочных материалов (обзор). Трение и смазка в машинах и механизмах, 2006, №3, с. 21-28.

27. Зигбан К., Кордлинг К., Фальман А. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1981, 493 с.

28. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения. Сб. под. ред. Гаркунова Д.Н., М.: Машиностроение, 1982, 205 с.

29. Кальнер В.Д., Зильберман А.Г. Практика микрозондовых методов исследования металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981, 215 с.

30. Карасик И. И., Поляков С. А. Масштабный фактор и возможности моделирующих испытаний на существующих машинах трения. Трение и износ, 1983, т. 4, №4, с. 671-675.

31. Келоглу Ю.П., Захариевич К.М., Карташевская М.И. Металлы и сплавы, Справочник, Кишинев: 1977, 264 с.

32. Кобеко П.П. Аморфные вещества, М-Л.: АН СССР 1952, 431 с.

33. Конюшая Ю.П. Открытия советских ученых, ч.1, МГУ, 1988, 478 с.

34. Коррозия и защита химической аппаратуры. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность. Под ред. Сухотина А.М., Шрейдера А.В. Л.: Химия, 1974, т.9, 576 с.

35. Косогова Ю.П., Кужаров А.С., Кужаров А.А. Синтез и триботехнические возможности нанокластеров меди в растворах полиатомных спиртов. Матер. Научно-техн. школы-конференции. «Славянотрибо». Рыбинск: СПб, Пушкин, 2006, т.2. с.42-43.

36. Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение, изнашивание и смазка. Кн.1, М.: Машиностроение, 1978, 400 с.

37. Крагельский И.В., Добычин Н.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977, 526 с.

38. Крылов К.А., Верхонин Л.Г. Работоспособность восстановленных бронзовых деталей, работающих на самолетах в режиме избирательного переноса. Сб.Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977, с.186-191.

39. Кужаров А.А. Триботехнические свойства нанометрических кластеров меди. Автореферат диссерт. на соиск. уч.степени к.т.н. Ростов-на-Дону, 2004, 20 с.

40. Кужаров А.С., Барчан Г.П., Чуваев В.В. Образование координационных соединений на трущихся поверхностях металлов. Физическая химия, 1977, т.1, вып.11, с.2949-2951.

41. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задощенко Е.Г. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности. Механизм формирования граничных слоев на стали в самоорганизующейся трибологической системе медь-глицерин-сталь. Трение и износ, 1998, т.19, №6, с.768-778.

42. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Марчак Р. Туннельная микроскопия поверхностей трения трибосистемы медь-глицерин-сталь. Тез.докл. 5 Межд. научно-техн.конф. по динамике технологических систем. Ростов-на-Дону, 1997, т.2, с.122-123.

43. Кужаров А. С., Булгаревич С. Б., Кужаров А. А., Кравчик К. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Часть 5. Самоорганизация в условиях граничного трения. Трение и износ, 2002, т. 23, №6, с. 645-652.

44. Кужаров А. С., Булгаревич С. Б., Бурлакова В. Э., Кужаров А. А., Акимова Е. Е. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Часть 6. Анализ термодинамических особенностей трибохимических реакций. Трение и износ, 2007, т. 28, №2, с. 212-216.

45. Кужаров А. С., Марчак Р., Гузик Я., Кравчик К., Задощенко Е. Г. Трибологические проявления самоорганизации в системе латунь-сталь-глицерин. Трение и износ, 1996, т. 17, №1, с. 113-122.

46. Куксенова Л.И. Закономерности структурных изменений и массоперенос в поверхностных слоях и их влияние на износ трибосопряжений медный сплав-сталь. Автореф.диссерт. на соиск. уч.степ. д.т.н., М.: МАТИ, 1990, 45 с.

47. Куксенова Л.И., Полков А.А., Рыбакова Л.М. Смазочные материалы и явление избирательного переноса при трении. Вестник машиностроения, 1990, № 4, с.35-40.

48. Куксенова Л.И., Рыбакова Л.М. О роли диффузионных процессов при трении медных сплавов, физика и химия обработки материалов, 1978, № 1, с.123-130.

49. Курень С.Г. Квантохимическое моделирование продуктов трибохимических реакций в условиях безыносного трения и повышение на этой основе эксплуатационных свойств трибосопряжений. Автореф. диссерт. на соиск. уч.степени, к.т.н. Ростов-на-Дону, 2007, 21 с.

50. Курлов О.Н. Возбуждение избирательного переноса в узлах трения машин. Сб. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение, 1977, с.55-58.

51. Курлов О.Н. Исследование и обоснование путей возбуждения избирательного переноса в узлах трения машин. Автор. дис.на соиск. уч. степ.к.т.н. М.: МИНХ и ГП им. И.М.Губкина, 1978, 20 с.

52. Курлов О.Н., Поляков А.А. Влияние кинематики и геометрии на процессы возбуждения и поддержания избирательного переноса в трущихся парах. В кН.: Тезисы докл. Всесоюзная научн. конф. «Теория трения, износа и смазки». Ташкент: ТПИ, 1975, т.1, с.99-100.

53. Лакокрасочные материалы и покрытия. Перевод с англ., под ред. Машляковского Л.Н. Санкт-Петербург: Химия, 1991, 509 с.

54. Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. М.: Наука, 1979, 187 с.

55. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. М.: АН СССР, 1962, 305 с.

56. Луцкевич Л.Т., Литвинов В.Н., Михин Н.М. Влияние природы смазочных масел на реализацию избирательного переноса при трении. В кН.: Тезисы докл. респ.конф. «Повышение износостойкости и срока службы машин». Киев, 1977, с.22.

57. Матвеевский Р. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. Москва: Наука, 1971 год, 213 с.

58. Михин Н.М. К вопросу о механизме смазочного действия при избирательном переносе. Трение и износ, 1980, т.1, №3, с. 476-482.

59. Мишин М.А. Долговечность двигателей. Л.: Машиностроение, 1986, 288 с.

60. Мкртчян С.М. Модернизация машин трения СМЦ-2 для измерения малых величин моментов трения. М.:1979, ДП во ВИНТИ, 558-579, 5с.

61. Нефедов В.И., Черепин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983, 296 с.

62. Николаев А.Ф. Технология пластических масс. Л.: Химия, 1977, 368 с.

63. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Под ред. Чичинадзе А.В., М.: Центр «Наука и техника», 1995, 778 с.

64. Пичугин В.Ф. Исследование медной пленки на стальном образце, полученной при реализации эффекта избирательного переноса, методом фотоэлектронной спектроскопии. Трение и износ, 1982, т.3, №2, с.352-355.

65. Пичугин В.Ф. Повышение износостойкости узлов трения бурового оборудования и инструмента за счет формирования на фрикционных поверхностях трибометаллсодержащих пленок. Диссер. на соиск. уч. степ. д.т.н. М.: МИНХ и ГП им. И.М.Губкина, 1989, 304 с.

66. Пичугин В.Ф. Влияние электронного строения металлов в смазочном материале на трение и изнашивание стальных пар. Эффект безызносности и триботехнологии. 1983, № 2, с.58-66.

67. Пичугин В.Ф. О механизме избирательного переноса при изнашивании пары медный сплав-сталь. Трение и износ, том 5, № 2, 1984, с.284-294.

68. Пичугин В.Ф., Колесников И.М. Влияние природы металла в смазочном материале на самоорганизующиеся процессы при трении. Трение и износ, 1987, т.8, № 4, с.755-758.

69. Пичугин В.Ф., Колесников И.М. О механизме высокой износостойкости контактирующих поверхностей с металлсодержащими пленками, сформировавшимися в процессе трения. Поверхность. Физика, химия, механика. 1988, № 7, с.132-141.

70. Пичугин В.Ф., Пичугин Д.В. Избирательный перенос алюминия при изнашивании пары алюминиевый сплав-сталь в смазочных средах. Вестник машиностроителя, № 10, 2002, с.28-32.

71. Пичугин В.Ф., Щербинин В.М. Исследование зон трения пар медный, алюминиевый сплав-сталь, изношенных в глицерине. Трение и смазка в машинах и механизмах, 2009, № 9, с.27-33.

72. Пичугин В.Ф., Щербинин В.М. Особенности взаимодействия пары медный, алюминиевый сплав – сталь в условиях эффекта безызносности. Ремонт, восстановление, модернизация, 2009, № 11, с.20-24.

73. Пичугин В.Ф., Пичугин С.Д., Щербинин В.М. Взаимодействие триады трения в условиях эффекта безызносности. Трение и смазка в машинах и механизмах, № 7, 2012, с.39-43.

74. Пичугин Д.В. Повышение износостойкости подшипников из алюминиевых сплавов, работающих в моторных маслах. Дисс. на соиск. уч.степ. к.т.н. М.: МИНХ и ГП им. И.М.Губкина, 1986, 287 с.

75. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. М.: МСХА, 2009, 108 с.

76. Поляков А.А., Рыбакова Л.М., Симаков Ю.С. Избирательный перенос как антифрикционный механизм на основе хемосорбции. Сб. Избирательный перенос при трении. М.: Наука, 1975, с.12-19

77. Радин Ю.А., Суслов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. М.: Машиностроение, 1989, 229 с.

78. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989, 496 с.

79. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. М.: Машиностроение, 1970, 315 с.

80. Рыбакова Л.М. Рентгенографический метод скользящего пуска лучей и его возможности при исследовании избирательного переноса и поверхностей трения твердых тел. Эффект безызносности и триботехнологии, 1997, № 1, с.54-66.

81. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Об изменении кристаллической решетки в приповерхностных слоях меди и латуни при трении. Физика металлов и металловедение, 1975, т.39, № 2, с.362-366.

82. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982, 212 с.

83. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура поверхностных слоев металла при трении. Поверхность. Физика, химия, механика, 1989, № 8, с.144-153.

84. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Трение и износ. Сб. Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка, М.: ВИНТИ, 1985, т.19, с.150-247.

85. Рыжев Э.В., Харченков В.С., Хохлов В.М. Экспериментальное определение шероховатости поверхности в условиях избирательного переноса. В кн. Применение избирательного переноса в узлах трения машин. М.: ВИСМ, 1976, т.1, с.29-34.

86. Санин П.И. Химические аспекты граничной смазки. Трение и износ, 1980, т.1, № 1, с.45-58.

87. Симаков Ю.С., Михин Н.М. О механизме избирательного переноса. Сб. Избирательный перенос при трении. М.: Наука, 1975, с.6-9.

88. Соинова М.Н. повышение износостойкости деталей машин при получении избирательного переноса с помощью поверхностно-активных веществ. автореф. дисс. на соиск. уч. степ. К.т.н., М.: 1971, 17 с.

89. Трение, изнашивание, смазка. Справочник. М.: Машиностроение, 1982, 205 с.

90. Тютюнников Б.Н. Химия жиров, М.: Пищевая промышленность, 1974, 447 с.

91. Хейнике Г. Трибохимия, М.: Мир, 1987, 584 с.

92. Хохлов В.М. Технологическое обеспечение шероховатости и износостойкости поверхностей трения в условиях избирательного переноса. Автореф. диссерт. на соиск. уч.степ. к.т.н., Брянск, БИТМ, 1976, 24 с.

93. Хрущев М.М., Бабичев М.А., Абразивное изнашивание, М.: Наука, 1970, 251 с.

94. Чигаренко Г.Г., Барчан Г.П., Крагельский И.В. Ионные процессы при избирательном переносе. Физико – химическая механика материалов. 1978, т. 14, № 2, с. 124-125.

95. Чигаренко Г.Г., Понамаренко А.Г. Исследование химического состава комплексообразующих добавок на смазочные свойства масел. Трение и износ, 1989, № 6, т. 10, с. 1050-1061.

96. Чигаренко Г.Г., Понамаренко А.Г. Исследование влияния химического строения комплексообразующих добавок на смазочные свойства масел. Трение и износ, 1989, № 6, т. 10, с. 1050-1061.

97. Чигаренко Г.Г., Понамаренко А.Г., Тигрина В.А. Влияние ионов контактирующих металлов на процесс избирательного переноса. Трение и износ, 1983, т. 4, № 4, с. 615-620

98. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. и др. Основы трибологии. Москва: Машиностроение, 2001, 664 с.

99. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения. Минск: БГУ, 1978, 203 с.

100. Энциклопедия полимеров, М.: 1974, т.2, 1031 с.

101. MultiQuant M. Mohai XPS MultiQuant: Multimodel XPS Quantification Software, Surf. Interface Anal. 36, 282 (2004).

102. Scofield J.H. Hertree Slater Subshell Photoionization Cross-Sections at 1254 and 1487 e V.J. Electron Spectros. Relat Phenom 8 (1976, 129).

103. Iablonski A. Universal Energy Dependence of the Inelastic Mean Free Path Surf. Interface Anal.20 (1993, 317).

ПРИЛОЖЕНИЕ К ГЛАВЕ 4

Рентгеноспектральные исследования распределения меди и цинка в паре медный сплав – сталь.

1. Распределение меди в зоне трения колодки из латуни Л63 на пути терния 70 – 2100 м. (Рис.4.17 – 4.22)

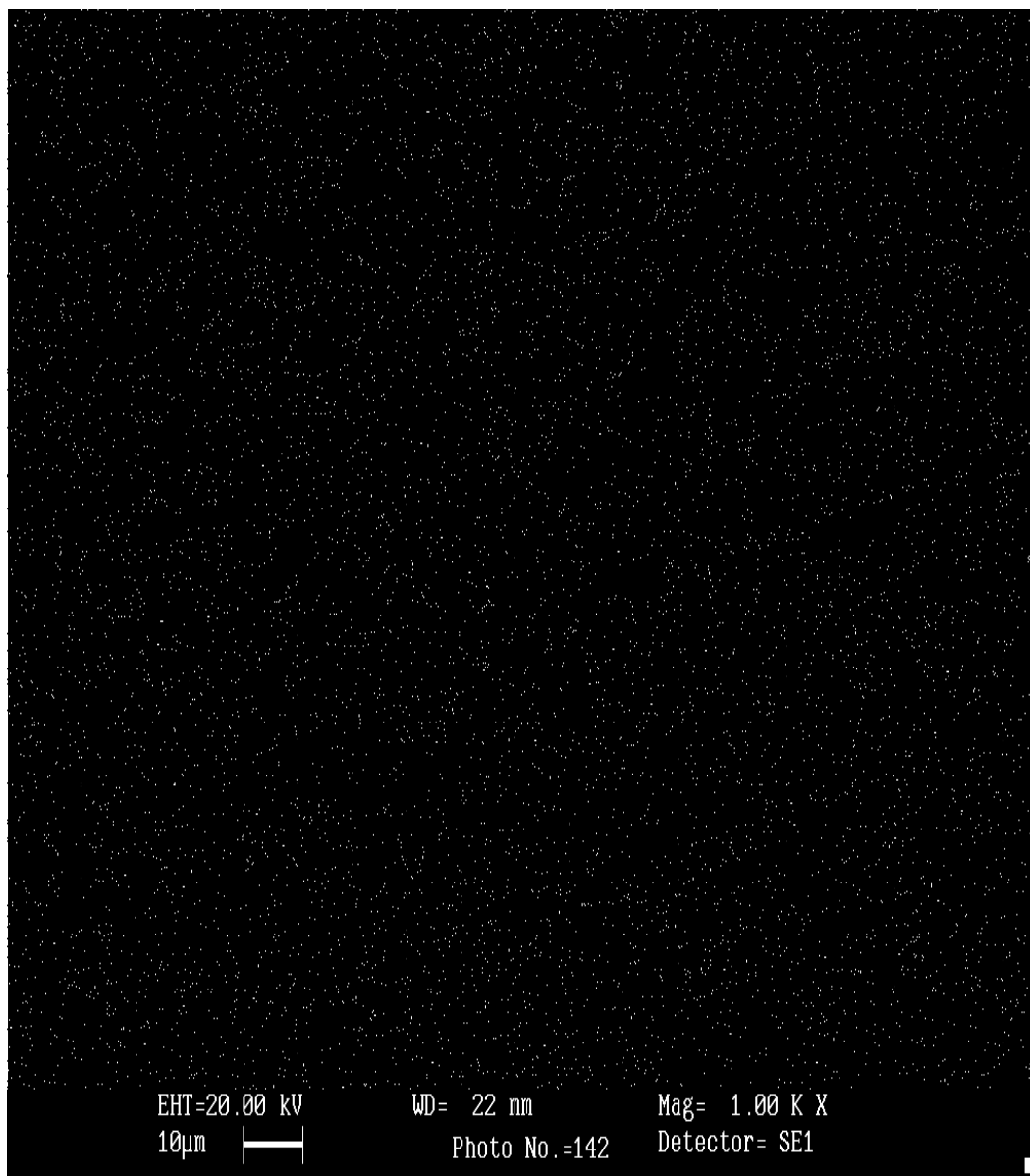


Рисунок 4.17 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения латуни Л-63, изношенной в глицерине (путь трения 70 м) (x1000)

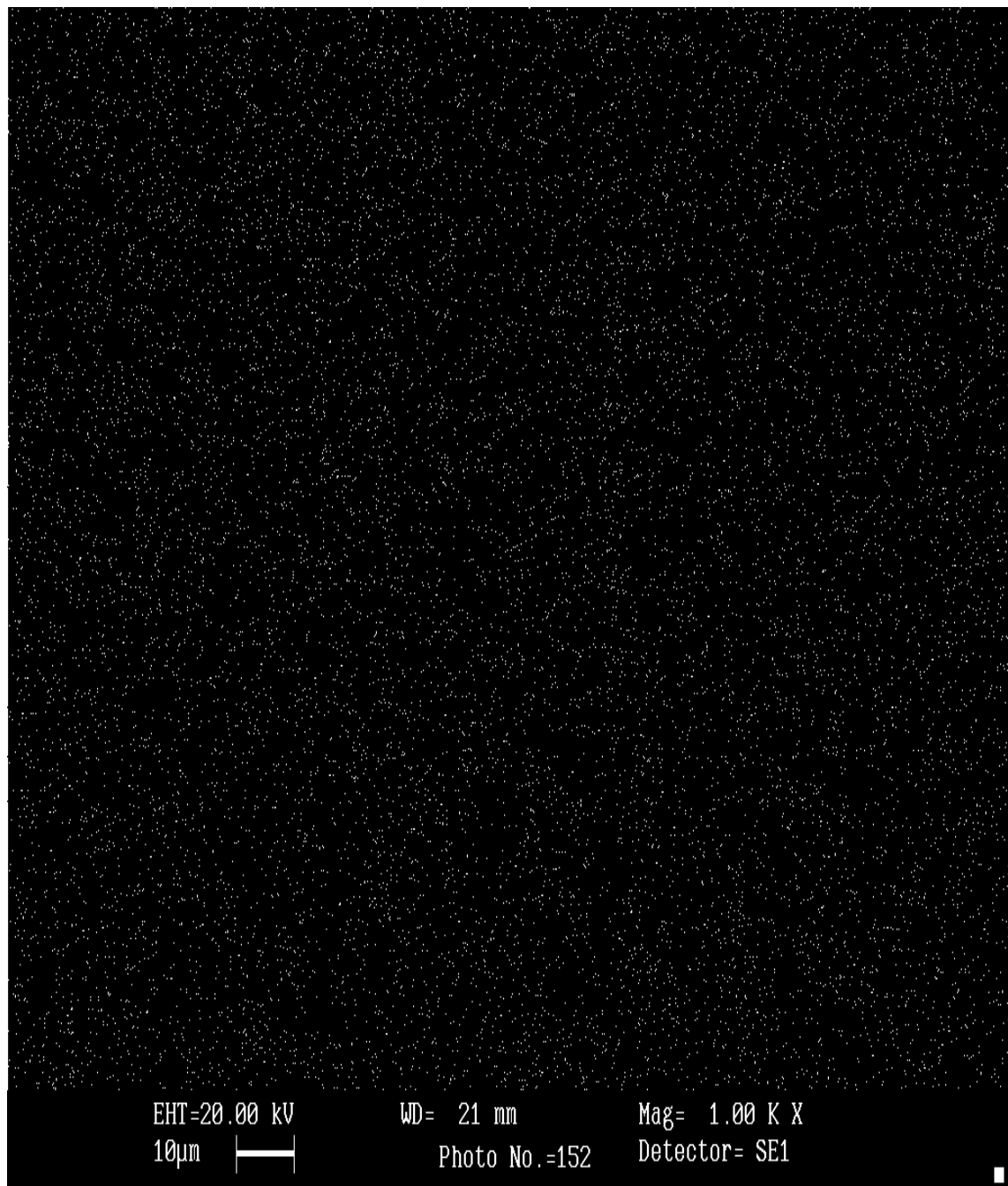


Рисунок 4.18 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения колодки, работавшей в глицерине на пути трения 210 м (x 1000)



Рисунок 4.19 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения образца из сплава Л-63, изношенного в глицерине на пути трения 350 м (x 1000)

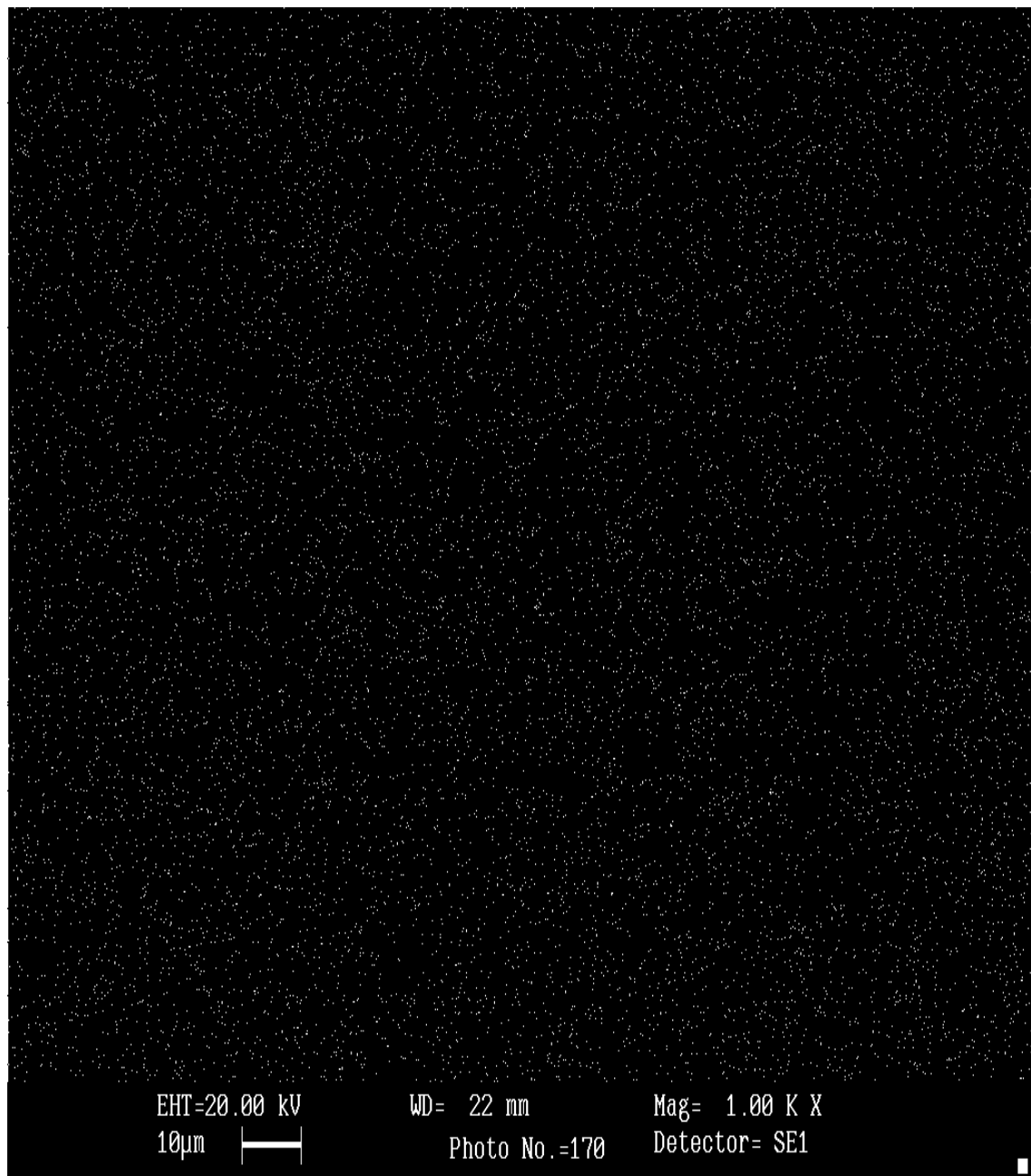


Рисунок 4.20 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения колодки из медного сплава, работавшей в глицерине на пути трения 700 м (х 1000)

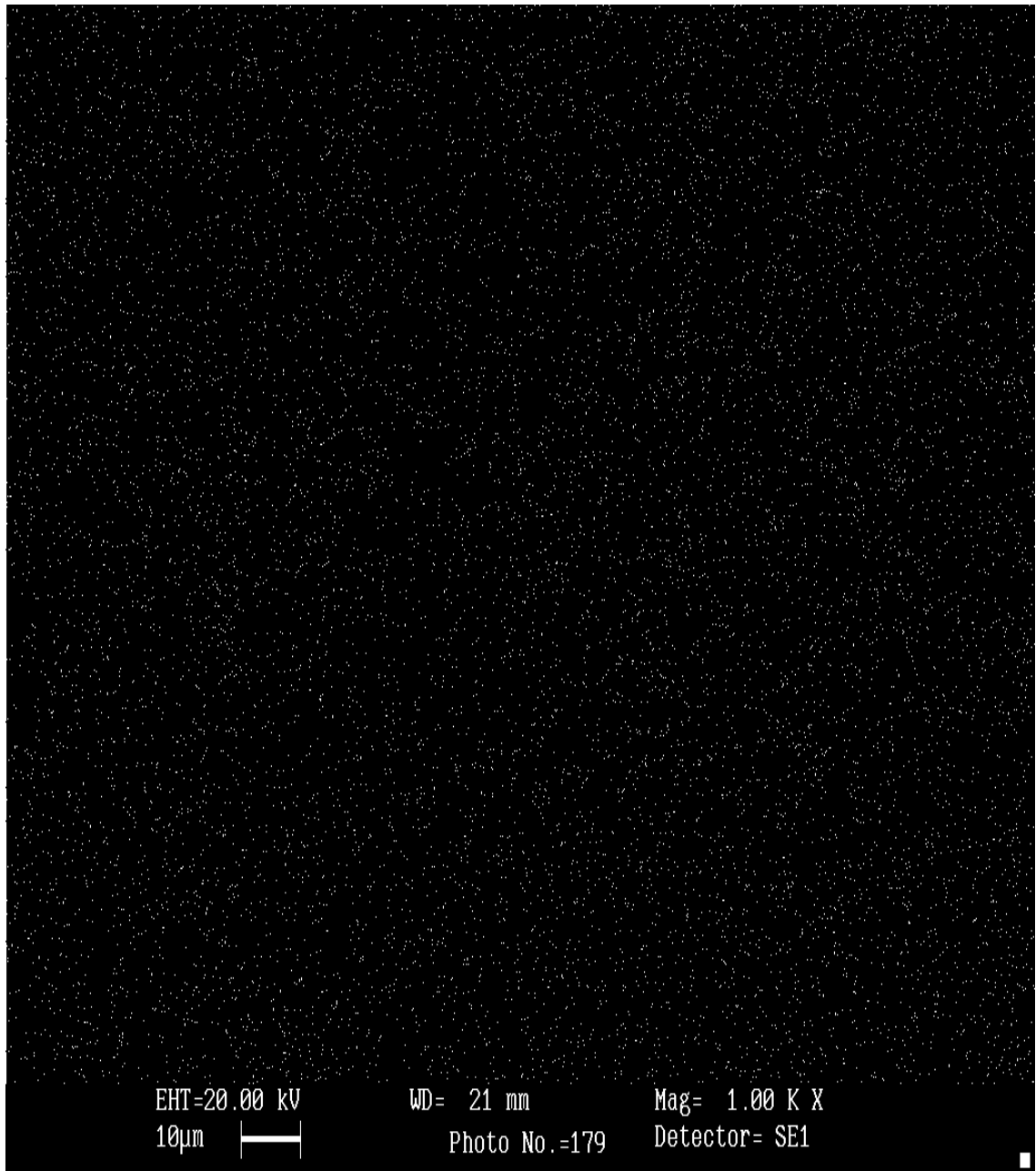


Рисунок 4.21 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения медного сплава, работавшего в глицерине на пути трения 1400 м (x 1000)

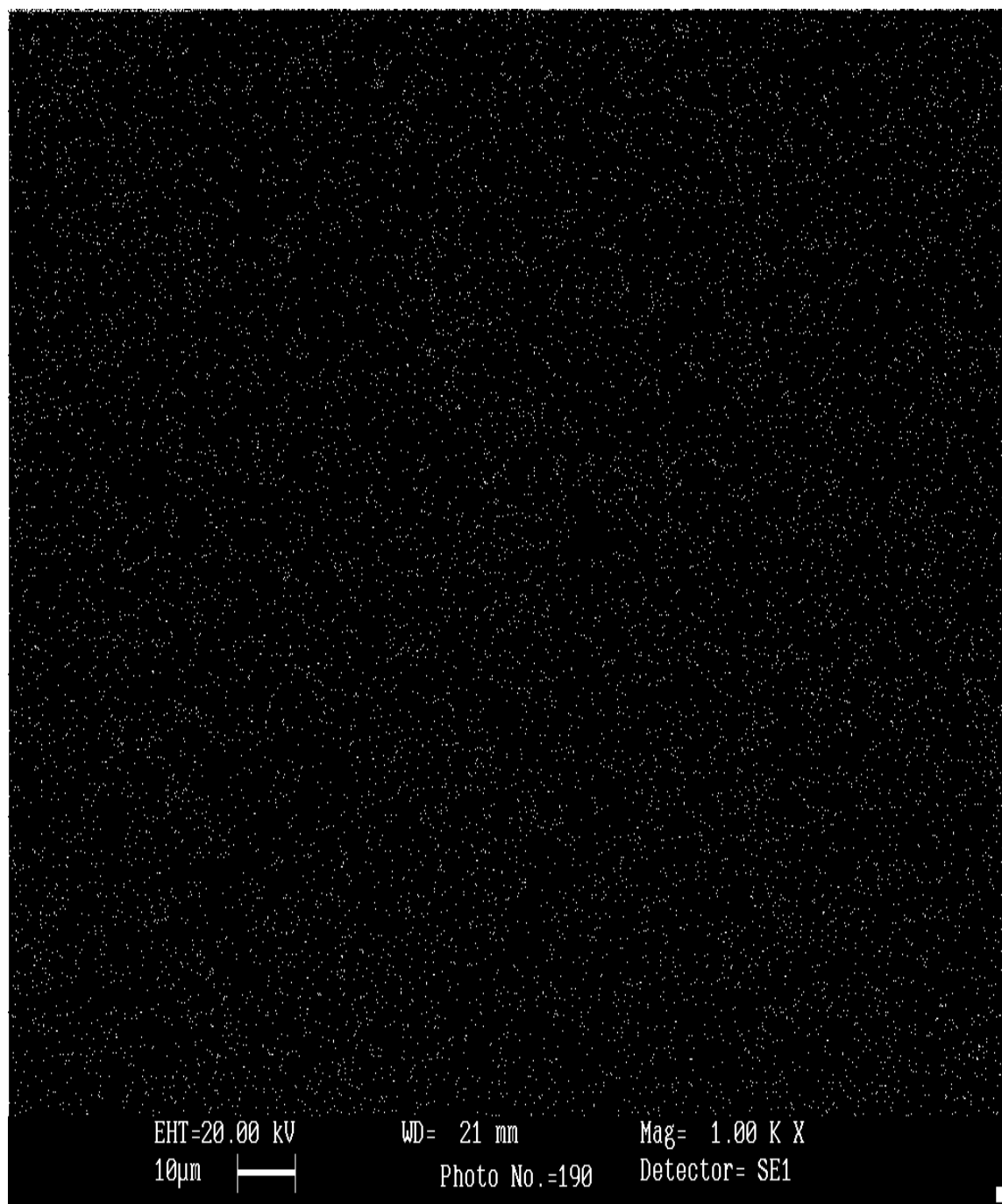


Рисунок 4.22 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения медного сплава, изношенного в глицерине на пути трения 2100 м (x 1000)

2.Рентгеноспектральные исследования распределения цинка в зоне трения колодки из латуни Л63 на пути трения 70 – 2100 м (Рис.4.23-4.28)

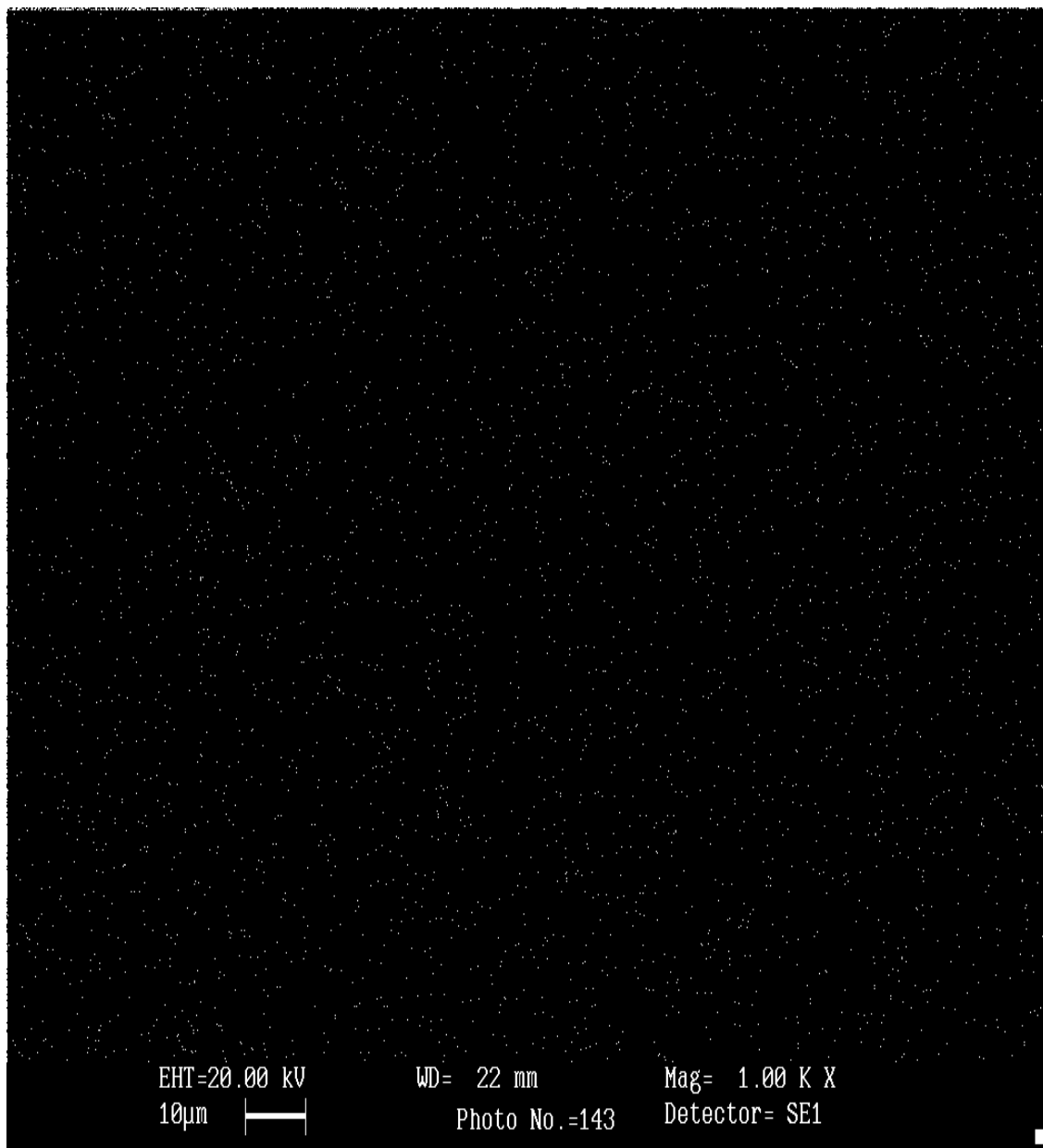


Рисунок 4.23 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения медного сплава, работавшего в глицерине (путь трения 70 м) (x1000)

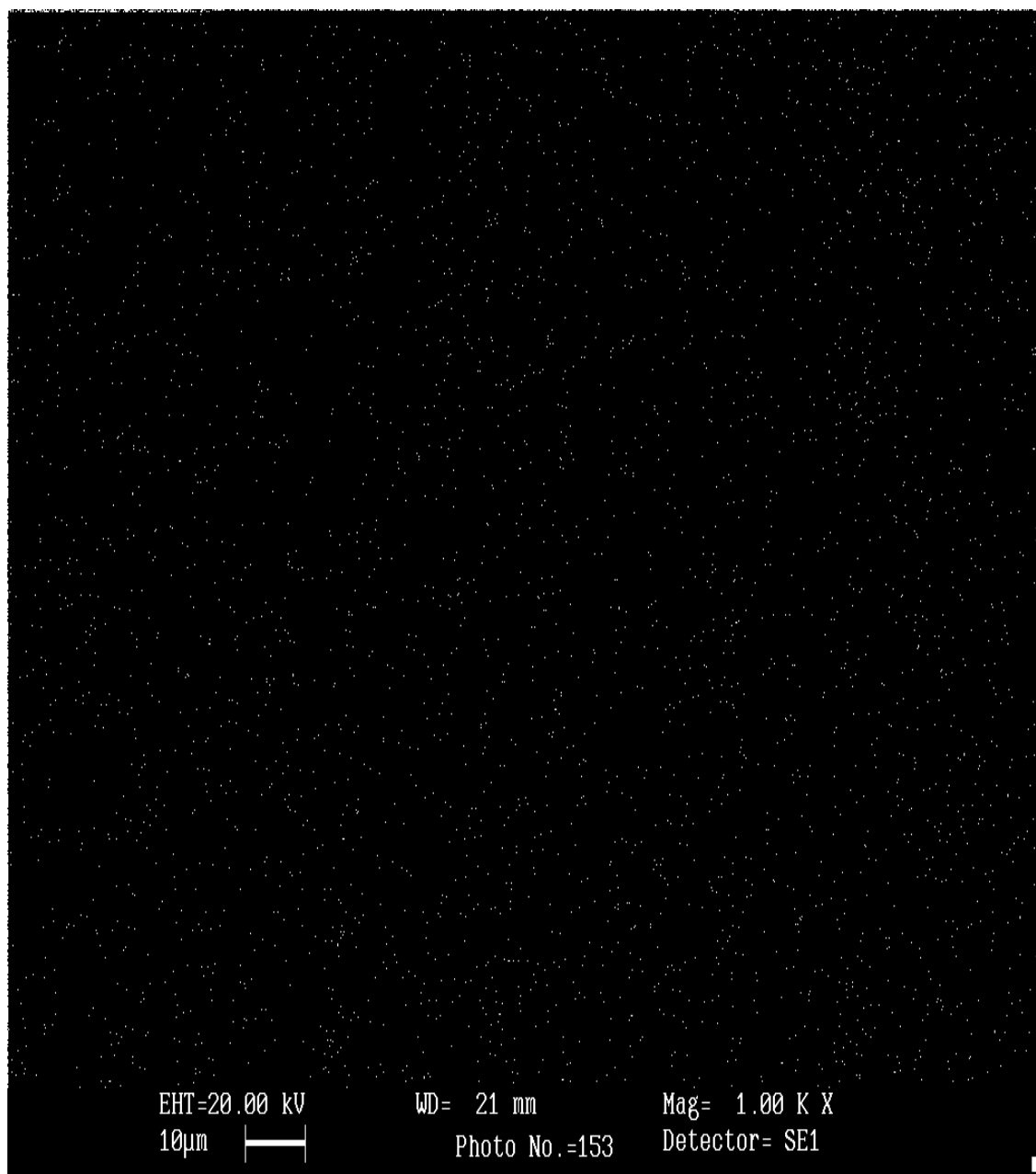


Рисунок 4.24 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения образца из латуни Л63, изношенного в глицерине на пути трения 210 м (x1000)

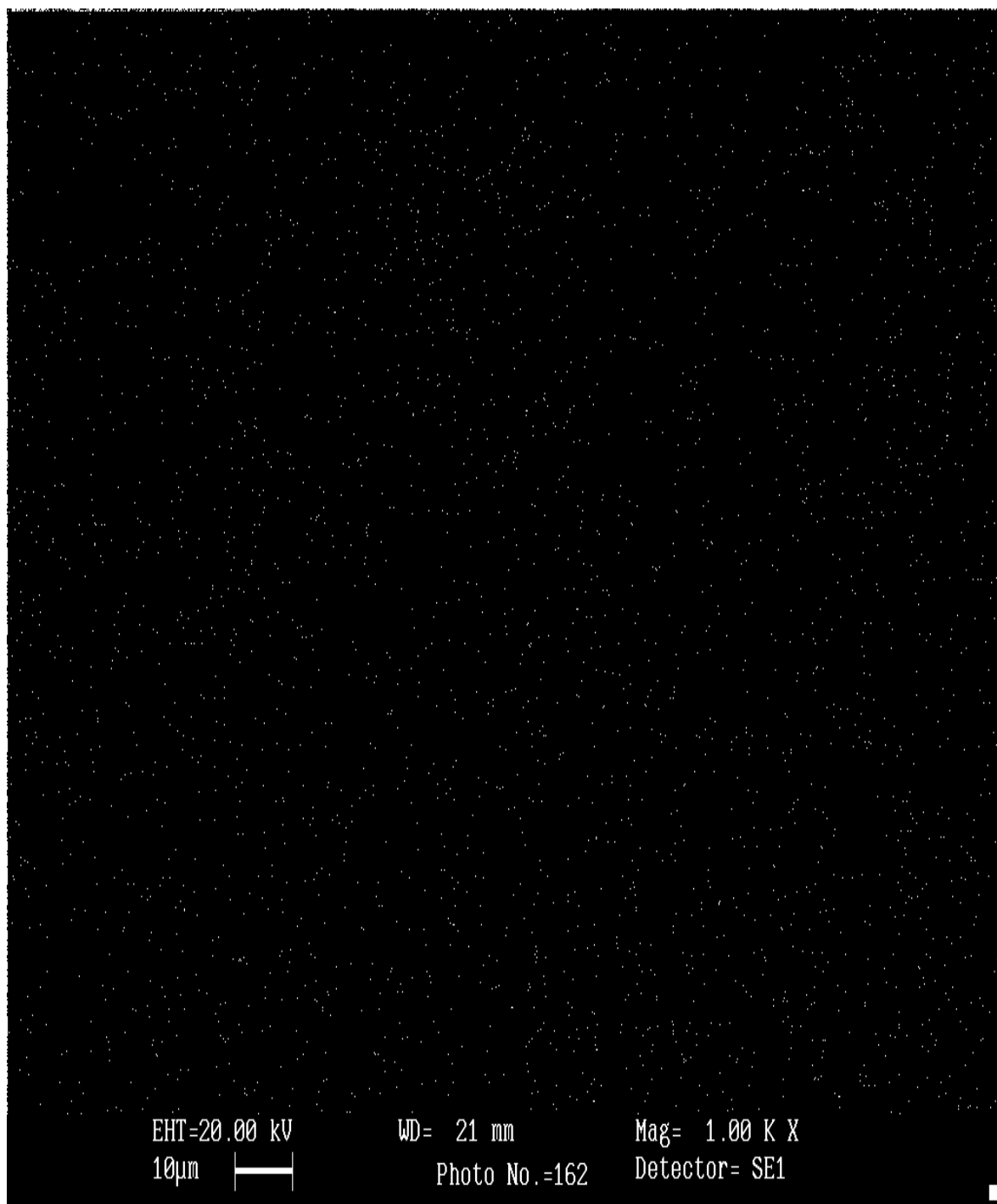


Рисунок 4.25 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения колодки из сплава Л63, изношенной в глицерине на пути трения 350 м (x1000)

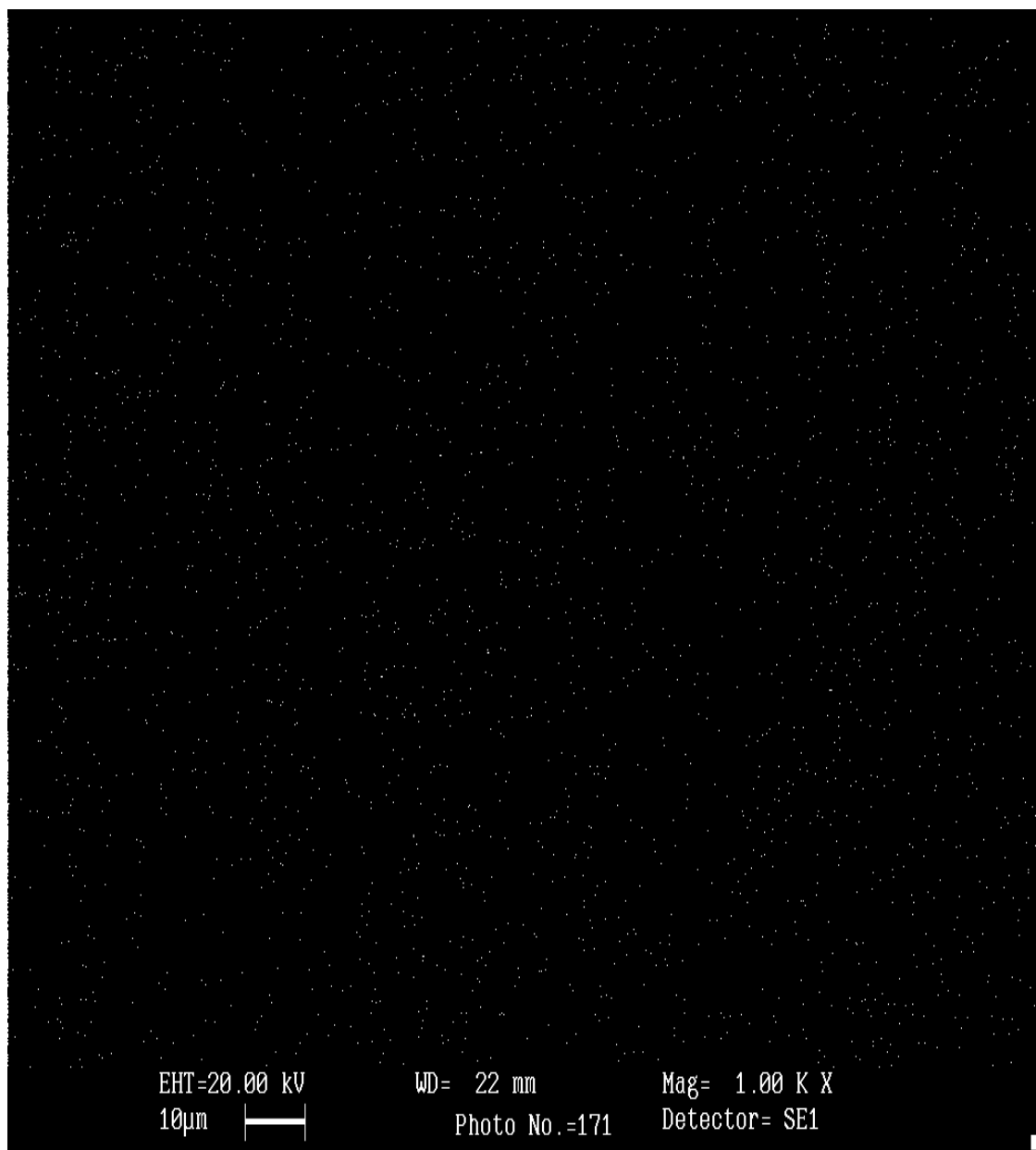


Рисунок 4.26 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения образца из медного сплава, изношенного в глицерине на пути трения 700 м (x1000)

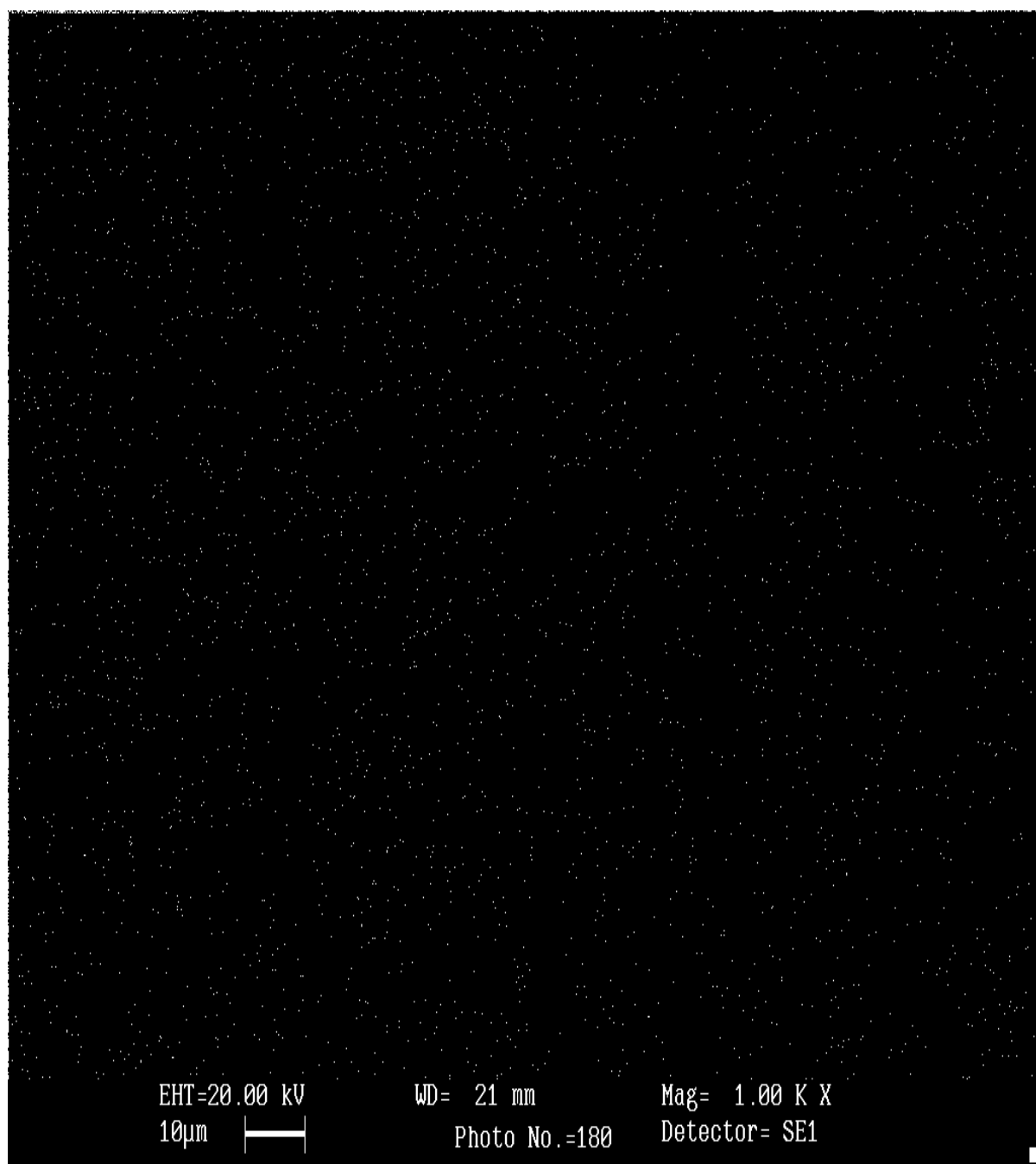


Рисунок 4.27 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения образца из латуни, работавшего в глицерине на пути трения 1400 м (x1000)

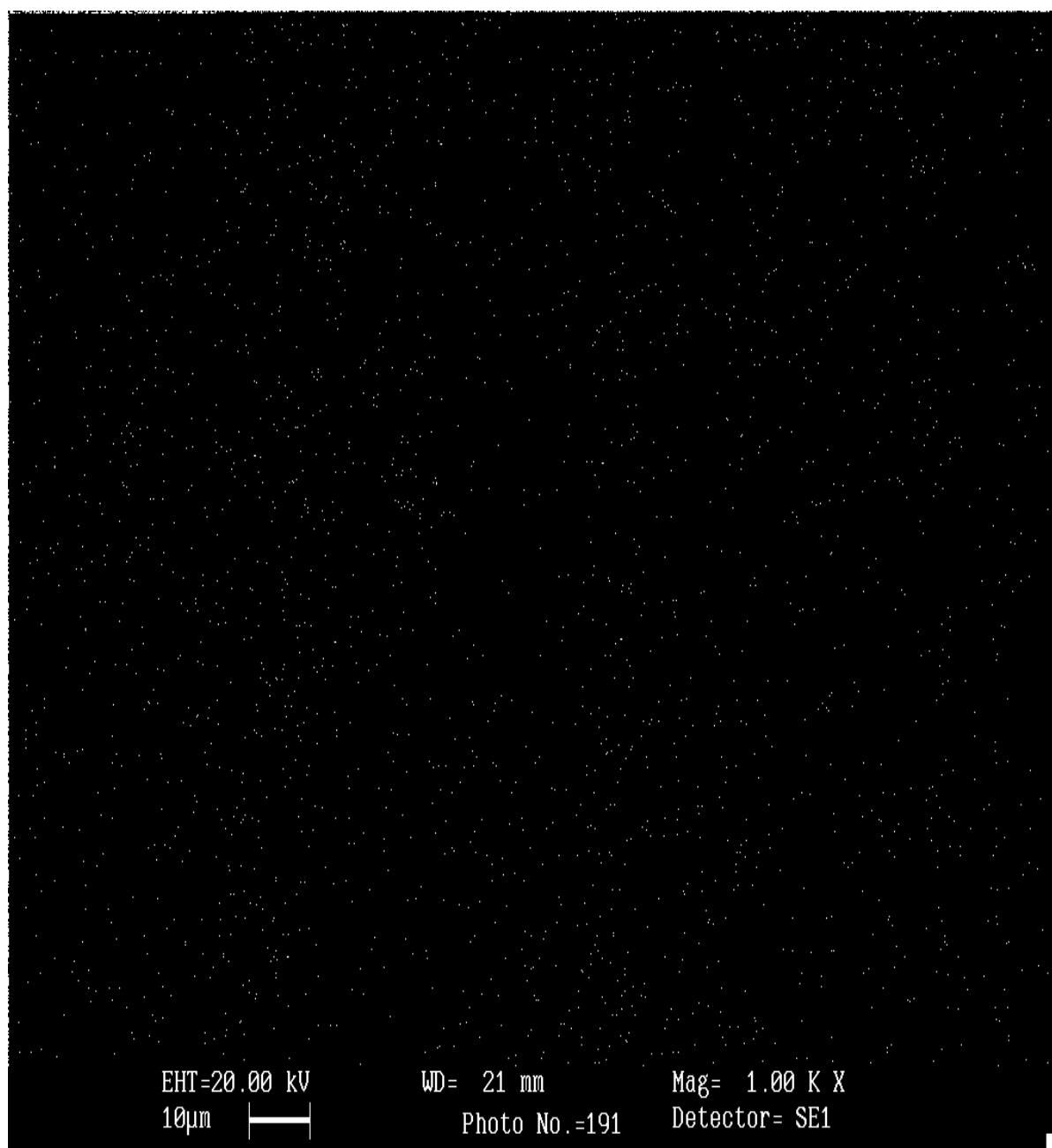


Рисунок 4.28 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения образца из латуни Л63 после работы в глицерине на пути трения 2100 м (x1000)

3.Рентгеноспектральные исследования распределения меди в зоне трения стального образца на пути трения 70 – 2100 м. (Рис. 4.39-4.44)

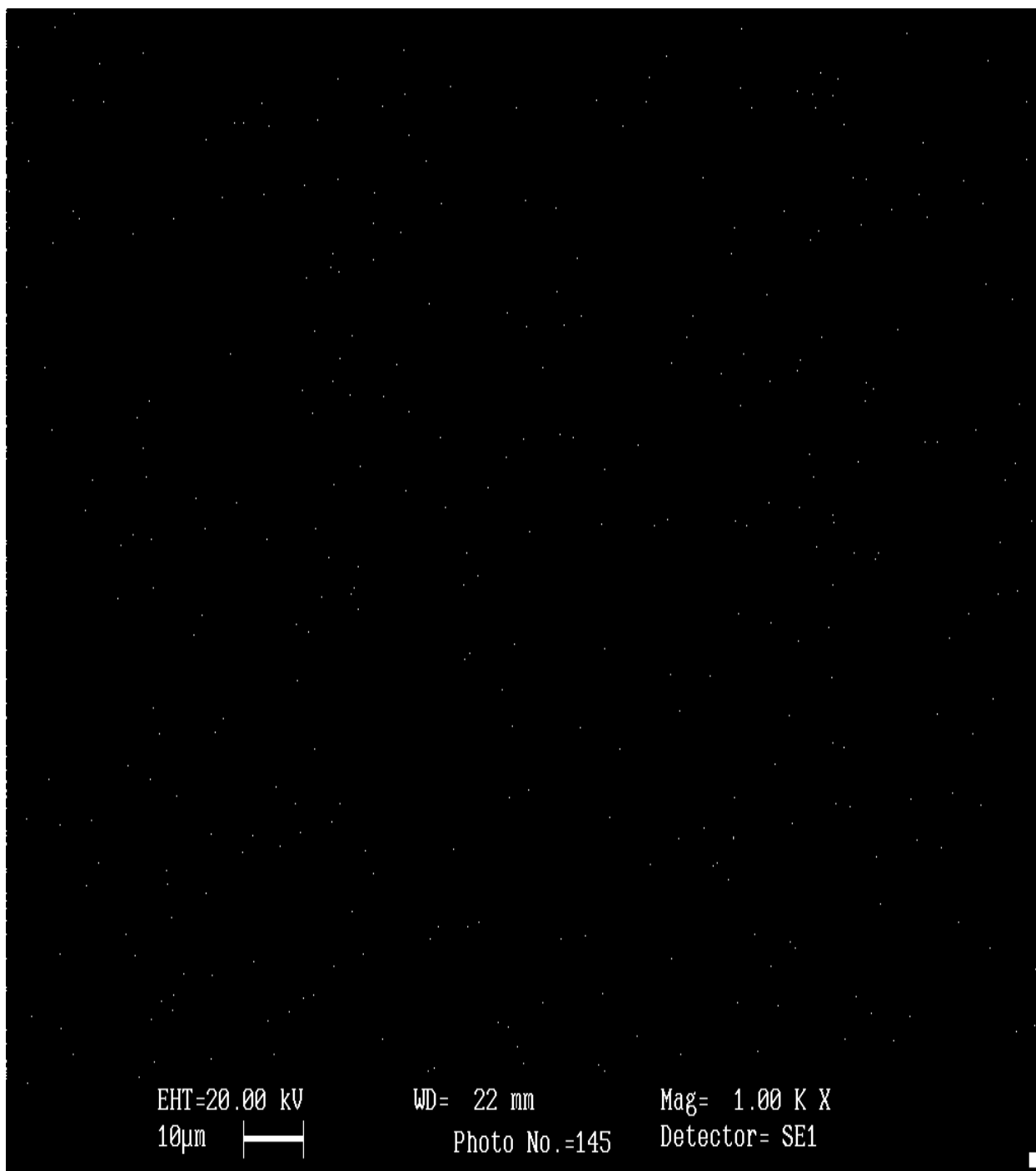


Рисунок 4.39 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения стального образца, изношенного в глицерине (путь трения 70 м) (x1000)



Рисунок 4.40 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения
стального образца, изношенного в глицерине на пути трения 210 м (x1000)

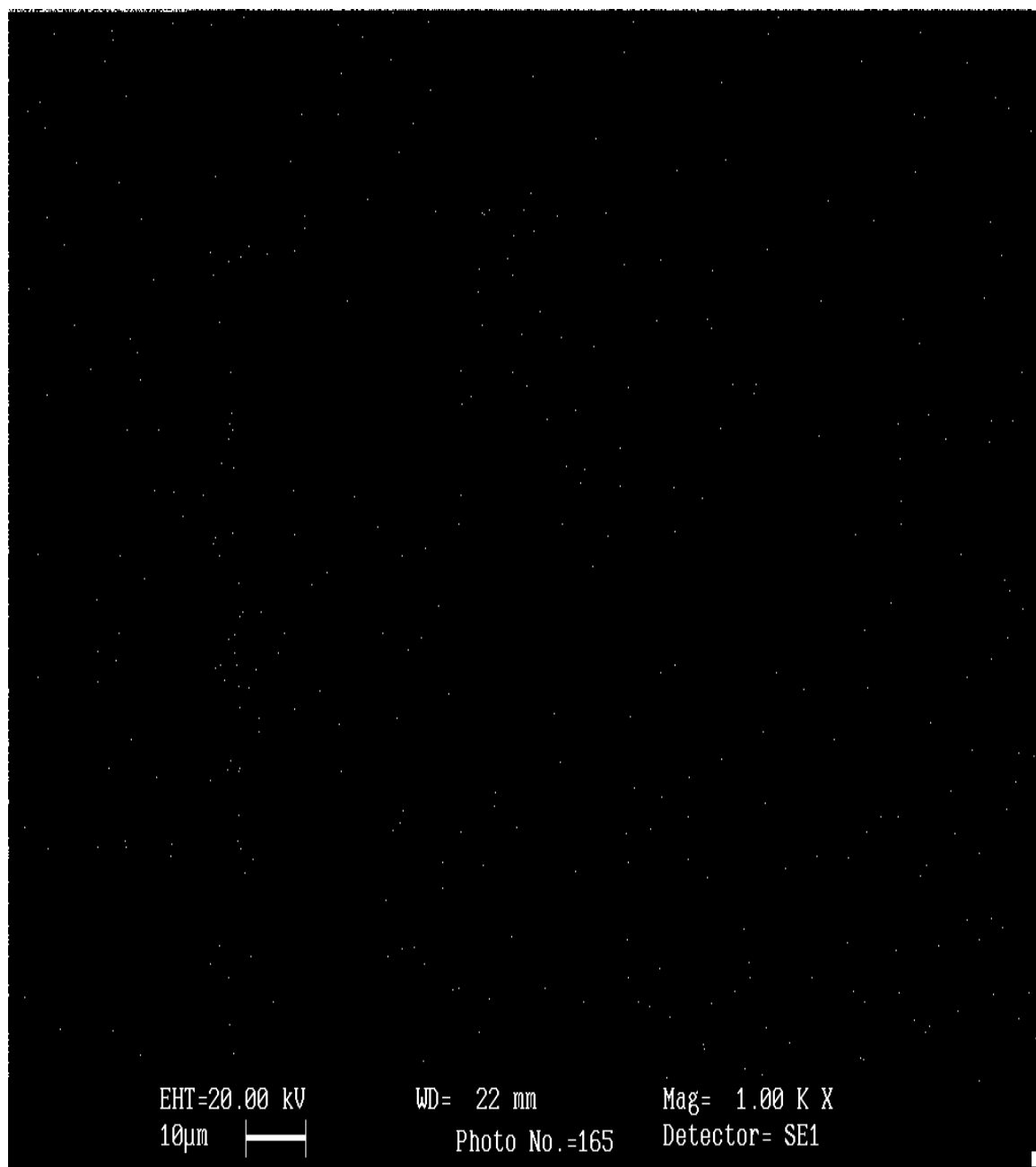


Рисунок 4.41 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения стального образца, изношенного в паре с медным сплавом в глицерине на пути трения 350 м (x1000)

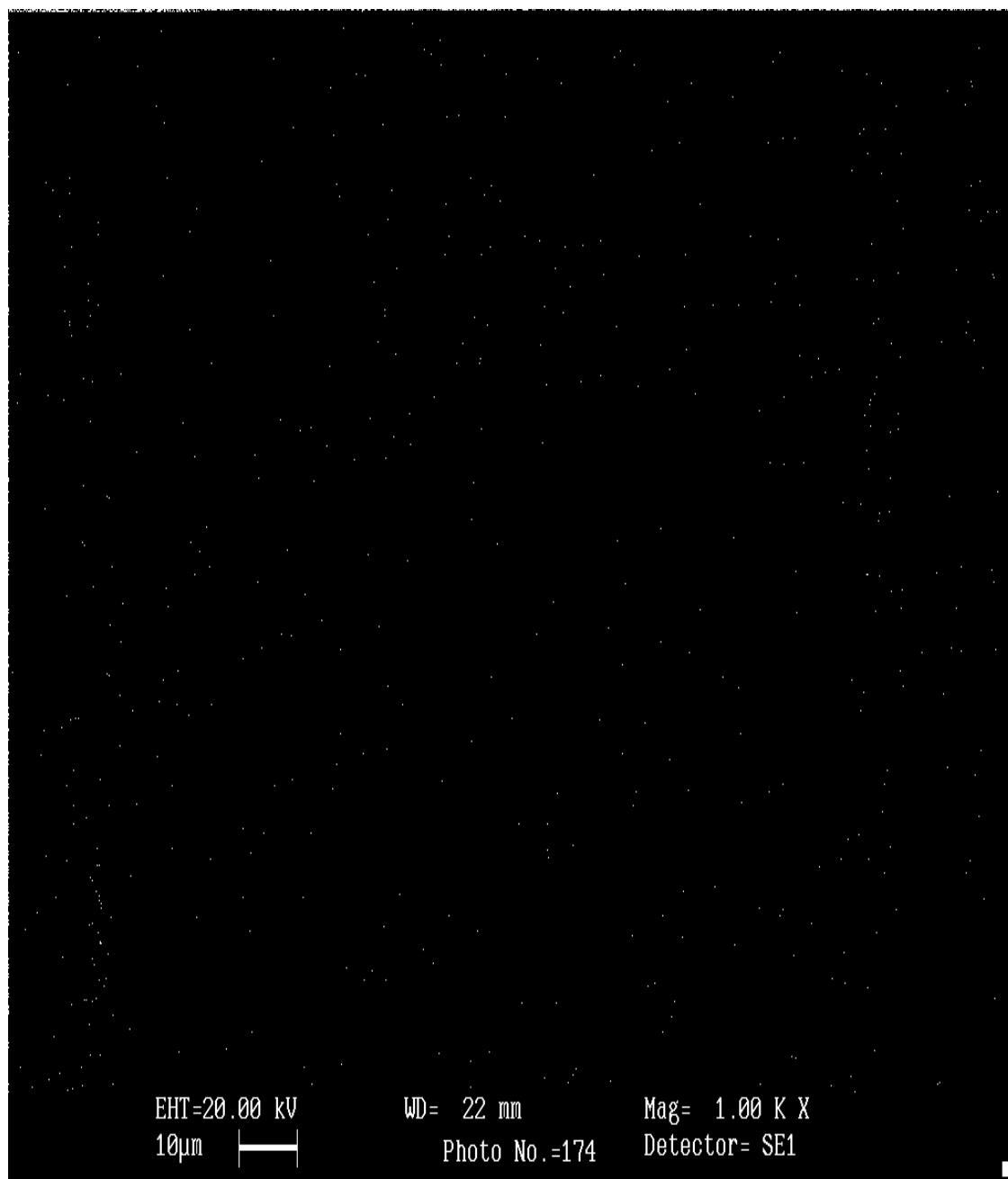


Рисунок 4.42 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения стального образца, изношенного в паре с медным сплавом в глицерине на пути трения 700 м (x1000)

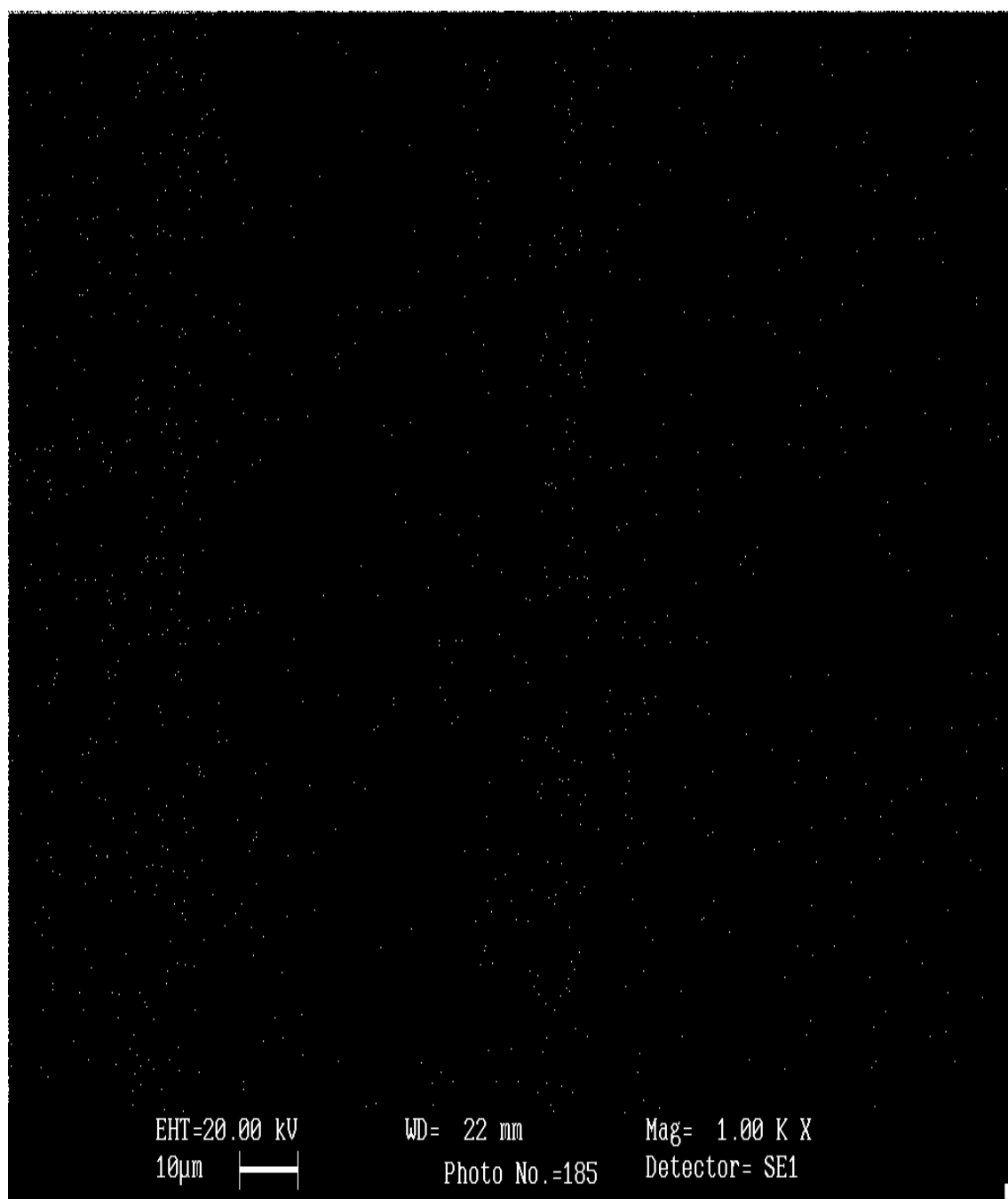


Рисунок 4.43 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения стального образца, работавшего в паре с медным сплавом в глицерине на пути трения 1400 м (x1000)

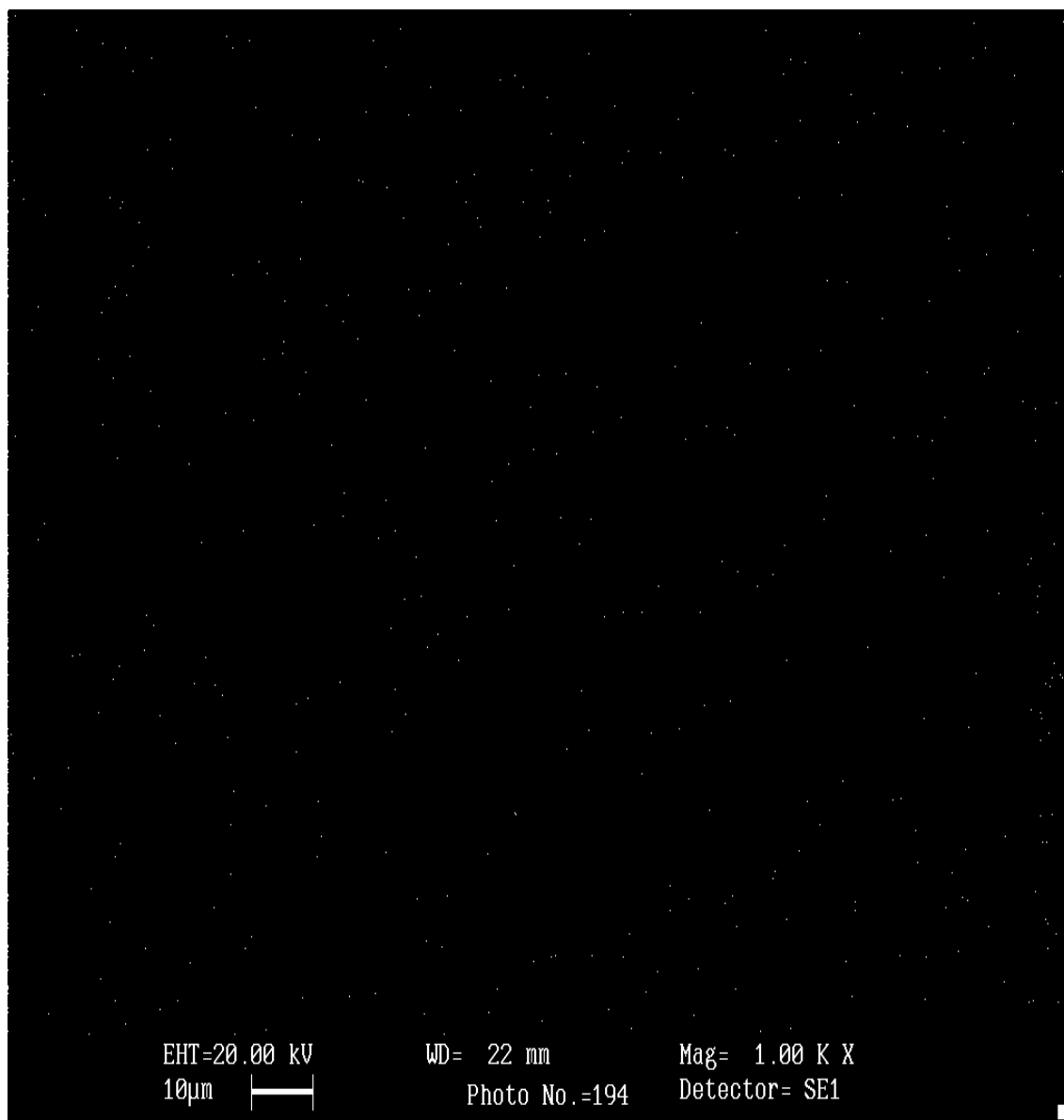


Рисунок 4.44 Рентгеноспектральное распределение меди в зоне трения стального ролика, работавшего в паре с колодкой из сплава Л-63 в глицерине на пути трения 2100 м (x1000)

4. Рентгеноспектральные исследования распределения цинка в зоне трения стального образца на пути трения 70 -2100 м (Рис.4.45 – 4.50)

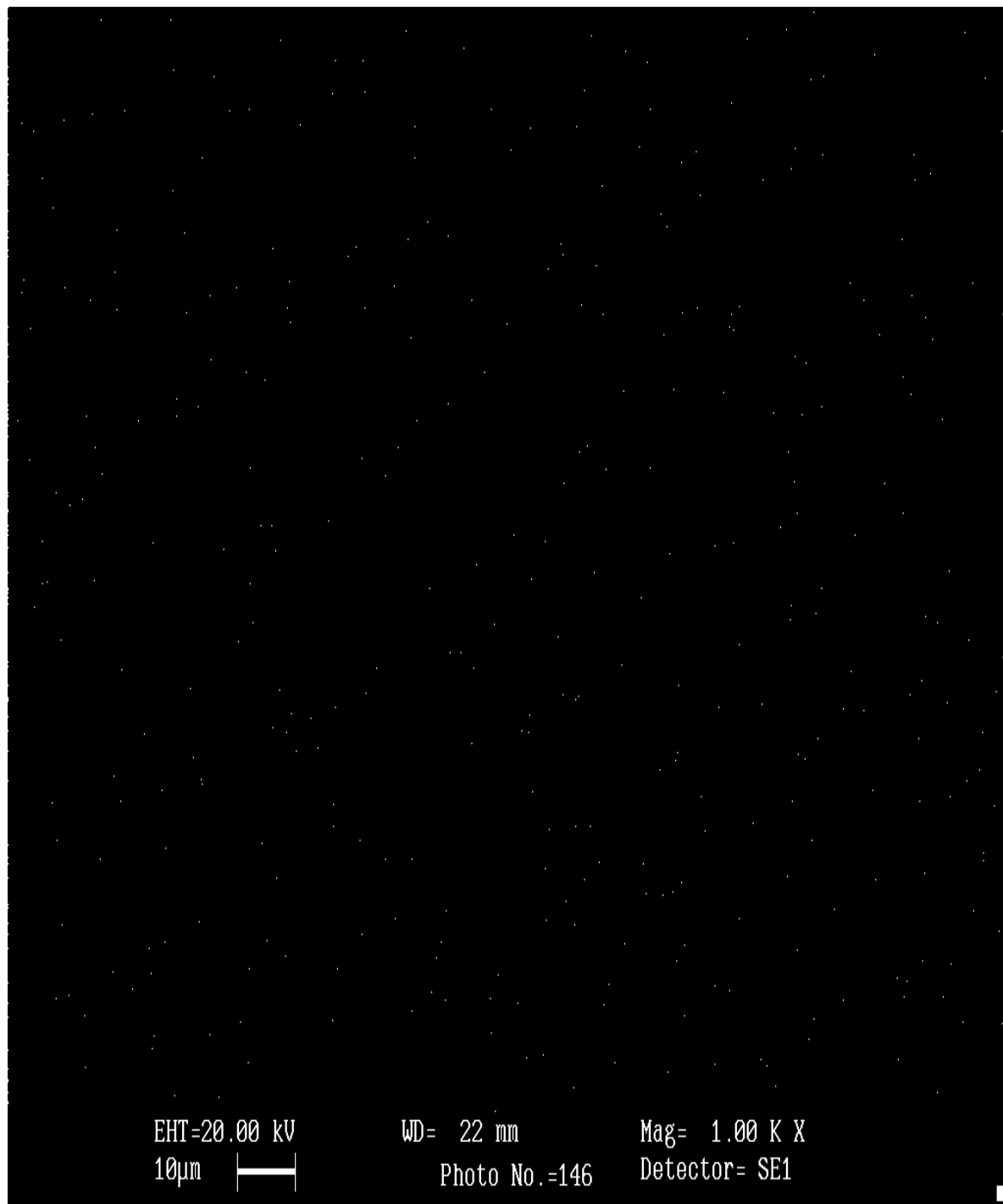


Рисунок 4.45 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения стального образца, изношенного в глицерине в паре с медным сплавом (x1000), путь трения 70 м

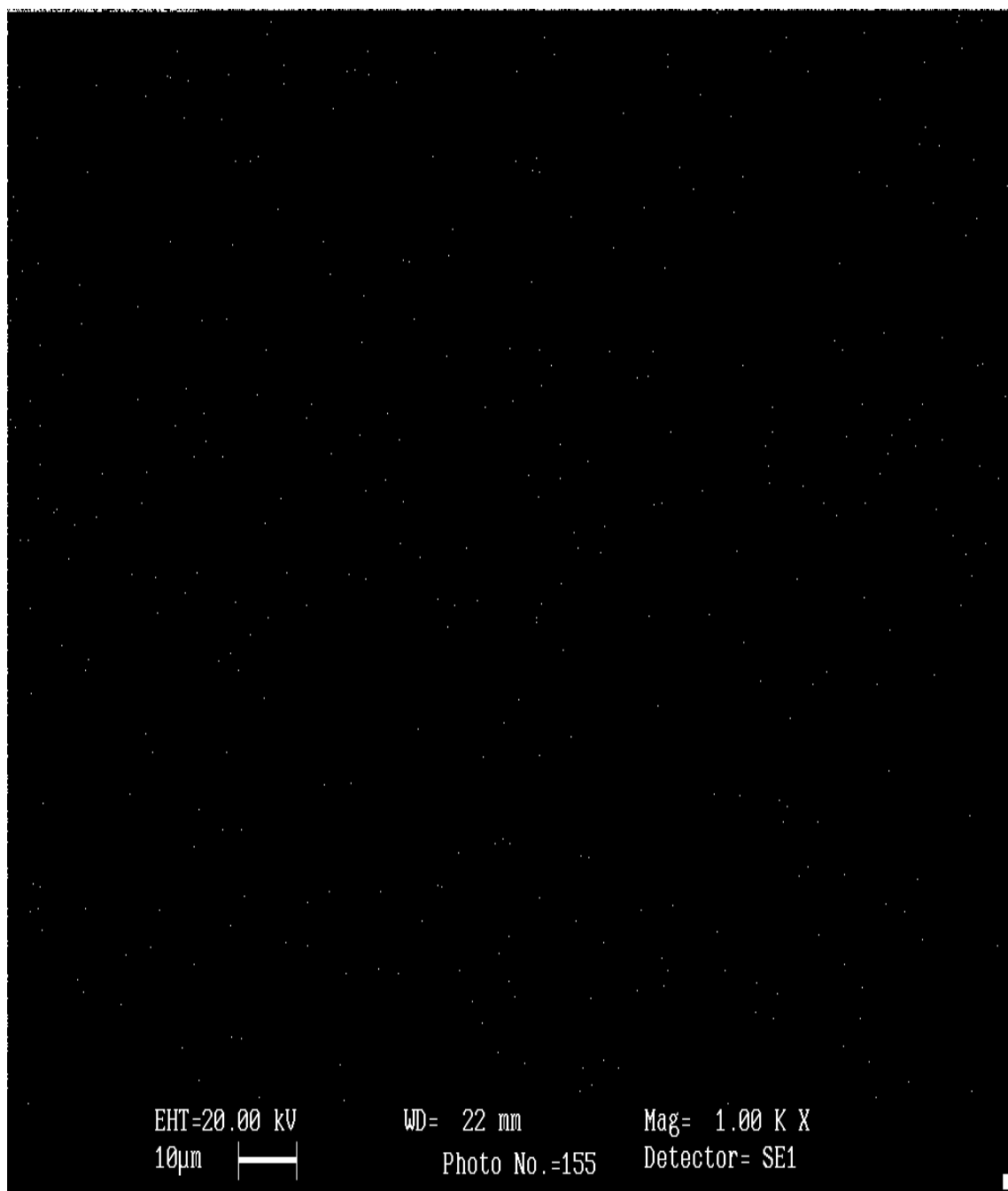


Рисунок 4.46 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения стального образца, изношенного в паре с колодкой из латуни в глицерине на пути трения 210 м (x1000)

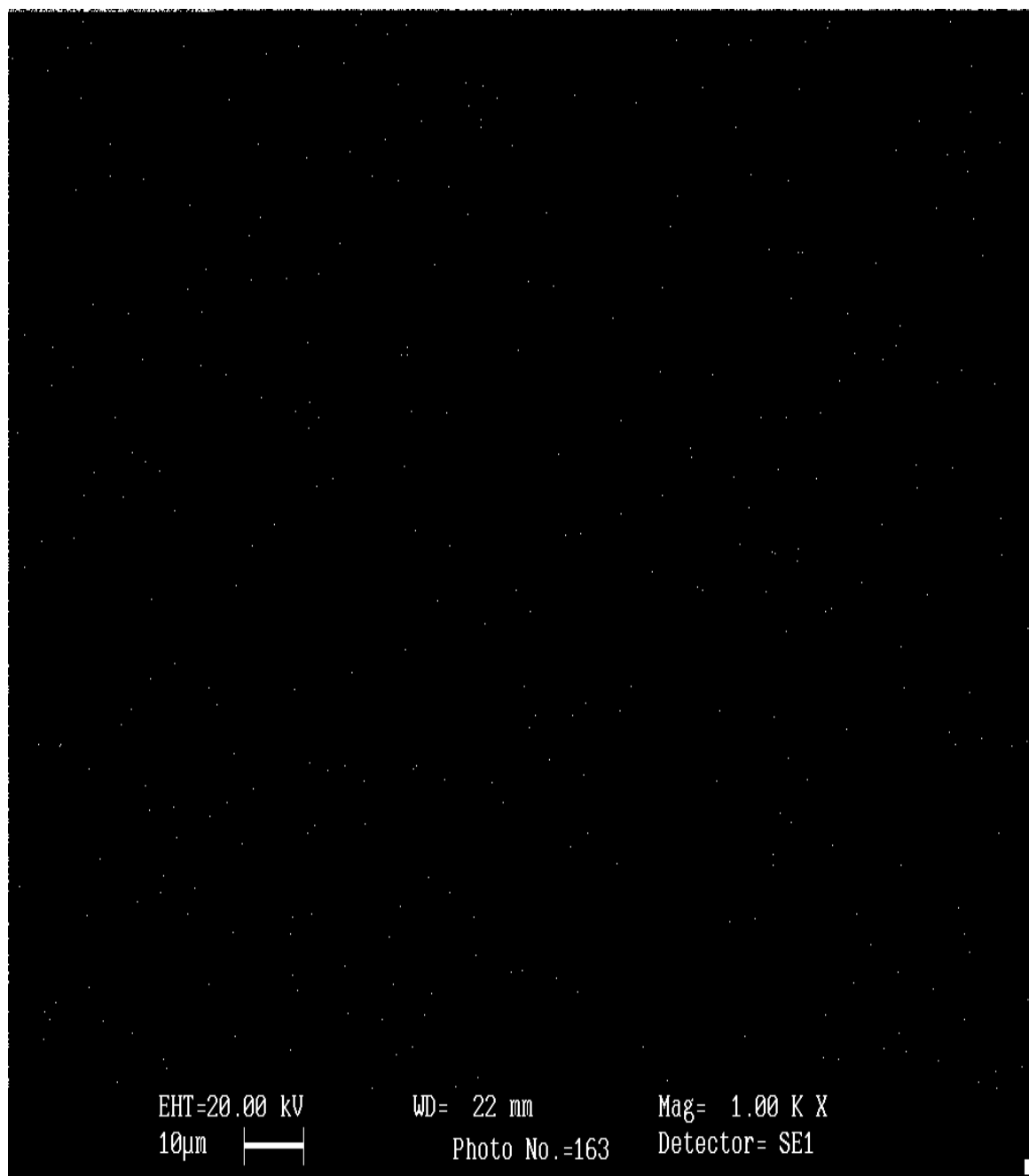


Рисунок 4.47 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения стального образца, работавшего в глицерине в паре с колодкой из сплава Л-63 на пути трения 350 м (x1000)



Рисунок 4.48 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения стального образца, работавшего в паре с медным сплавом на пути трения 700 м в глицерине (x1000)

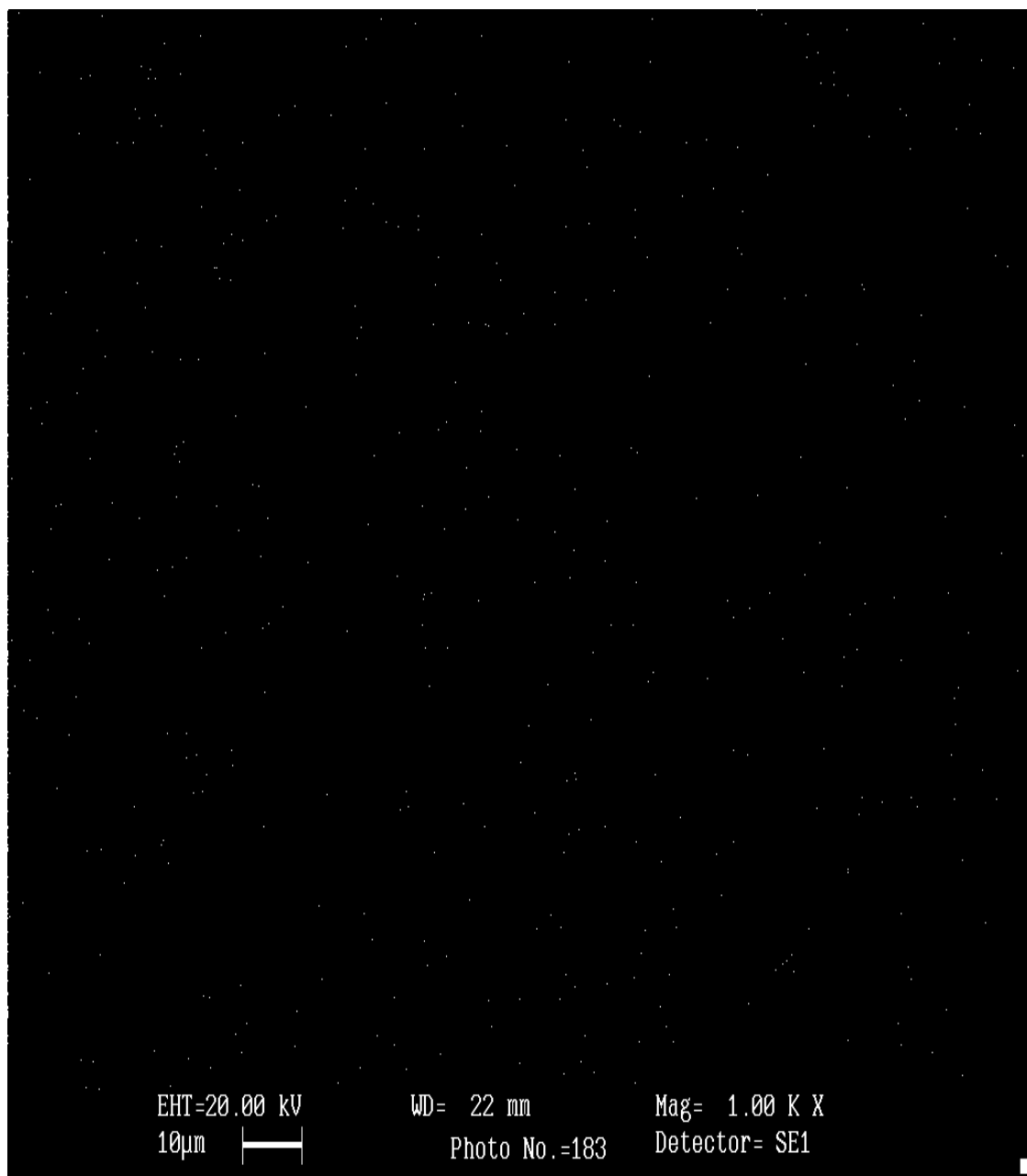


Рисунок 4.49 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения стального ролика, изношенного с колодкой из латуни в глицерине на пути трения 1400 м (x1000)

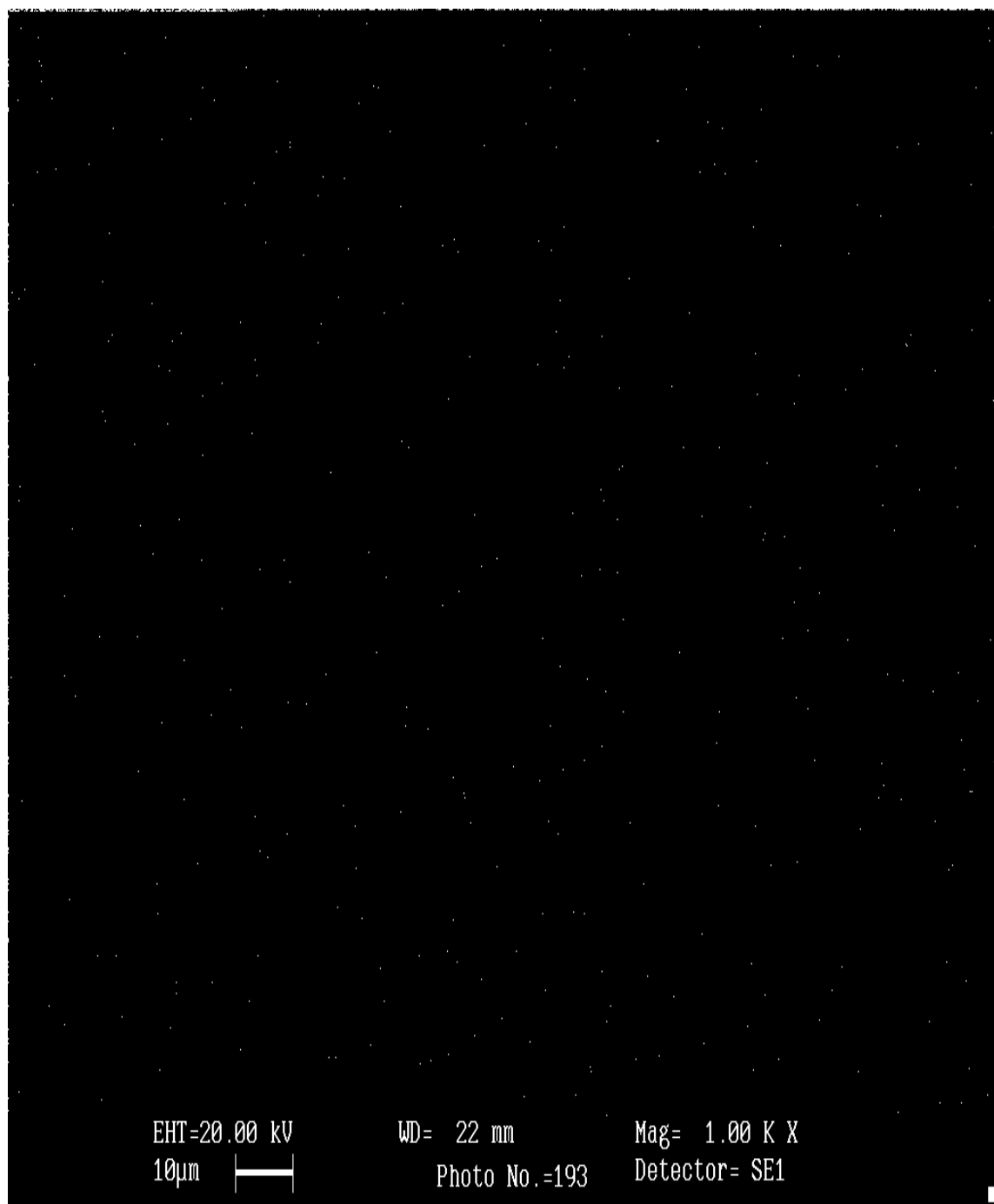


Рисунок 4.50 Рентгеноспектральное распределение цинка в зоне трения стального образца, работавшего в паре с медным сплавом в глицерине на пути трения 2100 м(х1000)

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ОПЫТНЫЙ ЗАВОД СМАЗОК И ОБОРУДОВАНИЯ

450034, г. Уфа, ул. Парижской Коммуны, 38
тел.: (3472) 74-38-89, 74-38-79, 74-38-20

ИНН 0277002833, ОКПО 12698773, ОКОНХ 61124
банк получателя: ОАО "Социнвестбанк", доп. офис "Кировский"
р/с 40702810007250002986, БИК 048073739, к/с 30101810900000000739

Утверждаю

Директор ЗАО «Опытный
завод смазок и оборудования»

Ал.М. Казаков/

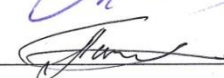
«19» 04 2014г.

АКТ

о передаче научно-технической разработки

Мы, нижеподписавшиеся, представители «Опытного завода смазок и оборудования» заместитель директора ЗАО по производству Казаков Ан.М., главный технолог Голубков А.И. и представители РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина д.т.н., проф. Малышев В.Н. и аспирант кафедры Трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования Пичугин С.Д. составили настоящий акт в том, что в производстве смазочных материалов серии Росойл внедрены, разработанные представителями РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, технологии приготовления композиций смазок, обеспечивающие формирование на поверхностях трения металлсодержащих защитных пленок.

РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

 Малышев В.Н.
 Пичугин С.Д.

ЗАО «ОЗСО»

 Ан.М.Казаков
 А.И.Голубков

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

423816, Татарстан,
г. Набережные Челны, а/я 16087
ИНН 1650114550,
КПП 165001001,
ОГРН 1041616010435
тел./факс: (8552) 44-71-07
тел.: 31-47-48,
e-mail: info@rabika.ru
www.rabika.ru



31.10.2014г.

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО «РАБИКА – энергосбережение»



Н.М. Рагинов

Акт.

Мы, нижеподписавшиеся, сотрудники начальник производства Смирнов В.М., инженер технолог Мельников В.Н., составили настоящий акт, что при выполнении научно-исследовательской работы аспирантом кафедры трибологии и технологии ремонта НГО ФГБОУВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина» Пичугиным С.Д. разработан состав и технология изготовления медесодержащей присадки к смазочным материалам, которые переданы ООО «РАБИКА – энергосбережение» для дальнейшего внедрения на объектах ОАО «КАМАЗ».

Выполненные опытно-промышленные испытания эффективности медесодержащей присадки к турбинному маслу при эксплуатации редукторов на Литейном заводе показали следующие результаты:

Произошло улучшение технико-эксплуатационных показателей работы редукторов. Снижен уровень вибрации в подшипниковых узлах до 19,5% (с 43/319 до 34/256 мкм/град.) в вертикальной плоскости по амплитуде в гармоническом анализе, которая является самым нагруженным сектором при рабочих режимах редуктора.

В подшипниковых узлах на поверхностях контакта сопрягаемых деталей в парах трения «вал-втулка» появилась медьсодержащая пленка, которая уменьшает зазоры, увеличивает площадь контакта сопрягаемых деталей и обеспечивает безыносную и долговечную эксплуатацию узла в присутствии присадки.

Начальник производства

 Смирнов В.М.

Инженер - технолог

 Мельников В.Н.