МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
Кафедра «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы»
(наименование кафедры/департамента/центра полностью)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Современные материалы и технологии их производства
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Сравнительный анализ трибоакустических характеристик легированного латунного сплава ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1 в зависимости от условий термообработки»

Обучающийся Л. П. Кондратьева
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Руководитель к.т.н., доцент, А. В. Святкин
(Ученая степень, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа состоит из: 68 стр., 49 рис., 7 табл., 45 источников.

Исследования трибоакустических характеристик латунных сплавов важны для создания более надежных, эффективных и экологически безопасных материалов и технологий, которые могут ответить на современные вызовы в промышленности.

Данное исследование направлено на установление влияния температуры нагрева и охлаждающих закалочных сред на трибологические свойства многокомпонентного латунного сплава ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1 и их взаимосвязь с показателями акустической эмиссии.

С помощью проведенных исследований были решены следующие задачи:

- Оценили влияние температуры нагрева и охлаждающей способности закалочных сред на микроструктуру и твердость латуней.

- Провели трибологические испытания с использованием метода акустической эмиссии.

- Подобран оптимальный режим термической обработки (ТО) и закалочная охлаждающая среда, повышающая износостойкость латунных сплавов.

В первой главе исследовательской работы была изучена и проанализирована литература, установлено, что на износостойкость латунных сплавов значительное влияние оказывает соотношение α-:β-фазе, значения которой варьируются в зависимости от температуры нагрева под закалку, а так же от охлаждающей способности среды при закалке.

Во второй главе были подобраны методики и оборудование для исследования влияния режимов ТО на эксплуатационные свойства латуни.

Третья глава посвящена анализу полученных результатов. Результаты проведенных исследований предоставили возможность отслеживать изменения

микроструктуры и характеристик сплава под воздействием различных температур и охлаждающей среды. Процессы, происходящие в сплаве во время термической обработки, существенно влияют на его структуру, что, в свою очередь, определяет износостойкость латунного сплава. Было установлено, что формирование метастабильных включений способствует повышению износостойкости на 260 % и увеличению твердости в 2 раза. Так же было установлено, что увеличение количества стабильной α-фазы приводит к снижению коэффициента корреляции.

В заключение были сделаны выводы, что сочетание сдвигового и дисперсионного механизма упрочнения приводит к максимальному упрочнению и сокращению времени процесса старения. Проведенные исследования корреляционной связи между сигналами акустической эмиссии и процессами, проходящими в сплаве в процессе трения, позволили установить, что отклик импульсов акустической эмиссии связан с формированием микроструктуры в процессе термической обработки. Таким образом применение акустической эмиссии позволяет оценить состояние материала и прогнозирование долговечности.

По ходу работы были подготовлены тезисы, которые направлены для опубликования в сборнике докладов «XXII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении».

Содержание

Введение…….. 6
1 Аналитический обзор……. 7
1.1 Механические и эксплуатационные свойства специальных латунных сплавов…… 7
1.2 Влияние легирующих элементом на механические свойства…… 8
1.3 Трибологические свойства латунных сплавов и их связь с параметрами акустической эмиссии……. 10
1.4 Влияние термической обработки и охлаждающей способности закалочных сред на свойства латуней…….. 13
1.5 Формирование цели и задач……..... 16
2 Методики проведения исследований…… 17
2.1 Технические требования на сплав ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1…….. 17
2.2 Определение химического состава……..... 18
2.3 Охлаждающая способность закалочных сред……..……... 19
2.4 Термическая обработка…….. 21
2.5 Анализ микроструктуры…… 23
2.6 Измерение твердости……. 25
2.7 Трибологические испытания……. 26
2.8 Оценка характеристик акустической эмиссии……. 32
2.9 Обработка результатов экспериментов…… 33
3 Результаты исследований и испытаний……... 35
3.1 Химический состав и микроструктура сплава в состоянии поставки……..... 35
3.2 Охлаждающая способность закалочных сред……. 36
3.3 Влияние закалочной охлаждающей среды на величину остаточных напряжений сплава…… 37

3.4 Изменение твердости и микроструктуры в зависимости от охлаждающей среды…….. 38
3.5 Изменение твердости и микроструктуры в зависимости от времени старения……... 43
3.6 Влияние микроструктуры сплава на износостойкость…… 49
3.7 Сигналы акустической эмиссии и их связь с трибологическими показателями……... 52
Заключение…..... 61
Список используемых источников……..... 62
Приложение А Изменение микроструктуры после 4 часов старения…… 68

Введение

С увеличением механических нагрузок на двигатели автомобиля, все больший интерес приобретает исследование материалов, повышающих надежность и долговечность узлов трения машин и механизмов. Так же не следует забывать, что в условиях массового производства деталей, исследуемые материалы должны сочетать в себе такие характеристики, как: обрабатываемость, штампуемость, и иметь высокий коэффициент трения.

Миниатюризация коробок передач привела к увеличению нагрузки на блокирующие кольца синхронизатора. Из-за боковых усилий, действующих на кольца синхронизатора во время переключения передач, возникает пластическая деформация, которая вызывает дополнительные проблемы, такие как затрудненное переключение передач или даже поломка сихронизатора.

Для изготовления данных деталей особое внимание уделяется материалам, сочетающими в себе высокие технологические и эксплуатационные свойства. В рамках данной работы изучен марганцевый латунный сплав ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1 (далее ЛМцАЖКС).

Трибологические испытания специальных латунных сплавов представляют собой важный аспект исследования их поведения при трении. Новые инновации в области легирования и технологии производства могут привести к усовершенствованию уже известных сплавов, а проведение комплексных испытаний в конечном итоге приведет к повышению надежности и долговечности изделий.

Таким образом трибологические испытания с использованием метода акустической эмиссии способны обеспечить глубокое понимание механики трения и процессов износа материалов. Успешное применение данного метода может значительно улучшить работоспособность колец синхронизатора.

1 Аналитический обзор

1.1 Механические и эксплуатационные свойства специальных латунных сплавов

«Специальные латунные сплавы – это многокомпонентные латуни, в состав которых, кроме меди и цинка, входят дополнительные легирующие элементы» [32].

«Данные сплавы обладают такими уникальными эксплуатационными характеристиками, как: высокая пластичность, коррозионная устойчивость и антифрикционными характеристиками» [32].

«Специальные латуни подразделяются на классы по главному легирующему элементу: марганцевые, алюминиевые, кремнистые, оловянные, никелевые, свинцовые» [32].

По данным научной литературы [13, 14, 16, 17, 20, 38] и диаграммы состояния Cu-Zn (рисунок 1) установлено, что «особенностями структуры сплавов на основе латуни является наличие α- и β-фаз. Структурные составляющие матрицы представляют собой α-твердый раствор замещения цинка в меди, имеющий ГЦК-решетку и β-фазу – электронное соединение Cu-Zn, имеющее ОЦК-решетку. В сплаве фаза β присутствует в виде двухфазной (α+β)-структуры, в горячем состоянии (выше температуры 460°С) и в виде двухфазной (α+β’)-структуры в холодном состоянии (ниже температуры 460 °С). Таким образом, прочность сплава в холодном состоянии определяется, в основном, фазой β, которая является заведомо более прочной, чем α-фаза» [13, 14, 16, 17, 20, 38].

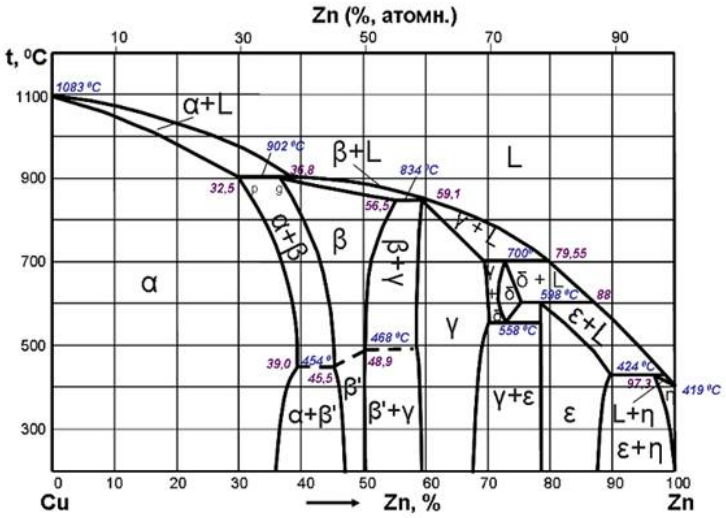


Рисунок 1 – Диаграмма состояния Cu-Zn [14]

1.2 Влияние легирующих элементов на механические свойства

Механические свойства улучшаются легированием сплава такими компонентами как: марганец, железо, алюминий, никель, кремний, свинец.

По изотерме растворимости легирующих элементов (ЛЭ) (рисунок 2) и диаграмме состояния Cu-Zn-Mn_5Si_3 (рисунок 3), видно, что марганец в сочетание с таким ЛЭ, как кремний, образует силициды, что приводит к увеличению прочности, уменьшая размер зерен матрицы [15].

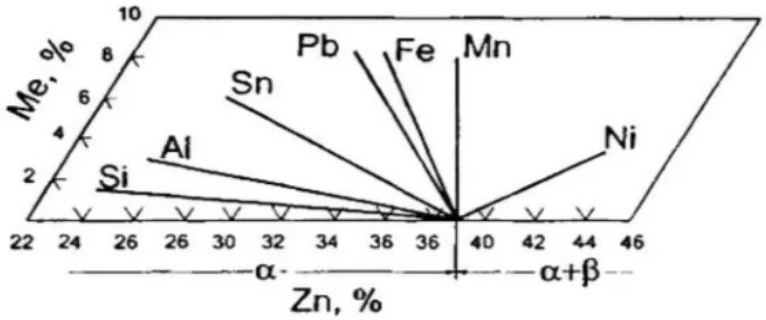


Рисунок 2 – Изотермы растворимости легирующих элементов при температуре 400°С [22]

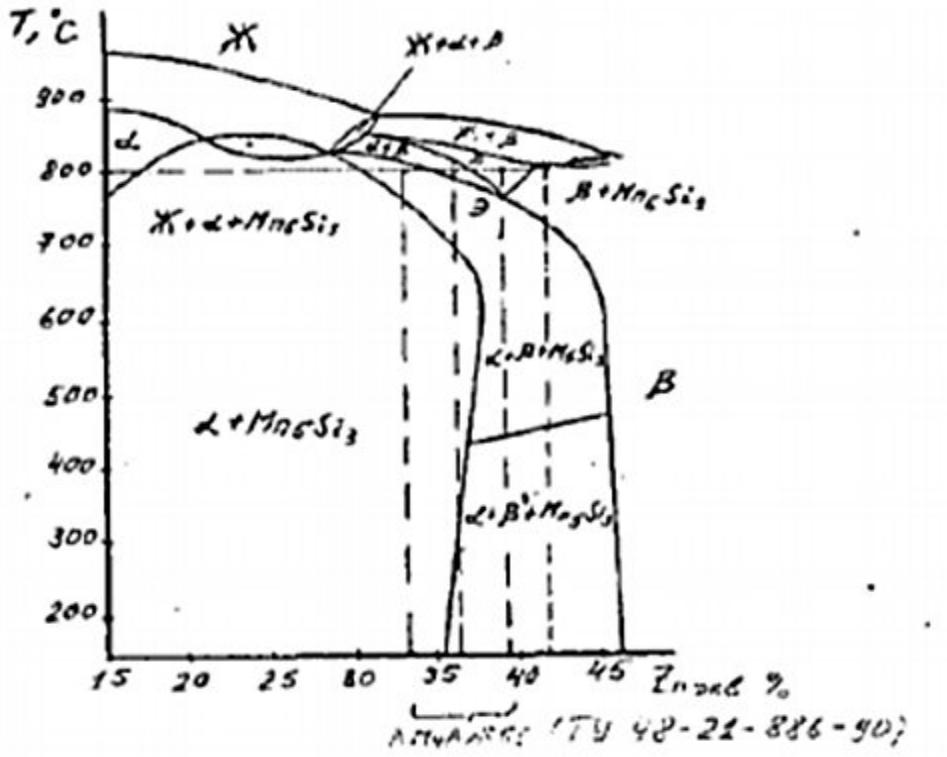


Рисунок 3 – Псевдобинарный политермический разрез системы Cu-Zn-Mn_5Si_3 с постоянным содержанием силицидов [15]

Не задействованный в химическом соединении, марганец повышает временное сопротивление разрыву и пластичность деталей.

Железо совместно с марганцем вступает в химическое соединение с кремнием, образуя силициды. Так же способствует повышению температуры рекристализации.

В ходе исследований, учеными в своей работе [45] установлено, что железо и марганец имеют влияние на формирование форм силицидов. Так формированию округлых частиц способствует наличие железа, а более вытянутых – марганец. Так как кремний имеет ограниченную растворимость в железе и марганце, то увеличение содержания кремния способствует увеличению размера силицидов.

Алюминий, «растворяясь в α-твердом растворе и β-фазе, влияет на температуру их фазовых превращений, повышает временное сопротивление

разрыву» [28], а также способствует образованию на поверхности тонкого, прозрачного, самовосстанавливающегося твердого слоя оксида алюминия (Al_2O_3), повышающего твердость изделий [15].

Свинец ухудшает механические свойства алюминиевых и марганцевых латуней. Однако при содержании в марганцевых латунях до 3% свинец заметного влияния не оказывает, при этом улучшает обрабатываемость резанием и антифрикционные свойства.

Таким образом при выборе марок латунных сплавов не следует забывать, что «увеличение содержания легирующих элементов в сплаве способствует уменьшению содержания цинка в β-фазе» [28].

1.3 Трибологические свойства латунных сплавов и их связь с параметрами акустической эмиссии

«Трибологические свойства – это свойства трибосистем, определяемые их составом и структурой. К ним относятся износостойкость, антифрикционность, теплостойкость, совместимость материалов» [21].

«Антифрикционность характеризует свойство материалов оказывать минимальное сопротивление относительному перемещению элементов системы и оценивается коэффициентом трения» [21].

Износостойкость при трибологических испытаниях определяется отношением значения износа к обусловленному пути, на котором происходит изнашивание [21].

«Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Может выражаться в единицах длины, объема, массы» [30].

«Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров или формы тела» [30].

В работе [18] установлено, «что для обеспечения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых медных сплавов при трении в поверхностно-активной смазочной среде, предпочтительна гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока в зоне контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений и формирования новых фаз» [18]. А также определена связь с концентрацией цинка и интенсивностью изнашивания. «Для сплавов, состав которых соответствует области концентраций от 3 до 30 мас. % Zn, интенсивность изнашивания снижается с ростом нагрузки. Это свойство является отличительным признаком эффекта избирательного переноса, поэтому дает наилучший результат при эксплуатации тяжелонагруженных узлов» [18].

Для повышения трибологических свойств латунных сплавов в MITSUBISHI MATERIALS CORP был разработан сплав, содержащий 58-66 мас. % Cu; 1,6-7 мас. % Mn; 0,2-6 мас. % Ni; 0,2-5,1 мас. % AI; 0,1-3 мас. % Si; ≤ 1,5 мас. % Fe; ≤ 0,5 мас. % Sn; ≤ 0,5 мас. % Pb; и остальное Zn вместе с неизбежными примесями. Данный сплав обладает высокой прочностью, улучшенной абразивной стойкостью при фрикционной нагрузке, и хорошими свойствами при работе без смазки, благодаря образованию интерметаллических фаз из преимущественно Mn-силицидов, выполняющих функцию защиты матрицы от силы, создающей износ и размером зерна β-фазы или матрицы с преобладанием β-фазы, составляющим от 100 до 300 мкм [27].

Однако, исследовав морфологические особенности элипсообразных силицидов в интервале температур 750…830°С, Святкин А.В., Грызунова Н.Н., Гнусина А.М. установили, что «в следствии диффузионных процессов возрастает концентрация алюминия, которая приводит к обеднению прилегающих участков матрицы и сопровождается потерей когерентной связи между силицидом и матрицей» [33]. По мнению авторов это «может способствовать снижению

прочностных характеристик сплава» [33].

Так же ученые Б. Реетц, Г. Гуммерт, Т. Плетт, в своей работе [26], обратили внимание, что специально разработанный латунный сплав [27], обладает таким недостатком, как уменьшение прочности в процессе термической релаксации. Ими был создан и запатентован специальный латунный сплав, содержащего, мас.%: от 62,5 до 65 Cu, от 2,0 до 2,4 Mn, от 0,7 до 0,9 Ni, от 1,9 до 2,3 Al, от 0,35 до 0,65 Si, от 0,3 до 0,6 Fe, от 0,18 до 0,4 Sn и Cr, либо отдельно, либо в совокупности, ≤ 0,1 Pb, остальное – Zn и неизбежные примеси, который характеризуется очень однородной и мелкозернистой микроструктурой. Средний размер зерна составляет от 40 до 150 мкм. Так же данный латунный сплав имеет «α-β структуру, в которой α-фаза заключена в виде решетки или полосы в β-фазе или пронизывает указанную фазу. Частицы α-фазы таким образом соединяют зерна β-матрицы, в результате чего сеть зерен остается интенсивно взаимно пронизанной α-фазой и таким образом сохраняется даже в случае напряжений холодного формования. Структура сплава с долей α-фазы меньше 10%, содержит β-фазу, которая преобладает в значительной степени и в которой α-фаза в большей степени расположена в области границ зерен или в пределах β-фазы. Поэтому этот новый сплав не восприимчив к зернограничному растрескиванию во время холодного формования. Кроме того, когда такие изделия из специальной латуни используют при высоких температурах или под воздействием температурных колебаний, уменьшения прочности избегают или значительно уменьшают благодаря достигнутым мелким размерам зерен. Эти положительные свойства износостойкости изделия, полученного из этого латунного сплава, уже отражаются на твердости. После экструзионного формования, полуфабрикат имеет твердость между 135 и 145 HB. Посредством тепловой обработки после образования, твердость может быть увеличена до значений более 160 HB» [26].

«В контексте диагностики износа акустическая эмиссия позволяет оценить степень износа в узлах трения механизмов» [1].

«Акустическая эмиссия (АЭ) – метод диагностики износа, основанный на явлении возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) в различных процессах, например, при деформации напряженного материала» [1].

Исследования трибоакустических характеристик латунных сплавов на данный момент не проводились. Однако, при изучении возникновения и распространения упругих колебаний в различных металлических поверхностях, учеными в своих работах [9, 23, 29, 40,] установлена «связь низкочастотных волн АЭ с явлением отрыва частиц от поверхностей, подвергающихся силовому воздействию. Сигналы с более высокими частотами связывают с ударным взаимодействием микровыступов контактирующих поверхностей, с процессами разрушения фрикционных связей, с образованием и развитием трещин в поверхностных слоях» [9, 23, 29, 40].

Таким образом установление связи трибологических характеристик с параметрами АЭ является перспективным направлением для изучения кинетики процессов, связанных с микродеформацией материалов, дислокационным зарождением и накоплением микронесплошностей.

1.4 Влияние термической обработки и охлаждающей способности закалочных сред на свойства латуней

Для (α+β)-латуней, при нагреве которых происходит фазовая перекристаллизация, скорость охлаждения при отжиге имеют решающее значение для формирования структуры и свойств латуни. Понимание этих процессов позволяет разработать более эффективные методы обработки латуни, что в свою очередь приводит к созданию более высококачественных материалов.

Изучив температурные интервалы фазовых превращений (рисунок 4), можно сделать вывод, что наиболее оптимальная температура нагрева под закалку находится в интервале температур 700…850^{o}C. Однако, уменьшение температуры

приводит к уменьшению количества β-фазы. Изучив работу [15], установлено, «что режим термической обработки с температурой нагрева под закалку 800 °С позволяет увеличить износостойкость деталей до 2 раз» [15]. Результаты исследований [16] показывают, что повышение температуры до 800 °С и выше способствует растворению силицидов и увеличивает вероятность их выкрашивания в процессе работы.

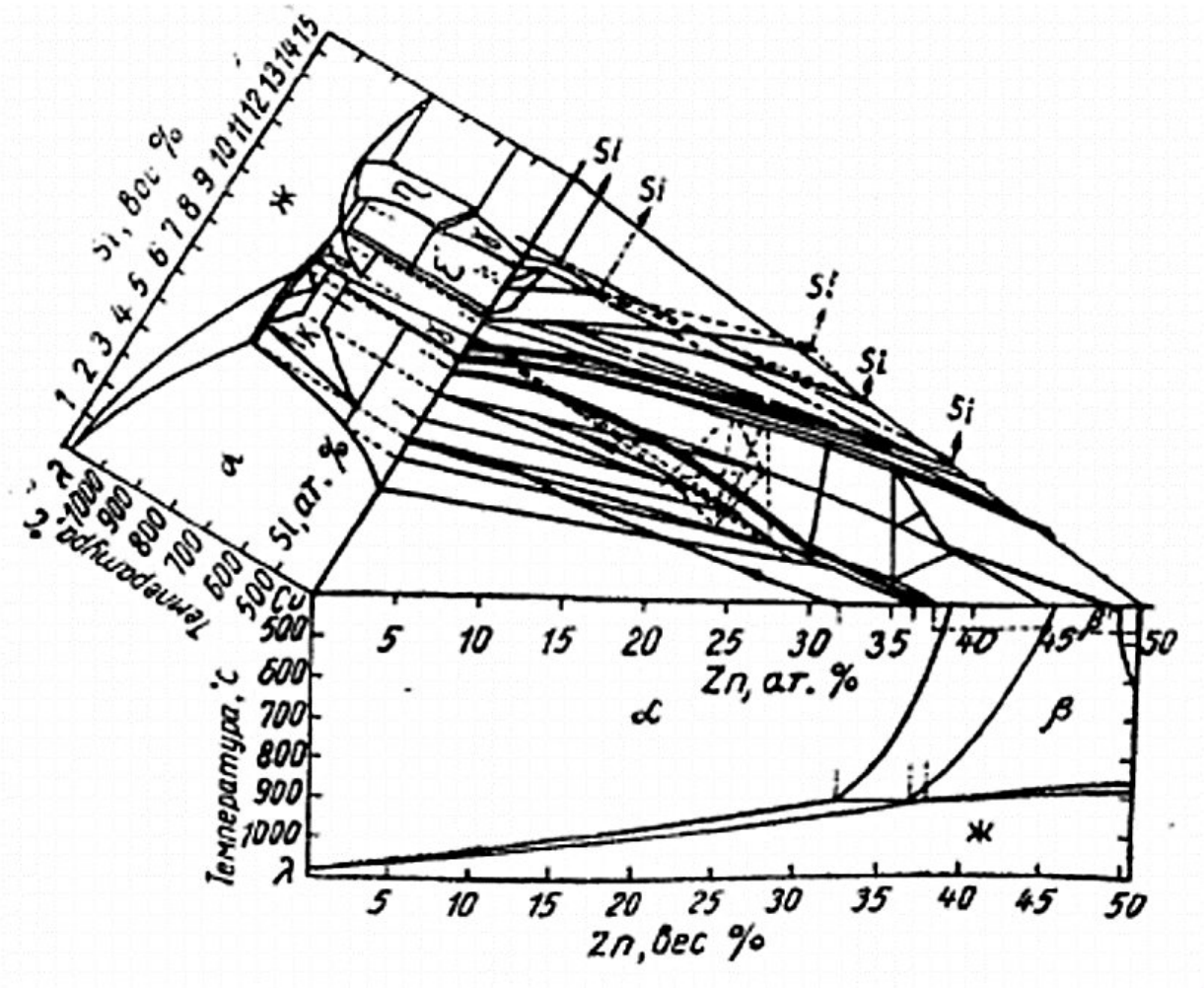


Рисунок 4 – Часть диаграммы равновесия Cu-Zn-Si [3]

Так же в своей работе [4] Супрун Е.В., экспериментальным путем установила, что «с понижением охлаждающей способности среды при закалке структура латуни становится более крупнозернистой» [4]. Так же было установлено, что при большей

охлаждающей способности среды возрастает количество β¢-фазы, тем самым повышая твердость латуней. Однако, при термическом воздействии на латунные сплавы в результате быстрого охлаждения, возникают внутренние остаточные напряжения, которые, в условиях влажной атмосферы, снижают механические свойства из-за склонности к самопроизвольному растрескиванию и вызывают поводку и коробление изделий.

Изучив разнообразие закалочных сред, установлено, что данные охлаждающие жидкости должны отличаться друг от друга по охлаждающей способности, которую можно будет контролировать и изменять в заданных пределах, что позволит сделать технологический процесс термообработки более гибкими по стоимости, технологичности и другим качествам. На предприятии АО «АВТОВАЗ» применяются водополимерные охлаждающие жидкости на основе полиаклиленгликоля. Опыт промышленного использования водорастворимых полимеров в качестве закалочных сред при объемной закалке деталей машин показывает, что основным преимуществом водополимерных растворов перед маслом является их пожаробезопасность и меньшая себестоимость эксплуатации. «Преимуществом данных жидкостей является пленка, образующаяся на поверхности охлаждаемого металла, стабилизируя паровую рубашку и в конце охлаждения оседает на поверхность детали, тем самым замедляя скорость охлаждения в нижнем (мартенситном) интервале температур. Следовательно, с изменением концентрации компонентов закалочных сред на основе водорастворимых полимеров можно подобрать для деталей такие скорости охлаждения, которые обеспечивают необходимую прокаливаемость, твердость и другие характеристики механических свойств» [12, 34] - [26].

Высокая скорость охлаждения может вызвать значительные остаточные напряжения в микроструктуре материала, что в дальнейшем может привести к ухудшению механических свойств. Для снятия внутренних напряжений и сохранении наклепа, латунные детали подвергают низкотемпературному отжигу

при 200…350°С. Отжиг позволяет перераспределить дислокации в кристаллической решетке, что способствует улучшению пластичности материала.

1.5 Формирование цели и задач

Оптимизация механических свойств латунных сплавов может значительно улучшить производственные процессы, повысить надежность изделий и улучшить их эксплуатационные характеристики. При изучении механических свойств, установлено, что латунь обладает высоким модулем упругости, что способствует эффективной передачи механических колебаний.

В связи с этим в данной работе установлена цель – определение взаимосвязи показателей АЭ с трибологическими свойствами легированной латуни ЛМцЖКС.

Для достижения данной цели был установлен ряд следующих задач:

1. Подобрать режимы термической обработки (ТО) и закалочные охлаждающие среды, обеспечивающие различное состояние сплава.

2. Оценить влияние охлаждающей способности закалочных сред на микроструктуру и твердость латуней.

3. Провести триботехнические испытания с использованием метода акустической эмиссии в различном состоянии.

4. Оценить наличие связи между трибологическими и акустическими показателями.

Изучив научную литературу по теме: «Износостойкость латунных сплавов», установлено, что на износостойкость латунных сплавов значительное влияние оказывает соотношение α-:β-фазе, значения которой варьируются в зависимости от температуры нагрева под закалку, а так же от охлаждающей способности среды при закалке.

2 Методики проведения исследования

Определение трибоакустических характеристик латунных сплавов требует комплексного подхода, включающего как экспериментальные, так и численные методы. Использование этих методик позволяет получить подробную информацию о поведении материалов в условиях трения, что, в свою очередь, помогает в их дальнейшей оптимизации процессов.

2.1 Технические требования на сплав ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1

Согласно требованиям [39] предъявляемым к изготовлению трубы для колец синхронизатора:

- микроструктура должна состоять из зерен α-фазы не менее 50 %, (α + β/)-фазы, и равномерно распределенных интерметаллидов не менее 8 %;
- твердостью не менее 80 HRB;
- химический состав должен соответствовать требованиям, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав латунного сплава марки ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1

Размер труб, мм	Химический состав, %									
	Основные компоненты							Примеси, не более		
67,5 х 53,7	Cu	Mn	Al	Fe	Si	Pb	Zn	Sn	Ni	всего
	69,5-71,5	6,5-7,5	5,0-6,0	1,4-2,4	1,7-2,5	0,6-1,2	Ост.	0,1	0,1	0,5

Определение величины остаточных тангенциальных напряжений после термической обработки (ТО) определяется по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = \pm \left[\frac{E \cdot t \cdot \Delta\varphi}{\left(1 - \mu^2\right) \cdot \pi D_{ср}^2} \right] \text{ Мпа } \left(\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}\right) \quad (1)$$

где Е – модуль нормальной упругости материала трубы, $E = 1{,}05 \cdot 10^5$ МПа

t – толщина стенки, мм

Δφ – величина образовавшегося зазора за вычетом толщины режущего инструмента, мм

μ – коэффициент Пуассона, μ = 0,37

$$D_{ср} = \frac{D_{в} + D_{н}}{2} \quad (2)$$

$D_{ср}$ – средний диаметр трубы до разрезки, мм

2.2 Определение химического состава

Уменьшение или увеличение легирующих компонентов приводит к изменению эксплуатационных свойств. В связи с этим первым этапом необходимо провести анализ химического состава на соответствие предъявленным требованиям.

Химический состав был определен в соответствии требованиям ГОСТ 9716.1-79 [8] с помощью спектрометра OBLF QSN750-II (рисунок 5). Преимущество данного спектрометра «заключается в наличии системы регистрации данных, основанной на разработанной OBLF GISS-технологии (Gated Integration of Single Sparks – Стробируемого Интегрирования Единичных Искр).

Рисунок 5 – Общий вид спектрометра OBLF QSN750-II [44]

Это позволяет достичь суперизких пределов обнаружения при анализе примесей в металлах. Спектрометрия единичных искр (или PDA – pulse distributed analysis – анализ распределения импульса) предоставляет необходимую информацию о микроскопическом составе образца, о гомогенности пробы, о количестве растворённого и нерастворённого компонента» [44].

2.3 Охлаждающая способность закалочных сред

В работе [8] показано увеличение износостойкости колец синхронизаторов при закалке в воду в интервале температур 750…800◦ С и отсутствие эффекта при закалке от 700◦ С. Известно, что для сплава ЛМцАЖКС 710◦ С является критической точкой перехода из твердого раствора в однофазное β-состояние [23]. Таким образом, заметного увеличения износостойкости (a+β)-латуни можно добиться только закалкой из однофазной области. Однако при значительном увеличении твердости снижается способность к обработке лезвийным инструментом, что сказывается на качестве поверхности обработанных деталей и

стойкости режущего инструмента. Препятствием для технологического применения закалки в воде являются значительные коробления изделий, возникающие в процессе обработки.

В этой связи целью настоящего исследования является поиск альтернативных охлаждающих сред, способствующих снижению деформаций в процессе закалки, обеспечивая сохранение высокой твердости материалов.

В качестве альтернативной охлаждающей среды было решено использовать закалочное масло МЗМ-26 и водополимерные растворы с инверсной растворимостью на основе полиаклиленгликоля [10]. Основным преимуществом водополимерных растворв перед маслом является их пожаробезопасность и меньшая себестоимость эксплуатации. Технологический расход рабочего раствора на одну закаливаемую деталь меньше, чем расход масла [25].

Охлаждающую способность закалочных сред определяли по ISO 9950 [43] с помощью прибора IVF Smartquench. (рисунок 6).

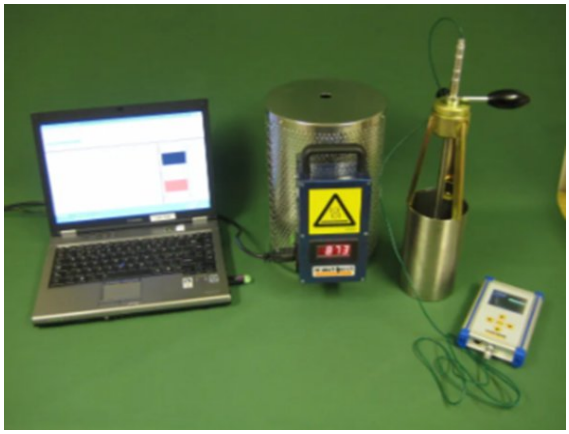


Рисунок 6 – Общий вид прибора ivf SmartQuench [42]

«IVF SmartQuench – новая система для тестирования и оценки закалочных сред и закалочных систем. Система имеет три основные особенности: небольшой ручной блок сбора данных, передовое компьютерное программное обеспечение и беспроводную передачу данных между блоком сбора данных и компьютером.

Конструкция системы облегчает тестирование на месте в закалочных ваннах, а также в лаборатории. Программное обеспечение является мощным, удобным и гибким и позволяет пользователю оценивать кривые охлаждения во многих отношениях» [42].

2.4 Термическая обработка

Как показано в работе [8], увеличению износостойкости колец синхронизаторов при закалке в воду способствует нагрев в интервале температур 750…800◦ С и отсутствие эффекта при закалке от 700◦ С. Известно, что для сплава ЛМцАЖКС 710◦ С является критической точкой перехода из твердого раствора в однофазное β-состояние [23]. Таким образом, заметного увеличения износостойкости (a+β)-латуни можно добиться только закалкой из однофазной области. Однако повышение температуры до 800◦ С и выше способствует растворению силицидов [16] и увеличивает вероятность их выкрашивания в процессе работы.

В связи с этим были подобраны режимы ТО, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Режим термической обработки образцов, изготовленных из ЛМцАЖКС

№ режима	Нагрев °С, закалочная среда	Старение
1	750°С, воздух	Без старения
2	750°С, вода	Без старения
3	750°С, 5 % водополимерный раствор	Без старения
4	750°С, 10 % водополимерный раствор	Без старения
5	750°С, 15 % водополимерный раствор	Без старения
6	750°С, масло	Без старения
7	750°С, воздух	1 час
8	750°С, воздух	2 часа

Продолжение таблицы 2

№ режима	Нагрев °С, закалочная среда	Старение
9	750°С, воздух	3 часа
10	750°С, воздух	3,5 часа
11	750°С, воздух	4 часа
12	750°С, вода	1 час
13	750°С, вода	2 часа
14	750°С, вода	3 часа
15	750°С, вода	3,5 часа
16	750°С, вода	4 часа
17	800°С, 10 % водополимерный раствор	1 час
18	800°С, 10 % водополимерный раствор	2 часа
19	800°С, 10 % водополимерный раствор	3 часа
20	800°С, 10 % водополимерный раствор	3,5 часа
21	800°С, 10 % водополимерный раствор	4 часа
22	750°С, 10 % водополимерный раствор	4 часа

Нагрев под закалку и старение проводили с помощью муфельной печи «Термокерамика» (рисунок 7)

Рисунок 7 – Муфельная печь «Термокерамика»

Для проведения серий экспериментов были подготовлены:

– 44 образца размерами 20х12х7 мм, для определения влияния различных режимов ТО на микроструктуру и твердость;

– для определения остаточных тангенциальных напряжений после закалки от трубы 68х55 мм отрезали 4 кольцевые заготовки высотой 12 мм;

– для определения изменения объемного износа в зависимости от режима ТО, подготовили 3 образца в исходном состоянии и 15 образцов с различными режимами ТО размером 13х20х3 мм.

2.5 Анализ микроструктуры

Оценку микроструктуры на всех этапах исследования проводили с помощью оптического микроскопа Olimpus GX51 и автоматизированной системы анализа изображений SIAMS 800 (рисунок 8). Анализатор SIAMS 800 на базе оптического микроскопа предназначен для автоматизированного количественного анализа структуры материалов.

Рисунок 8 - Инвертированный микроскоп Olympus GX51 [2]

Преимущества автоматизированной системы анализа изображений SIAMS 800 заключаются в:

– построение панорамных изображений в режиме сканирования микрошлифа без остановок между кадрами и без ограничений по размеру;

– съемка отдельных кадров и галерей для пакетной обработки;

– визуализация панорам по технологии пирамиды разрешений;

– автофокусировка;

– автоматическое выравнивание неравномерности освещенности;

– экспресс-оценка микроструктуры во время съемки;

– сетевое хранилище для изображений и результатов анализов удобными инструментами поиска и фильтрации;

– аннотирование объектов на изображении;

– измерения параметров структуры (длин, диаметров, площадей, углов, расстояний между кривыми);

– построение отчетов по измерениям;

– построение профиля интенсивности по заданной линии;

– построение 3D поверхности поля зрения без моторизованного привода фокусировки;

– автоматизированный анализ структуры в соответствии с российскими и международными стандартами;

– возможность работы в локальной сети предприятия с управляемым распределенным доступом [2].

Так как структурные составляющие матрицы представляют собой α-твердый раствор - большие угловатые зерна и (α+β’)-структура, которая состоит из белых кристаллов α-фазы дендридного вида на фоне темной β-фазы (из-за разности стехиометрического соотношения элементов), то оценку структуры проводили по ГОСТ 8233 [7].

Работа по подготовке шлифов проводилась в соответствии с СТО 83120.0050−2024 [36].

Для анализа микроструктуры цветных металлов использовали травитель согласно инструкции [37] – $FeCl_3$ + HCl + H_2O.

Для определения влияния микроструктуры на износостойкость сплава использовали сканирующий электронный микроскоп Ziess EVO 18 (рисунок 9).

Рисунок 9 - Сканирующий электронный микроскоп Ziess EVO 18 18 [11]

Сканирующий электронный микроскоп EVO 18 предназначен для измерений линейных размеров микрорельефа твердотельных структур.

Особенности микроскопа:

– диапазон измерений: от 0,463 до 100 000 мкм;
– диапазон показаний: от 0,020 до 2 000 000 мкм;
– пределы допускаемой относительной погрешности измерений: ±5%;
– диапазон регулирования увеличения: от 5 до 106 крат [11].

2.6 Измерение твердости

Контроль твердости проводили методом Виккерса по ГОСТ 2999-75 [5] с нагрузкой 10 килограмм (HV10) микротвердомером KB10S (рисунок 10). Данный прибор обладает такими необходимыми функциями для качественных измерений как: видео-визуализация измерений, автоматическая статистическая обработка результатов, сохранение и протоколирование результатов и режимов работы.

Рисунок 10 – Микротвердомер KB10S [24]

Так же микротвердомер комплектуется турелью объективов и инденторов, прибор автоматически выберет и установит нужный индентор, переместит для измерения нужный объектив, благодаря чему можно произвести измерения твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса, Микро-Виккерса и Бринелля [24].

2.7 Трибологические испытания

Для определения трибологических характеристик использовали трибометр Nanovea TRB 50N (рисунок 11). Данный трибометр позволяет: провести оценку совместимости материалов пар трения; определить предельные силовые и тепловые

нагрузки; установить критические точки, после которых наблюдается заметное изменение силы трения или уменьшение износостойкости [31].

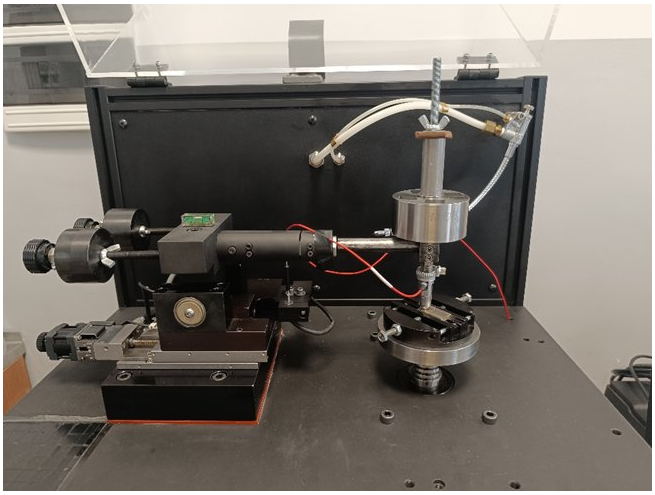


Рисунок 11 – Трибометр Nanovea TRB 50N

Определение износа латунных сплавов во время скольжения с использованием штифтодисковой машины проводили согласно стандарту ASTM G99 [41] по вращательной схеме «палец-диск».

При определении износостойкости с помощью трибометра Nanovea TRB 50N были применены параметры, представленные в таблице 3.

Таблица 3 - Параметры проведения испытания на износ

Номинальная нагрузка на индентор, Н	Радиус трения, мм	Диаметр штифта, мм	Частота вращения шпинделя, об/мин	Дистанция, м	Условия смазки
10	4	6,35	300	100	Сухое трение

Оценка повреждения инденторов и измерение объема потерянного металла образцов проводили по 3D-сканам, полученным на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4000 (рисунок 12).

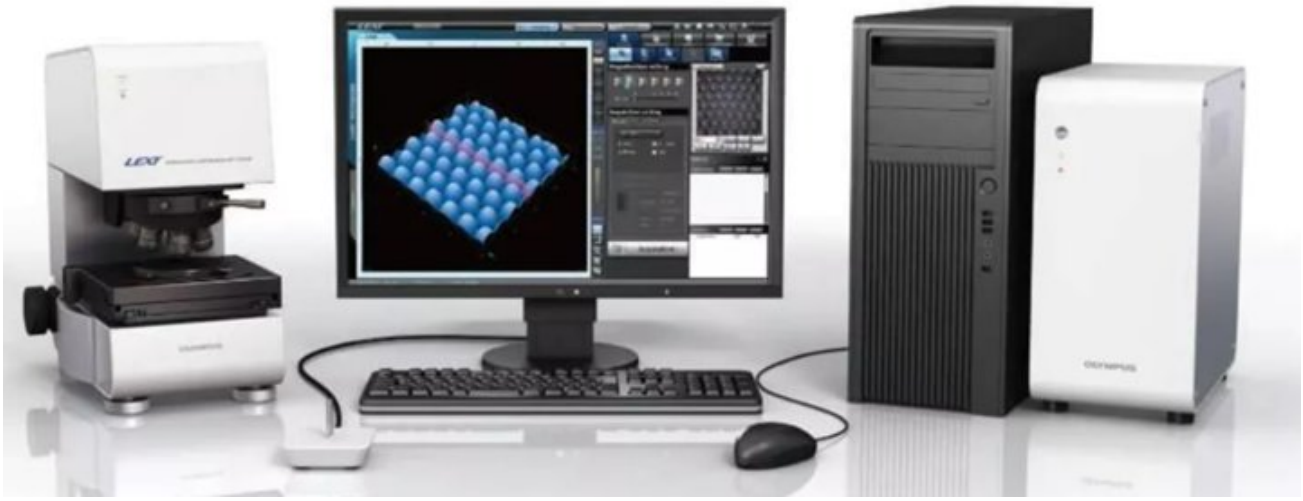
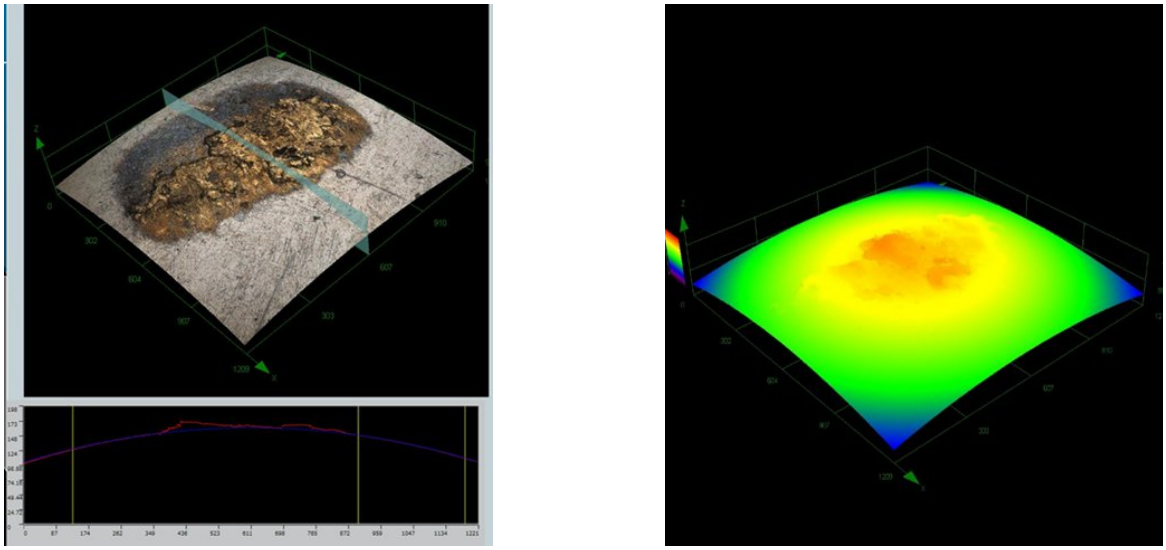


Рисунок 12 – Общий вид сканирующего конфокального лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS4000 [35]

«Сканирующий конфокальный лазерный микроскопом Olympus LEXT OLS4000 – это метрологическая система бесконтактного определения геометрических параметров, прецизионной топографии поверхности, измерения шероховатости и волнистости поверхности, расчета опорной кривой и др. параметров оценки поверхности образца/излома образца основанном на анализе 2D и 3D сканов рельефа» [35].

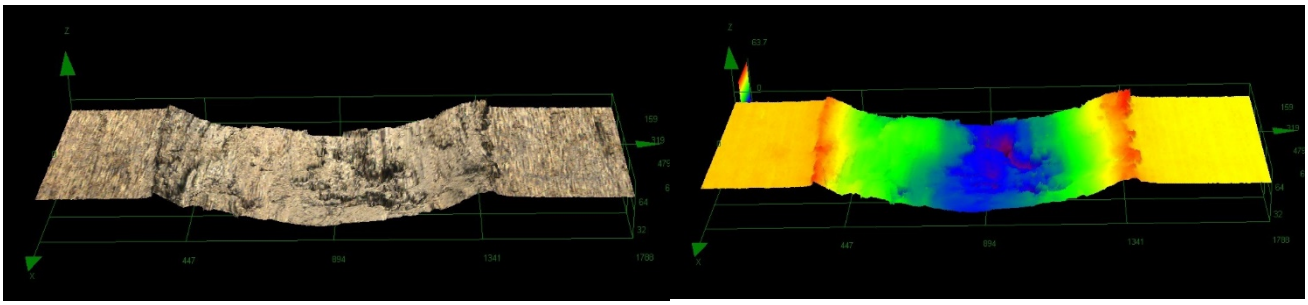
Процедура оценки повреждения инденторов выполнялось путем построения 3D-скана пятна контакта с последующим наложением диаметра шара на профиль скана и по распределению высот (рисунок 13). 3D-сканы для измерения объемного износа инденторов и образцов получали на увеличении ×400 при сшивке 200 срезов по оси Z.



а) б)

Рисунок 13 – 3D-скан пятна контакта: а) без наложения спектральной маски; б) с наложением спектральной маски, определения глубины несплошностей

Оценка повреждения образцов проводилась по панорамным снимкам полученных на увеличении ×100 и ×400 (рисунок 14).



а) б)

Рисунок 14 – 3D скан рельефа: а) без наложения спектральной маски; б) наложение спектральной маски, определения глубины несплошностей x100

Процедура оценки повреждения образцов по 3D-сканам включала в себя следующие этапы: коррекция базовой поверхности измерения, установление

границы измерения по площади, установление границы измерения по глубине и расчет объемного износа образца.

Этап коррекции базовой поверхности измерения показан на рисунке 15 и заключался в выравнивании 3D-скана по исходной поверхности образца с помощью метода трехточечного позиционирования реализованного в ПО микроскопа.

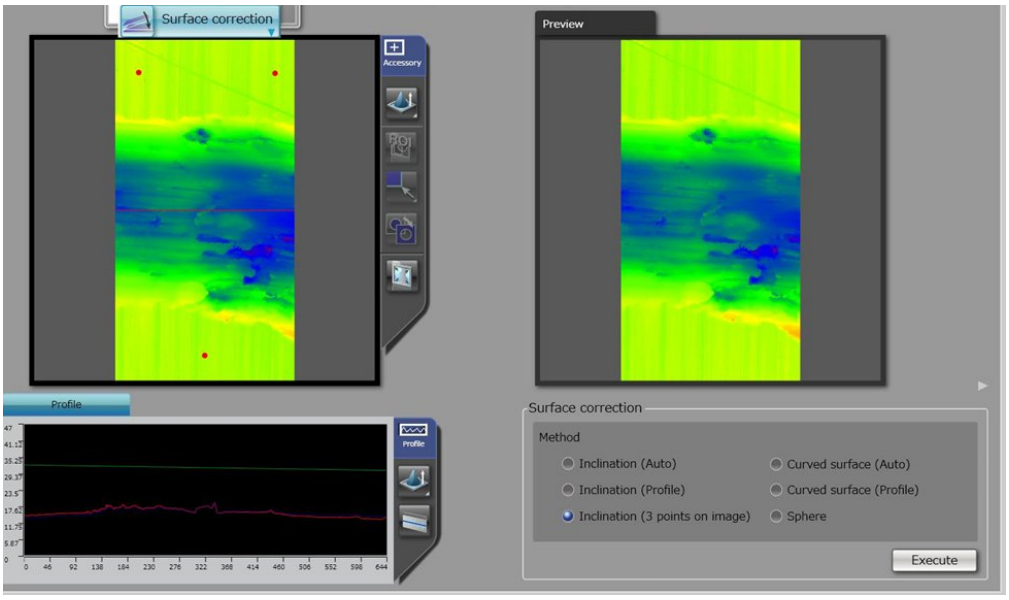


Рисунок 15 - Коррекция базовой поверхности измерения

Этап установление границы измерения по глубине показан на рисунке 16 и заключается в выборе способа измерения и установления базовых плоскостей. В настоящих измерениях использовался режим измерения объема от рельефа до одной базовой плоскости ограничивающий профиль сверху, который реализован в ПО микроскопа (рисунок 15 нижняя правая часть). За базовую плоскость при этом принималась исходная поверхность образца, выравненная по горизонтали на первом этапе (голубая линия на нижней правой части рисунка 15). В результате получали V_i – объемный износ измеренный на одном 3D-кадре, который представляет собой сумму сечений потерянного материала по профилю (розовая площадь на нижней правой части рисунка 16).

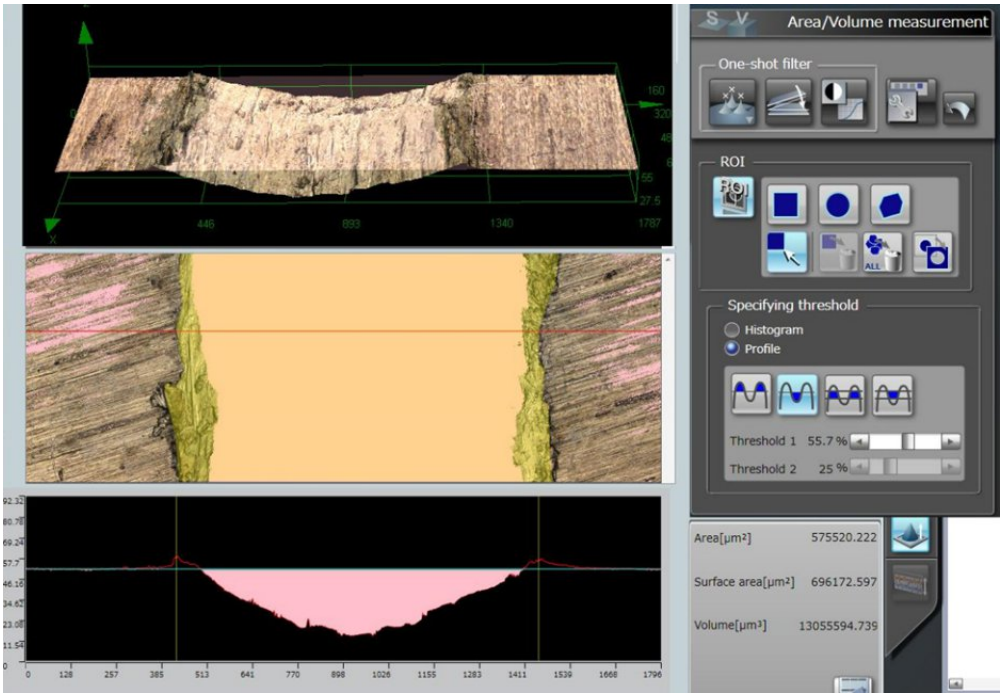


Рисунок 16 - Установление границы измерения по глубине и расчет объемного износа образца

Расчет объемного износа образца проводился по формуле:

$$V_R = \frac{N}{i} \cdot \sum_1^i V_i \quad , \qquad (3)$$

где N – общее количество 3D-кадров рельефа дорожки трения, умещающихся на длине окружности движения индентора (шт.), $N = \pi \cdot D/H$;

D - диаметр дорожки движения индентора (мм);

H – ширина 3D-кадра, измеренная вдоль длины окружности движения индентора – H = 644 мкм;

V_i – объемный износ измеренный на одном 3D-кадре шириной H ($мм^3$);

i – общее количество 3D-кадров шириной H выполненных на диаметре D для оценки V_R (шт), i = 4 шт. (через 90°);

$\Sigma V_{i/i}$ – средний объемный износ дорожки трения на пути трения длиной H.

2.8 Оценка характеристик акустической эмиссии

Регистрация акустической эмиссии при трибоиспытаниях проводилась через волновод со сферического индентора в диапазоне частот 50–800 кГц с помощью широкополосного пьезоэлектрического преобразователя Micro-F30 (Physical Acoustics Corporation, США). Контактная среда – Литол-24 (Россия). С преобразователя сигналы АЭ записывались в пороговом и кадровом режиме на компьютер (рисунок 17) с встроенной платой аналого-цифрового преобразования PCI-2 (Physical Acoustics Corporation, США) под управлением программного обеспечения AEwin (Physical Acoustics Corporation, США).

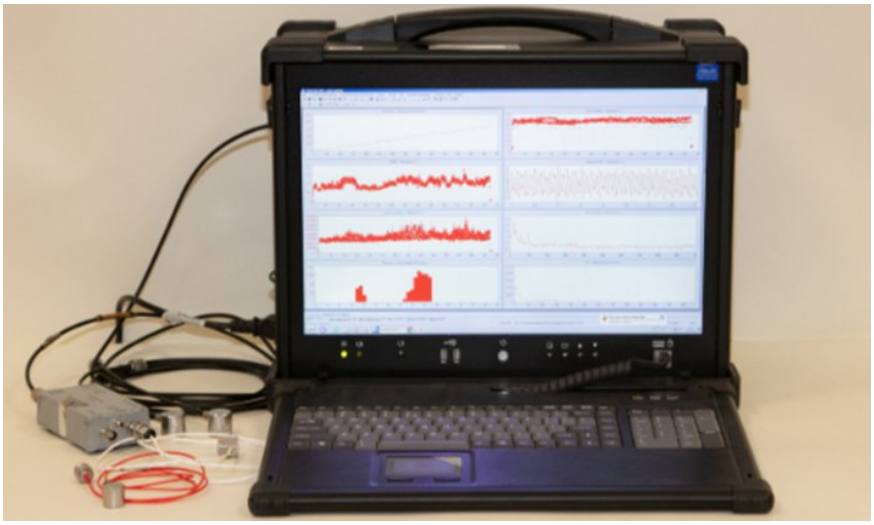


Рисунок 17 – Лабораторная исследовательская система сбора и анализа акустической эмиссии PAC PCI-2 [19]

«В пакет AEwin входит большое число служебных программ (Utilities), служащих для преобразования и фильтрации файлов данных АЭ, статистических оценок данных в файлах, а также для дополнительных расчётов и обработки. Здесь представлены: программа расчета нормальных волн в слоистых структурах,

программа обработки форм сигналов в частотно-временной области (вэйвлет анализ), программа вычисления тензора моментов для объёмных структур, служащая для определения направления роста трещин по зарегистрированным формам волн, и многие другие» [19].

При записи АЭ порог амплитудной дискриминации составлял 37 дБ, полоса пропускания аппаратуры 20 кГц-1 МГц, частота дискретизации 2 МГц, интервал контроля пика 200 мкс, интервал контроля длительности 800 мкс, интервал контроля конца сигнала 1000 мкс [6].

2.9 Обработка результатов экспериментов

Рассматривая обрабатываемые данные, важно оценивать среднеквадратическое отклонение, чтобы понимать, насколько надежны полученные результаты и какие риски могут быть связаны с ними.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) является важным статистическим инструментом, который используется для оценки разброса или изменения значений в ряде наблюдений.

В ходе данной работы, оценка среднеквадратического отклонения результатов проводилась по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} \quad (4)$$

где n — количество наблюдений;

x_i — каждое отдельное наблюдение.

Оценку коэффициента корреляции, который позволяет установить степень взаимосвязи между показателями силы сигнала и абсолютной энергией

акустических колебаний, осуществляли с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Заключение 2 раздела

Для решения поставленных задач были подобраны методики испытаний для проведения необходимых исследований:

– исследование химического состава по ГОСТ 9716.1-79 с помощью спектрометра OBLF QSN750-II;

– исследование охлаждающей среды по стандарту ISO-9950 с использованием прибора IVF SmartQuench;

– нагрев под закалку и старение проводили с помощью муфельной печи «Термокерамика»;

– измерение твердости по ГОСТ 2999-75 с помощью микротвердомера KB10S;

– анализ микроструктуры проводили с помощью инвертированного микроскопа Olympus GX51 с программным обеспечением SIAMS 800 с использованием встроенного инструмента подсчета фаз по ГОСТ 8233 – 56 после химического контрастирования фаз. Углубленное изучение микроструктуры проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Ziess EVO 18;

– трибологические испытания проводили по стандарту ASTM G99 с использованием трибометра Nanovea TRB 50N. Для определения объемного износа использовали сканирующий конфокальный лазерный микроскоп Olympus LEXT OLS4000

– регистрация акустической эмиссии при трибоиспытаниях проводилась по ГОСТ Р 52727-2007 лабораторнй исследовательской системой сбора и анализа акустической эмиссии PAC PCI-2.

3 Результаты исследований и испытаний

3.1 Химический состав и микроструктура сплава в состоянии поставки

Образцы изготовлены из латуни ЛМцАЖКС в соответствии с требованиями ТУ 184550-106-033-97.

Для исследования соответствия требованиям [27], был проведен анализ химического состава (таблица 4) и микроструктуры (рисунок 18).

Таблица 4 - Химический состав сплава ЛМцАЖКС

Образец/НД на материал	Определяемые элементы, массовая доля, %										Марка материала
	Основные компоненты							Примеси, не более			
	Cu	Mn	Al	Fe	Si	Pb	Zn	Sn	Ni	Всего	
Образец	69,3	7,17	5,39	2,06	2,01	1,05	Ост.	−	0,04	0,04	**Хим.состав**
ТУ 184550-106-033	69,5−71,5	6,50−7,50	5,00−6,00	1,40−2,40	1,70−2,50	0,60−1,20	Ост.	0,10	0,10	0,50	**ЛМцАЖКС**

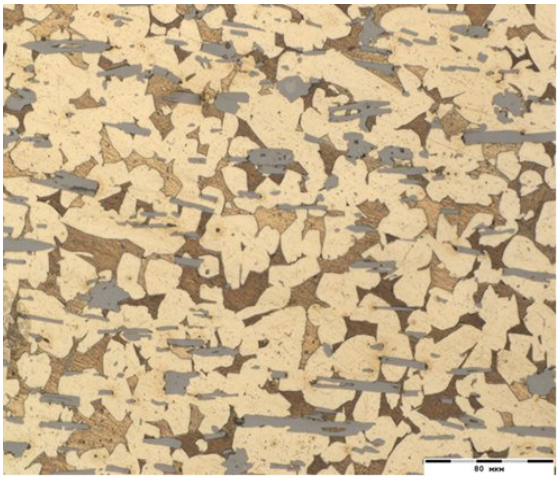


Рисунок 18 – Микроструктура сплава ЛМцАЖКС в исходном состоянии

Í500

В ходе исследования микроструктуры образца в исходном состоянии, установлено, что количество α-фазы составляет 65,6 %, количество силицидов составляет 15,5 %. Микроструктура без дефектов.

На основании полученных данных, можно сделать вывод, что исследованный образец соответствует предъявляемым требованиям.

3.2 Охлаждающая способность закалочных сред

Результаты оценки параметров охлаждающих сред для закалки представлены на рисунке 19.

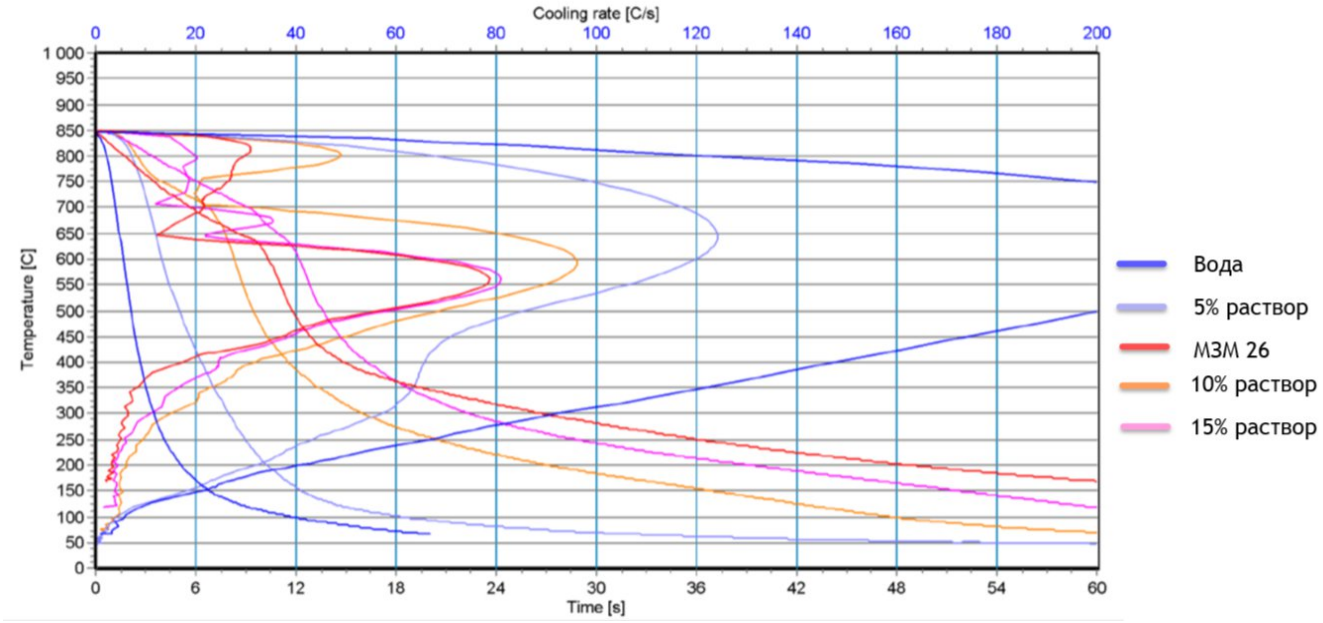


Рисунок 19 – Параметры охлаждающей способности закалочных сред

Таблица 5 - Параметры охлаждающей способности исследуемых закалочных сред

Характеристика	Ед. изм.	10% раствор	15% раствор	5% раствор	МЗМ26 масло	Вода 22°С
Максимальная скорость охлаждения	°С/с	96,26	80,93	124,13	78,73	247,26

Продолжение таблицы 5

Характеристика	Ед. изм.	10% раствор	15% раствор	5% раствор	МЗМ26 масло	Вода 22°С
Температура, соответствующая максимальной скорости охлаждения	°С	596,95	565,56	650,43	559,22	650,04
Температура перехода из фазы пара в фазу кипения	°С	714,33	645,84	846,75	376,23	111,91
Температура перехода из фазы кипения в фазу конвенции	°С	272,51	356,93	103,72	709,21	233,44
Скорость охлаждения при 300 °С	°С/с	14,75	10,65	56,88	5,84	92,45
Время охлаждения до 600 °С	с	8,28	12,21	4,01	10,37	1,63
Время охлаждения до 400 °С	с	11,54	16,3	6,35	14,87	2,66
Время охлаждения до 200 °С	с	27,05	39,18	10,29	48,73	5,09

Изучив параметры охлаждающей способности, можно сделать вывод, что охлаждающая способность масла МЗМ26 и 10% полимера близка, температура максимальной скорости охлаждения 5% раствора совпадает с водой (таблица 5), у остальных ниже

3.3 Влияние закалочной охлаждающей среды на величину остаточных напряжений сплава

Проведя закалку в различных средах, и замерев внутренний и внешний диаметр образцов, было установлено, что в зависимости от закалочной среды изменение номинального размера внутреннего диаметра выходит за рамки допуска ± 0,5 мм у образца, закаленного на воздухе.

Для определения остаточных тангенциальных напряжений I рода был сделан разрез отрезным кругом толщиной 1,2 мм в месте скопления концентраторов напряжения. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Изменение геометрических размеров образцов

	Воздух	Вода	10% полимерный раствор	15% полимерный раствор	Масло
Изменение внутреннего диаметра после закалки, мм	-0,9	-0,5	-0,5	-0,3	-0,5
Тангенциальные напряжения 1 рода, МПа	20,6	15,5	32	не определяли	не определяли
Осевое смещение, мм	0	1,5	0	0	0

После снятия нагрузки номинальный размер внутреннего диаметра кольца, закаленного на воздухе, масле и в водополимерных растворах, вернулся в исходный размер без изменения геометрической формы. У образца, закаленного в воде выявлено осевое смещение на 1,5 мм.

3.4 Изменение твердости и микроструктуры в зависимости от охлаждающей среды

Результаты измерения твердости, позволили установить, температура нагрева и охлаждающая среда способствуют изменению твердости (рисунок 20). Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что нагрев до 750 ℃ и последующая нормализация не приводит к существенному изменению твердости. Максимальная твердость достигается за счет выдержки в печи при температуре до 750 °С и закалки в 10 % водополимерном растворе.

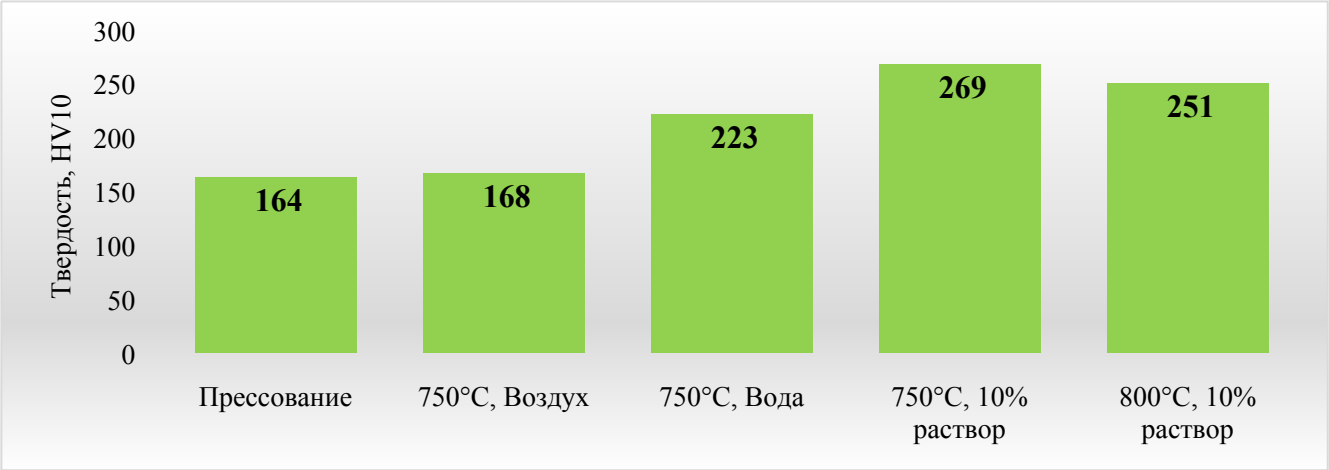


Рисунок 20 – График зависимости твердости от охлаждающей среды

Исследование микроструктуры позволило установить, что повышение твердости:

– у образцов, подвергшихся закалке в воде, связано с формированием микроструктуры мартенситного типа (рисунок 21). Формирование микроструктуры происходит по бездиффузионному механизму и сопровождается полиморфным превращением. Изменение параметров кристаллической решетки приводит к значимым деформациям;

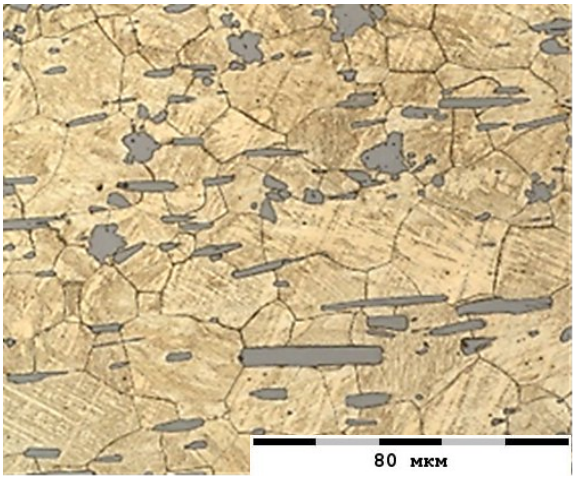


Рисунок 21 – Микроструктура сплава ЛМцАЖКС, закаленного в воде Í500

– закалка в масле и использование 10% раствора не приводит к образованию микроструктуры мартенситного типа. Тем не менее, этот процесс полностью подавляет формирование стабильной α-фазы, хотя диффузионные процессы остаются активными. В этом случае происходит истинная закалка: без полиморфного превращения. Формирование метастабильной фазы привело к потери сдвиговой устойчивости с образованием выраженных полос (рисунок 22 а, б). Оптического разрешения недостаточно для корректной металлографической оценки природы полос.

а) б)

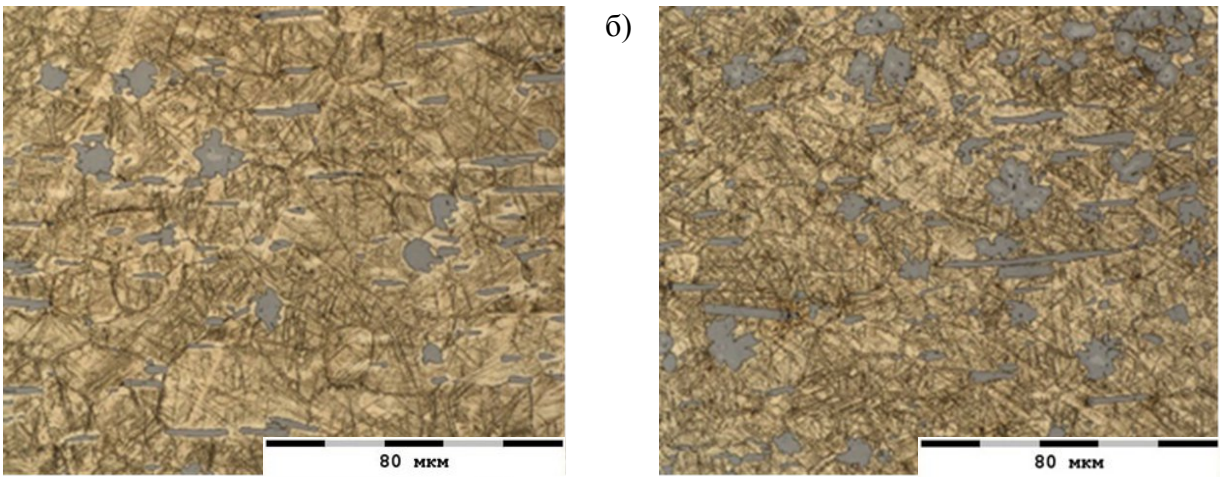


Рисунок 22 – Микроструктура сплава ЛМцАЖКС, закаленного: а) 10 % водополимерный раствор; б) масло Í500

Микроструктуру, закаленную в 5 % растворе (рисунок 23), можно характеризовать как промежуточную между закалкой в воду и масло (10 % растворе) с меньшим количеством полос.

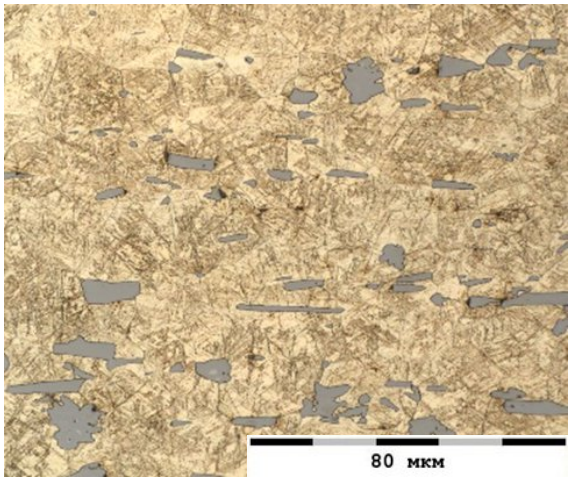


Рисунок 23 – Микроструктура сплава ЛМцАЖКС, закаленного в 5 % водополимерном растворе Í500

После закалки в 15% раствор формируется микроструктура с выделением стабильной α-фазы по границам зерен (рисунок 24) в количестве 10…15%.

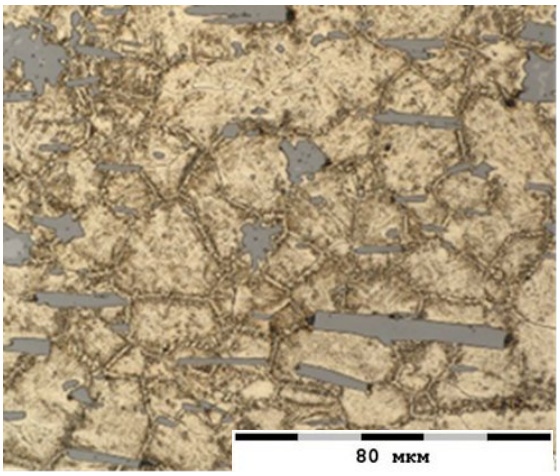


Рисунок 24 – Микроструктура сплава ЛМцАЖКС, закаленного в 15 % водополимерном растворе Í500

Образцы, охлажденные на воздухе, имеют типичную (α+β)-структуру (рисунок 25). Нагрев и выдержка в однофазной β-области привел к увеличению размера зерна β-фазы.

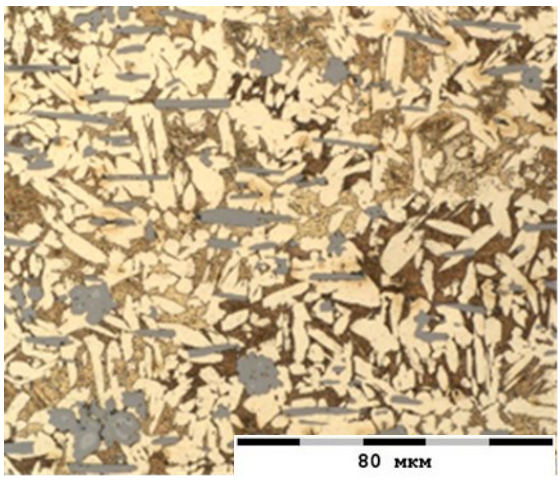


Рисунок 25 – Микроструктура сплава ЛМцАЖКС, охлажденного на воздухе Í500

Повышение температуры до 800 °С и закалка в 10% водополимерном растворе способствует выделению стабильной α-фазы по границам зерен (рисунок 26).

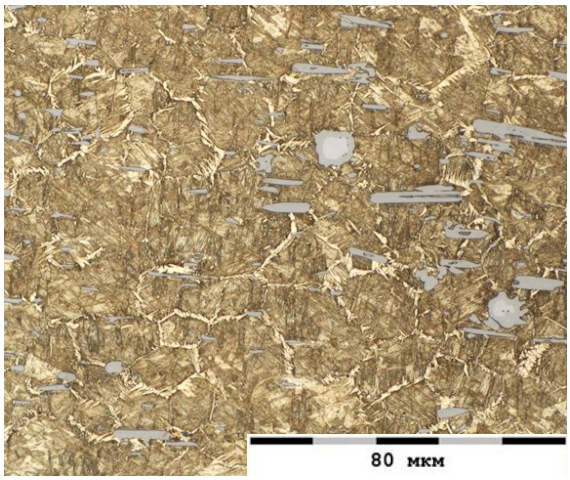


Рисунок 26 - Микроструктура сплава ЛМцАЖКС, закаленного с t = 800°С в 10% водополимерный раствор Í500

Выделение стабильной α-фазы обусловлено тем, что в интервале температур от 750 до 800°С охлаждение происходит в интервале перехода от охлаждения в

паровой рубашке к фазе кипения закалочной жидкости, что приводит к нестабильным условиям охлаждения и, в целом, более низкой скорости охлаждения, недостаточной для подавления диффузионных процессов распада β-фазы (рисунок 27).

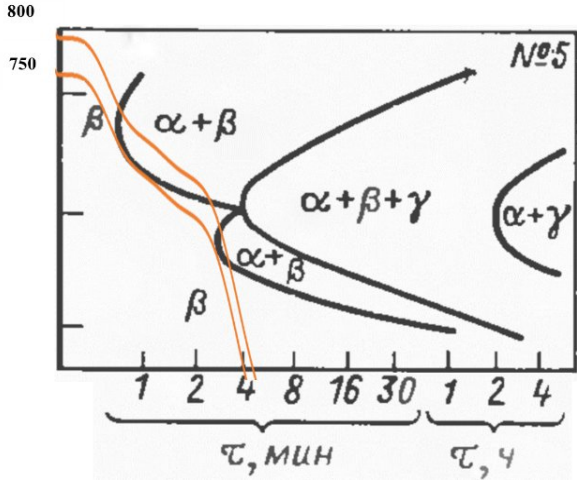


Рисунок 27 - Механизм увеличения доли α-фазы

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, увеличение полос приводит к значительному повышению твердости, что, вероятно, обусловлено формированием нестабильного состояния.

3.5 Изменение твердости и микроструктуры в зависимости от времени старения

Анализ результатов твердости при различных режимах ТО (рисунок 28, 29, 30), показал, что старение, охлаждённых на воздухе образцов, не приводит к существенному увеличению твердости по сравнению с закалкой в охлаждающие среды, из-за отсутствия значимых структурных изменений.

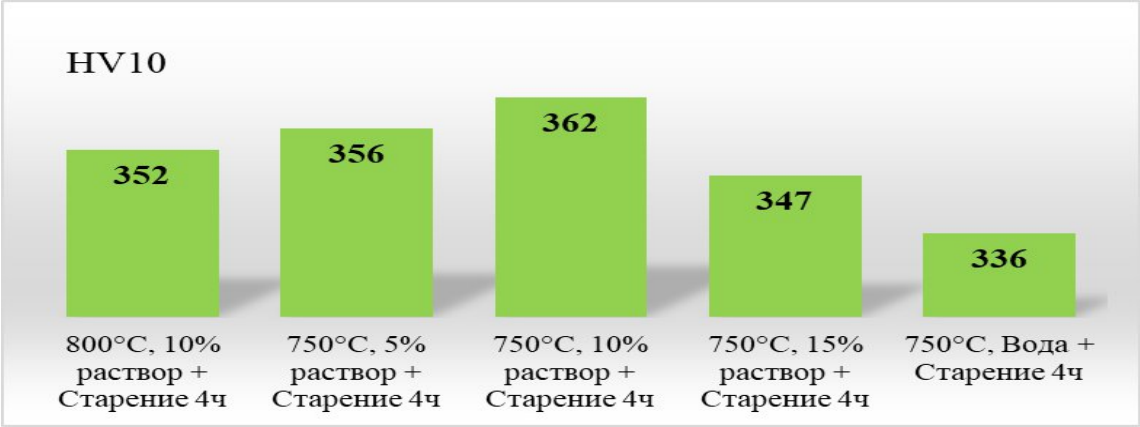


Рисунок 28 – Изменение твердости сплава в зависимости от охлаждающей среды

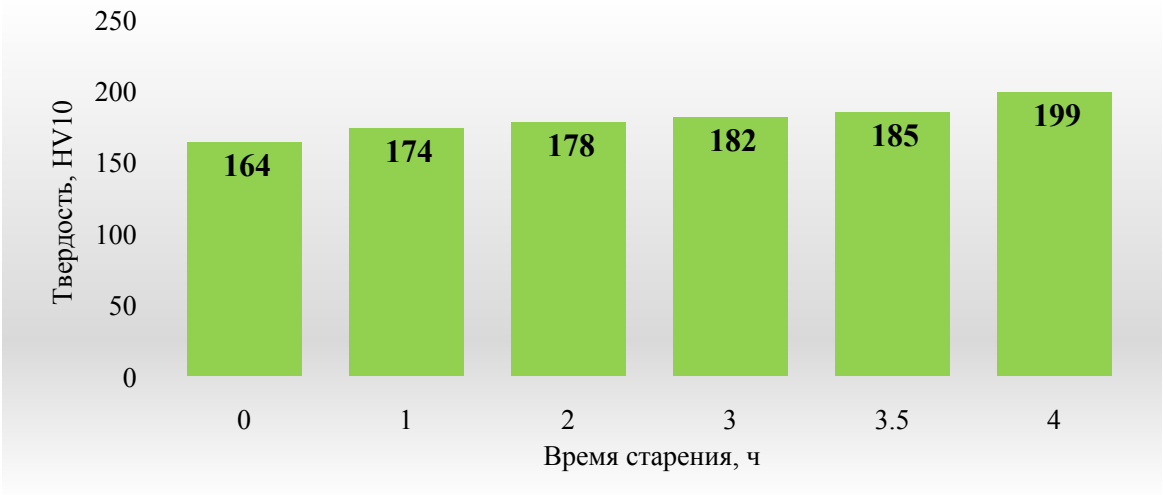


Рисунок 29 – График зависимости твердости сплава, закаленного на воздухе от времени выдержки при старении

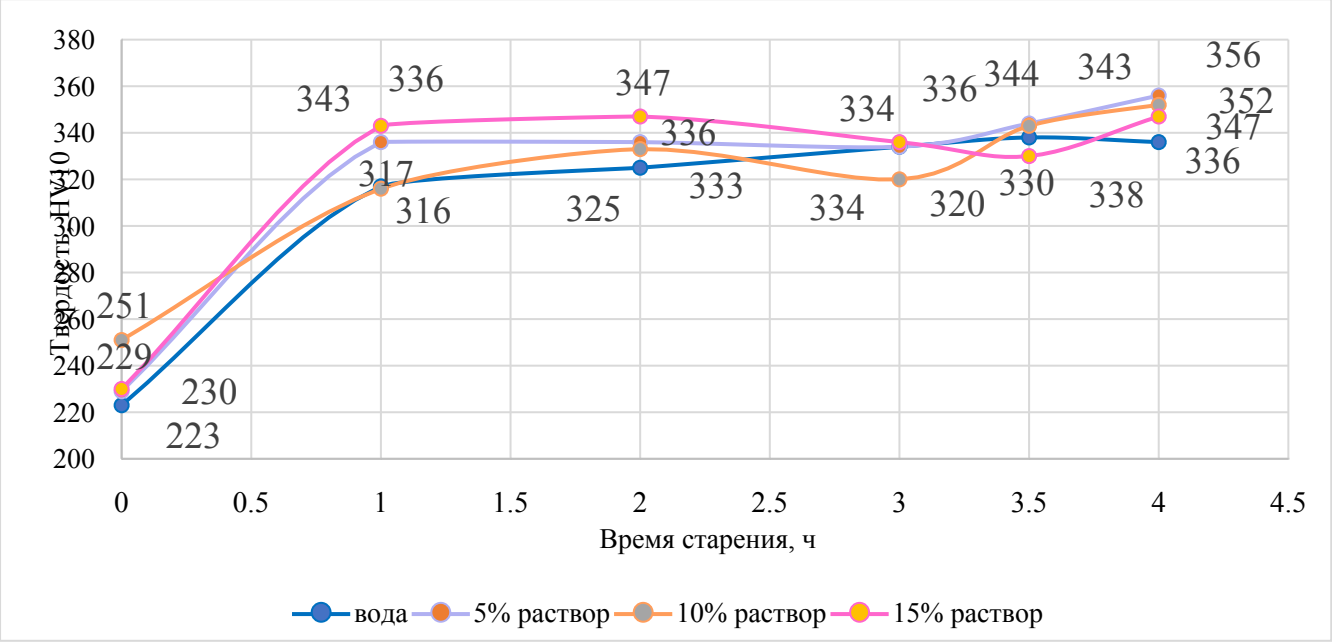


Рисунок 30 – График зависимости твердости сплава от времени выдержки при старении и охлаждающей среды

Из рисунка 30 следует, что максимально эффективное упрочнение происходит в течение 1 часа старения, далее изменение твердости протекает более плавно.

При старении материалов, особенно металлов и сплавов, наблюдается характерное изменение твердости, которое можно объяснить следующими механизмами:

– начальная стадия старения: в начале процесса старения происходит выделение мелких частиц вторичных фаз, что приводит к резкому увеличению твердости. Эти частицы препятствуют движению дислокаций, что делает материал более твердым и прочным;

– достижение максимума: после определенного времени старения количество выделившихся частиц достигает максимума, что приводит к наибольшему увеличению твердости. В этот момент материал становится наиболее прочным.

– плавная фаза старения: с течением времени, если старение продолжается, может происходить процесс, называемый «состояние перегрева» или «состояние

перегрева дислокаций». В этом случае частицы могут начать слияние или рост, что приводит к уменьшению их числа, а соответственно и к снижению препятствий для движения дислокаций. Это приводит к плавному увеличению твердости, но с меньшей скоростью по сравнению с начальной стадией.

Таким образом, резкое увеличение твердости связано с выделением частиц, а плавное – с изменениями в их структуре и взаимодействии с дислокациями.

Анализ микроструктуры после старения с различным временем выдержки позволил установить, что:

– понижение твердости образцов, закаленных с температуры 800°С в 10% водополимерном растворе, после 3 часов выдержки при температуре 320°С связано с переходом метастабильной а-фазы в стабильное состояние (рисунок 31);

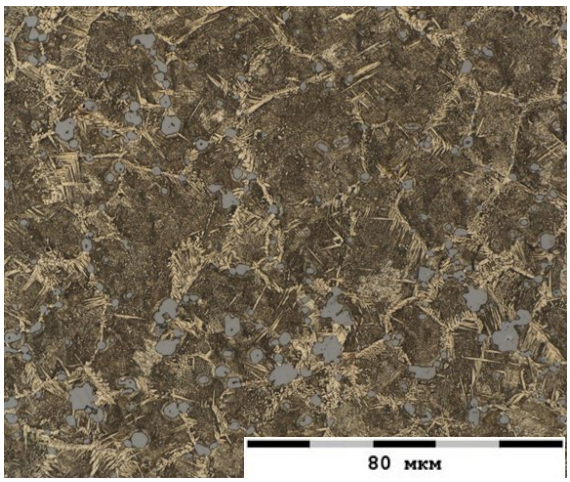


Рисунок 31 – Микроструктура сплава, закаленного с температуры нагрева 800°С в 10% водополимерном растворе, после 3 часов выдержки при температуре 320°С Í500

– последующее увеличение твердости связано с образованием, наряду с промежуточными фазами, дисперсной α-фазы (рисунок 32).

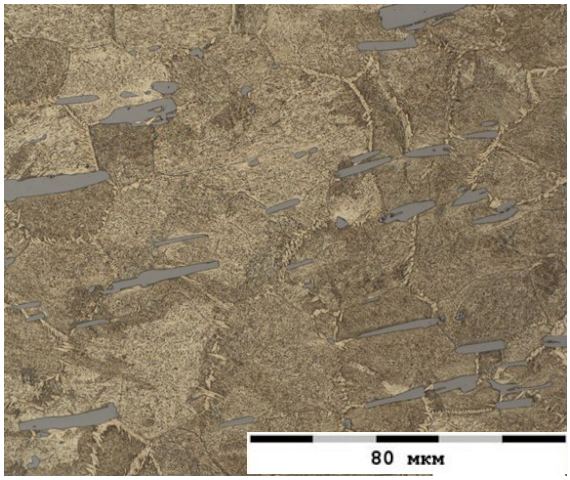


Рисунок 32 – Микроструктура сплава, закаленного с температуры нагрева 800℃ в 10% водополимерном растворе, после 4 часов выдержки при температуре 320℃ Í500

Анализ микроструктуры сплава, закаленного с температуры нагрева 750℃ в 10% водополимерном растворе, после 4 часов выдержки при температуре 320℃ (рисунок 33), показал, что режим старения при 4 часах не приводит значительному изменению микроструктуры, кроме сокращения количества полос и проявления участков дисперсных игольчатых выделений. Увеличение твердости видимо связано с формированием дисперсных промежуточных фаз.

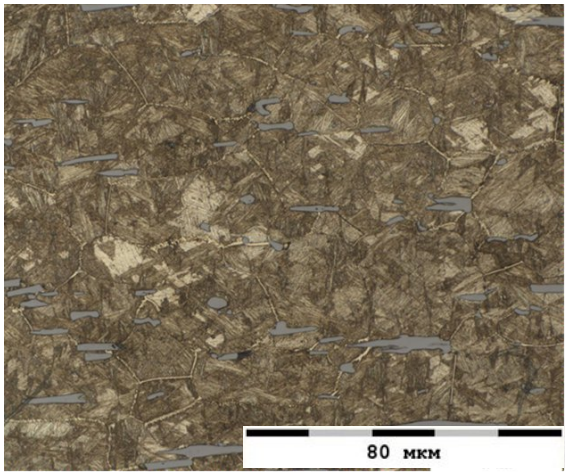


Рисунок 33 – Микроструктура сплава, закаленного с температуры нагрева 750℃ в 10% водополимерном растворе, после 4 часов выдержки при температуре 320℃, Í500

Максимальное значение твердости образцов, закаленных в воде, достигается при старении с выдержкой 3,5 часа. Микроструктура мартенситного типа трансформируется в более грубые пластины с образованием дисперсных промежуточных фаз (рисунок 34).

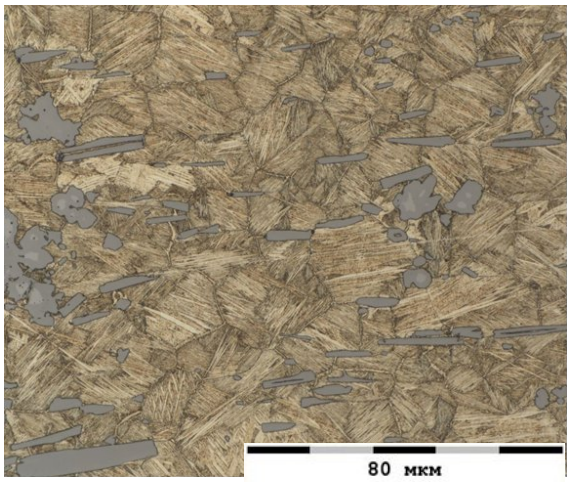


Рисунок 34 – Микроструктура сплава, закаленного с температуры нагрева 750℃ в воде, после 3,5 часов выдержки при температуре 320℃ Í500

Рост участков стабильной α-фазы при старении в течение 4 часов образцов, закаленных в воде, приводит к снижению твердости (рисунок 35).

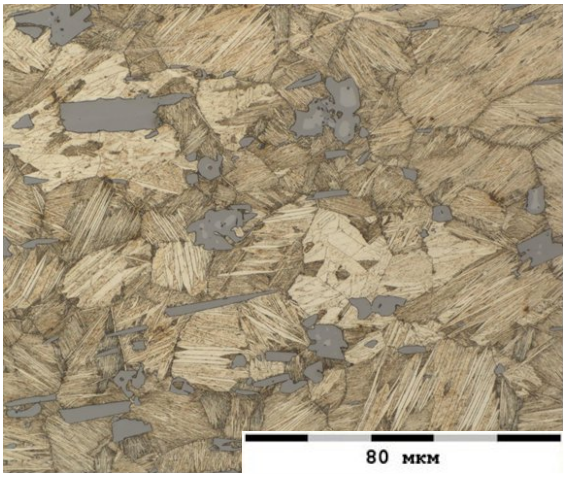


Рисунок 35 – Микроструктура сплава, закаленного с температуры нагрева 750℃ в воде, после 4 часов выдержки при температуре 320℃ Í500

Исследование микроструктуры с помощью сканирующего электронного микроскопа (приложение А), позволило установить, что в результате старения образцов, закаленных в воде, размер пластин увеличивается, а на поверхности пластин образуются когерентные частицы. После закалки в 10% водополимерный раствор формируется мелкодисперсная структура, похожая на «губку», между пластин β-фазы кристаллизуются округлые наноразмерные (80…100 нм) зародыши.

3.6 Влияние микроструктуры сплава на износостойкость

На основании проведенных исследований, зафиксировано, что во всех трибологичесих испытаниях стальной сферический индентор не имел износа, поэтому износ индентора не оценивался и не учитывался при анализе кривой изменения интегральной глубины совместного износа индентора и образца.

Результаты представлены на рисунке 36.

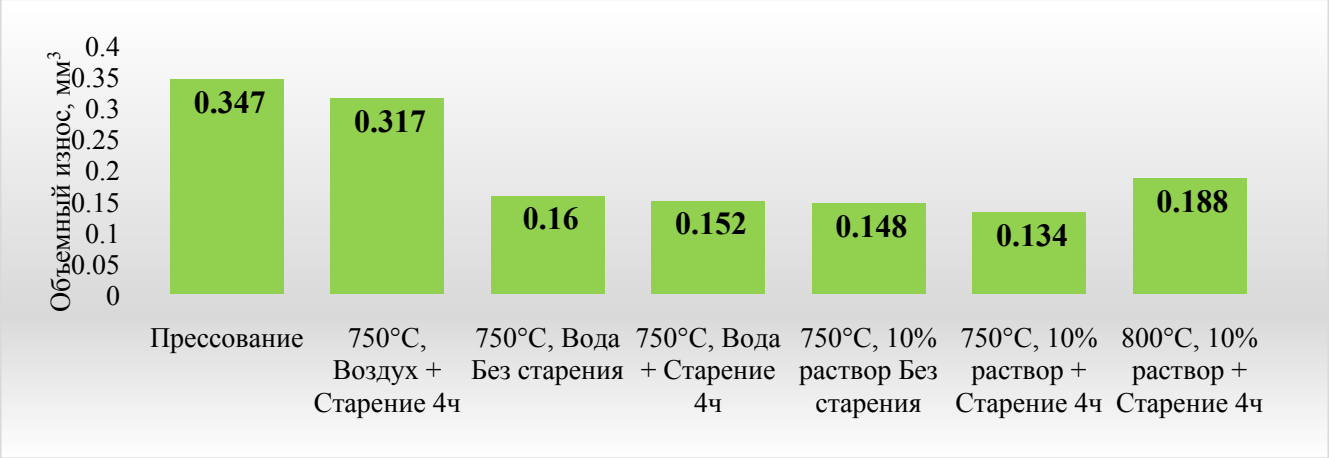
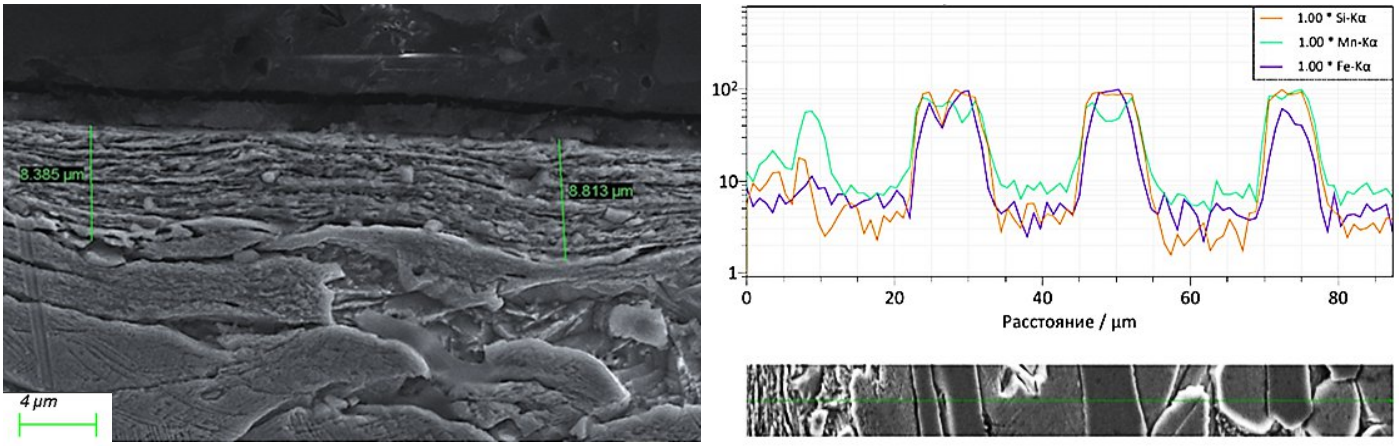


Рисунок 36 – Изменение объемного износа в зависимости от режима ТО

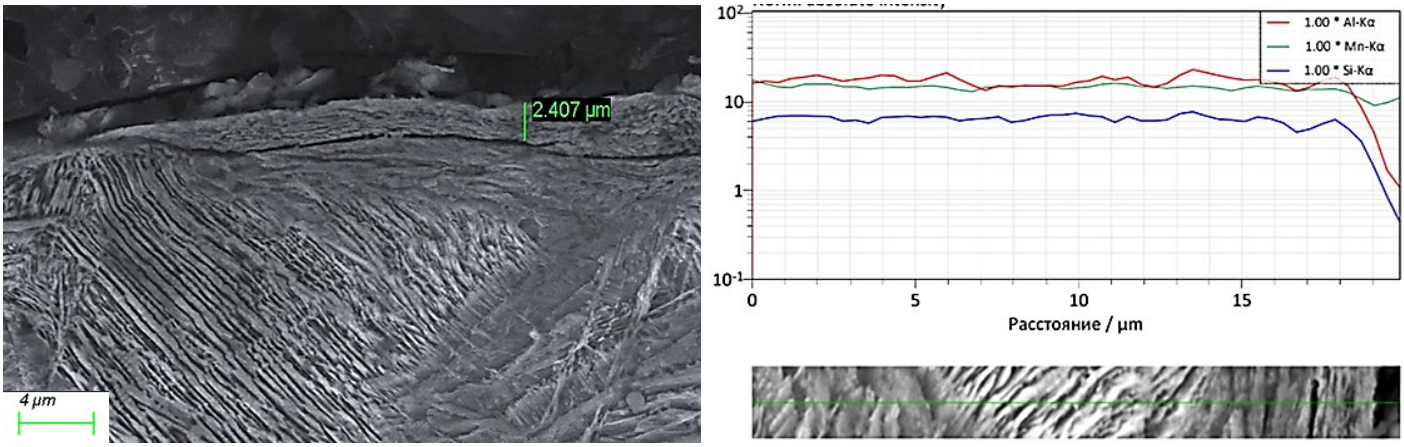
Исследование поверхности контакта шарика с образцом позволило установить, что крупная стабильная α-фаза пластически деформируется под действием осевой нагрузки. На поверхности износа образуется граничный слой от 3 до 9 мкм, включающий в себя дробленные силициды, которые способствуют абразивному изнашиванию (рисунок 37). В результате контактных нагрузок на участки b-фазы происходит выделение дисперсных включений, изменяется направление субструктурных пластин.



а) б)

Рисунок 37 – Анализ поверхности износа образцов в прессованном состоянии: а) электронное сканирование, ĺ5000; б) линейный анализ

В закаленных образцах выявлен иной механизм разрушения поверхности. Участки с пластической деформацией практически не выявляются, разрушение поверхности происходит отслоением «чашуек» толщиной 0,1…3 мкм (рисунок 38).



а) б)

Рисунок 38 – Анализ поверхности износа образцов, закаленных в воде: а) электронное сканирование, Í5000; б) линейный анализ

Механизм разрушения поверхности образца, закаленного в 10% полимерный раствор и подвергнутый старению (рисунок 39) в процессе трибологических испытаний идентичен образцу, закаленному в воду (рисунок 38).

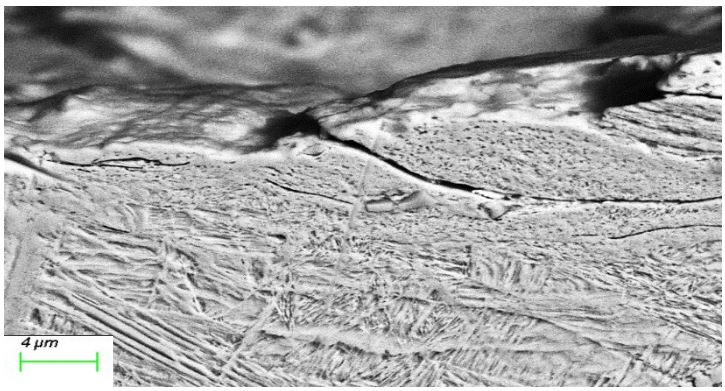


Рисунок 39 – Поверхность разрушения в процессе трибологических испытаний, образца после закалки в 10% водоплимерный раствор и старения, Í5000

Таким образом, механизм формирования метастабильных включений α-фазы имеет ключевое значение для изучения влияния процесса закалки на механические свойства сплава. Дальнейшие исследования в этой области могут оказать существенное влияние на оптимизацию технологий обработки материалов, что, в свою очередь, приведет к улучшению их эксплуатационных характеристик.

3.7 Сигналы акустической эмиссии и их связь с трибологическими показателями

В процессе проведения трибологических испытаний с использованием метода АЭ, заметили, что абсолютная энергия образцов в прессованном состоянии на порядок выше, чем у термообработанных (рисунок 40).

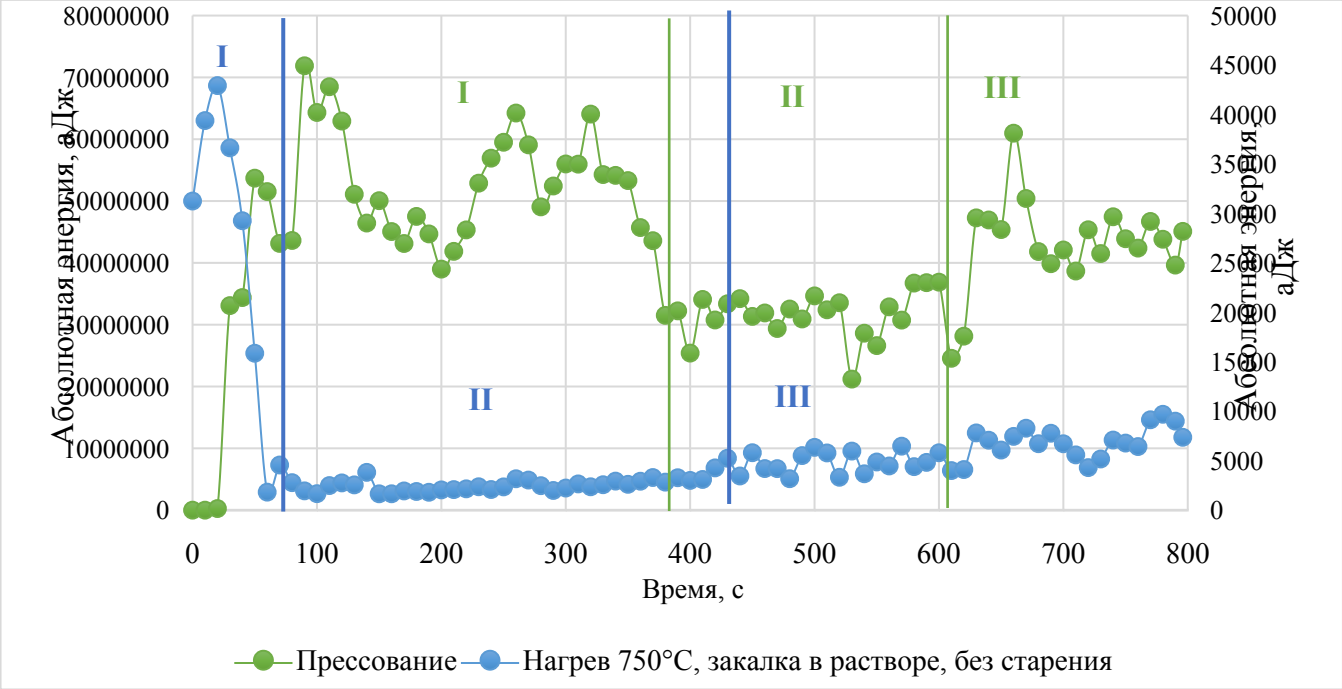


Рисунок 40 – Сравнение абсолютной энергии акустической эмиссии в зависимости от микроструктуры сплава

Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, прессованные материалы, как правило, имеют более высокую пористость, неравномерность структуры и большое количество дефектов, таких как дислокации, трещины и другие недостатки, которые могут быть образованы в процессе прессования. Эти дефекты служат источником акустических колебаний при деформации или разрушении материала, что может приводить к высокой абсолютной энергии акустической эмиссии. Во-вторых, термообработка чаще всего применяется для улучшения механических свойств материала, таких как прочность и пластичность. В результате термообработки происходит рекристаллизация и упорядочивание структуры, что может привести к уменьшению количества очагов, способствующих возникновению акустической эмиссии. Это означает, что термообработанные образцы могут иметь меньше дефектов, которые могут вызывать звуковые волны при механическом воздействии, что, в свою очередь, снижает уровень акустической эмиссии. Кроме того, прессованные материалы обычно имеют более высокую плотность контактов между частицами, что также может способствовать более активному выделению акустической энергии под воздействием внешних нагрузок. Они могут демонстрировать более сильную реакцию на вибрации и механические воздействия, генерируя тем самым большее количество акустической эмиссии.

Сравнительный анализ параметров акустической эмиссии сплава ЛМцАЖКС дает возможность сопоставить три основных этапа изменения состояния с действием трибологических нагрузок вне зависимости от его исходного структурного состояния (рисунок 40).

Первый этап: приработка. На данном этапе происходит подготовка поверхностей контакта, где по мере увеличения давления на поверхности отменяются первоначальные неровности и шероховатости. В начале взаимодействия между двумя телами происходит значительное количество трения и микросдвигов.

Второй этап: стабилизация параметров. Второй этап характеризуется развитием стационарного состояния, когда уровни трения и износа становятся стабильными. В этом состоянии происходит оптимизация взаимодействий между контактирующими поверхностями, и выделяющейся энергии за счет трения.

Третий этап: накопление энергии в процессе деформации. Третий этап ускоренного износа, когда возникают условия, приводящие к резкому увеличению наружных повреждений.

Таблица 7 – Анализ корреляционной связи (r) коэффициента трения (μ) и абсолютной энергии

Режим ТО	Среднее значение абсолютной энергии, Дж	Среднее значение μ	r на 1 этапе	r на 2 этапе	r на 3 этапе	r на трех этапах
Прессование	$2{,}23 \cdot 10^{-14}$	0,27 ± 0,02	0,67	0,06	0,61	0,45
Нагрев 750℃, нормализация + 4 ч. старения	$5{,}73 \cdot 10^{-15}$	0,17 ± 0,07	-0,17	0,32	0,02	-0,3
Нагрев 750°С, закалка в воде, без старения	$6{,}71 \cdot 10^{-15}$	0,19 ± 0,04	0,78	0,17	0,63	0,67
Нагрев 750°С, закалка в воде + 4 ч. старения	$3{,}03 \cdot 10^{-15}$	0,23 ± 0,06	-0,94	0,94	0,35	0,65
Нагрев 750°С, закалка в растворе, без старения	$7{,}15 \cdot 10^{-15}$	0,37 ± 0,03	0,96	0,4	0,47	0,91
Нагрев 750°С, закалка в растворе + 4 ч. старения	$3{,}79 \cdot 10^{-15}$	0,24 ± 0,001	0,64	0,85	0,22	0,65
Нагрев 800°С, закалка в растворе + 4 ч. старения	$4{,}9 \cdot 10^{-15}$	0,25 ± 0,08	0,56	0,3	0,14	0,23

Далее сравнивали значения коэффициента корреляции на различных этапах в соответствии с классификацией Чеддока.

По данным таблицы 7 корреляционная связь:

1) на этапе приработки:

– весьма высокую отрицательную связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: закалка в воде + старение;

– весьма высокую положительную связь имеют образцы, прошедшие режимы ТО: закалка в растворе;

– высокую положительную связь имеют образцы, прошедшие режимы ТО: закалка в воде;

– заметную связь имеют образцы в прессованном состоянии и прошедшие режимы ТО: закалка с температуры нагрева 800°С в растворе + старение, закалка в растворе + старение;

– слабую отрицательную связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: нормализация + старение;

2) на этапе стабилизации параметров акустической эмиссии:

– весьма высокую положительную связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: закалка в воде + старение;

– высокую положительную связь имеют образцы, прошедшие режимы ТО: закалка в растворе + старение;

– умеренную связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: нормализация + старение, закалка в растворе, закалка с температуры нагрева 800°С в растворе + старение;

– слабую связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: закалка в воде;

3) на этапе накопления энергии в процессе деформации:

– заметную связь имеют образцы в прессованном состоянии и прошедшие режимы ТО: закалка в воде;

– умеренную связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: закалка в воде + старение, закалка в растворе;

– слабую отрицательную связь имеют образцы, прошедшие режим ТО: закалка в растворе + старение, закалка с температуры нагрева 800°С в растворе + старение.

Таким образом акустическая эмиссия дает возможность отследить процессы, протекающие под действием осевой нагрузки.

Увеличение количества стабильной α-фазы приводит к снижению коэффициента корреляции, следующий этап исследований направлен на анализ изменения коэффициента трения и акустической эмиссии в процессе трибологических испытаний.

Увеличение сопротивления в процессе трения и сигналов акустической эмиссии может свидетельствовать о том, что процессе прессования в результате деформации и динамической рекристаллизации протекают процессы, которые не влияют на коэффициент трения, но фиксируются акустической эмиссией (рисунок 41).

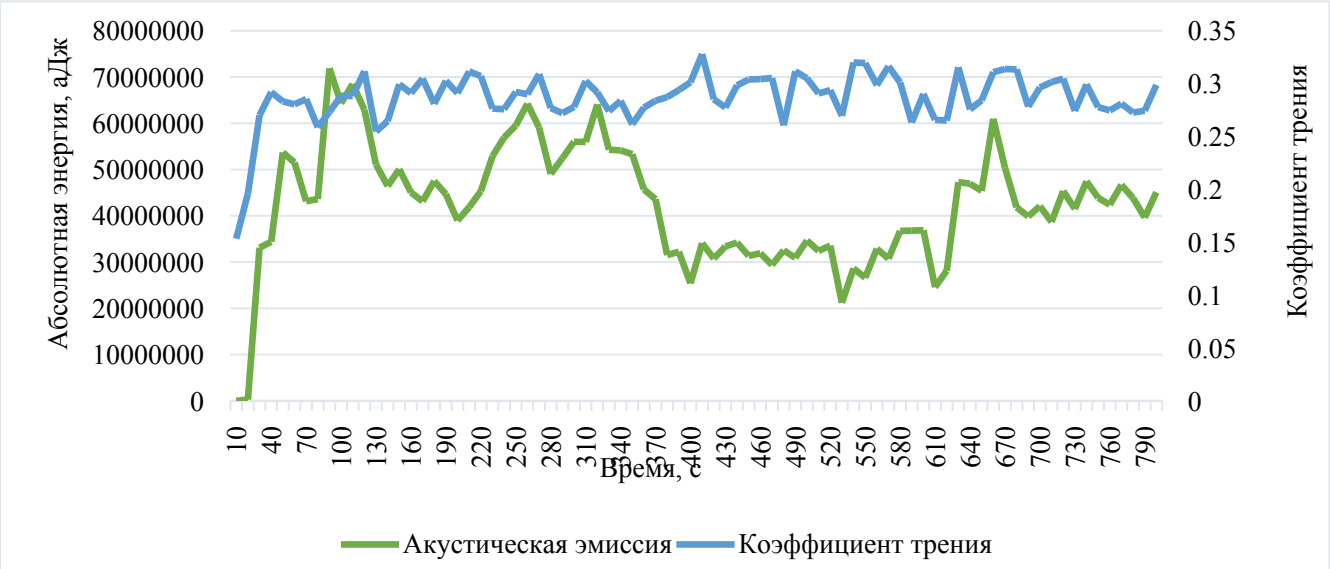


Рисунок 41 – Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения в прессованном состоянии

Переход из закаленного состояния в стабильное состояние после нормализации и 4 часов старения, приводит к значительной дисперсии коэффициента трения (рисунок 42).

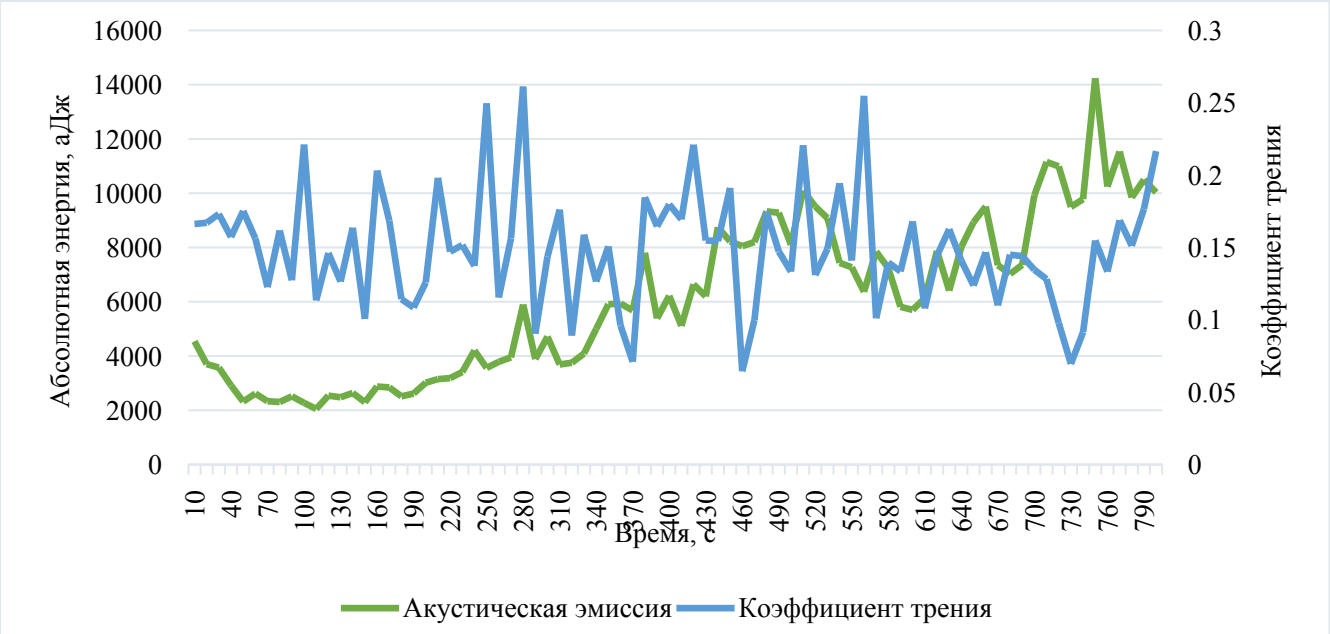


Рисунок 42 – Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения после нормализации + 4 часа старения

На рисунке 43 мы наблюдаем, изменение параметров акустической эмиссии закаленного в воду образца. После этапа релаксации напряжений имеет непродолжительный этап стабилизации, а затем переходит в этап накопления энергии. Также с переходом на данный этап уменьшается сопротивление трению. Известно, что закалка в воде не позволяет использовать упрочняющий эффект из-за высоких остаточных напряжений, в результате чего и происходит коробление изделий.

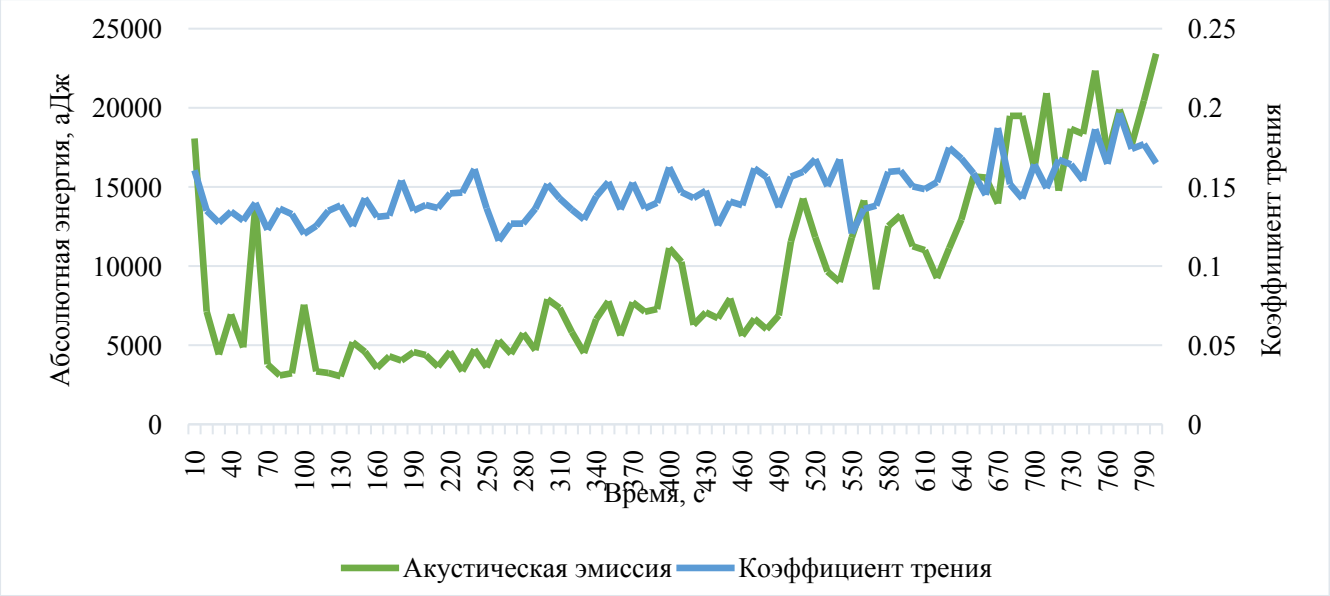


Рисунок 43 – Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения в процессе закалки в воде без старения

Образование когерентных частиц после 4 часов старения, закаленных в воде образцов, оказывает положительное воздействие в процессе трения: снимаются остаточные напряжения, появляется этап стабилизации и увеличивается этап накопления энергии, тем самым увеличивая износостойкость материала (рисунок 44).

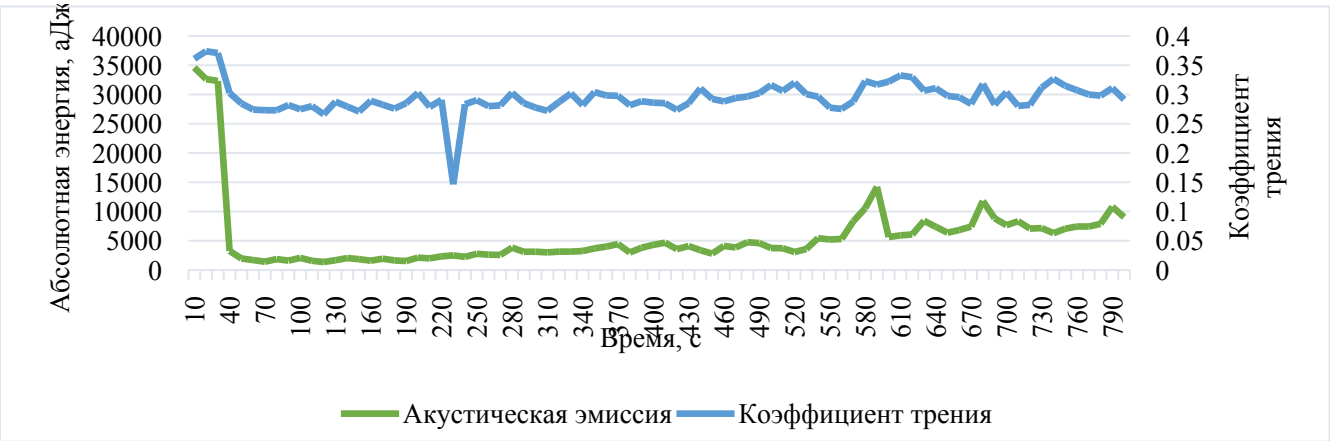


Рисунок 44 – Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения в процессе закалки в воду + 4 часа старения

Закалка в растворе и старение в течение 4 часов (рисунок 45, 46) увеличивает этап накопления микроповреждений.

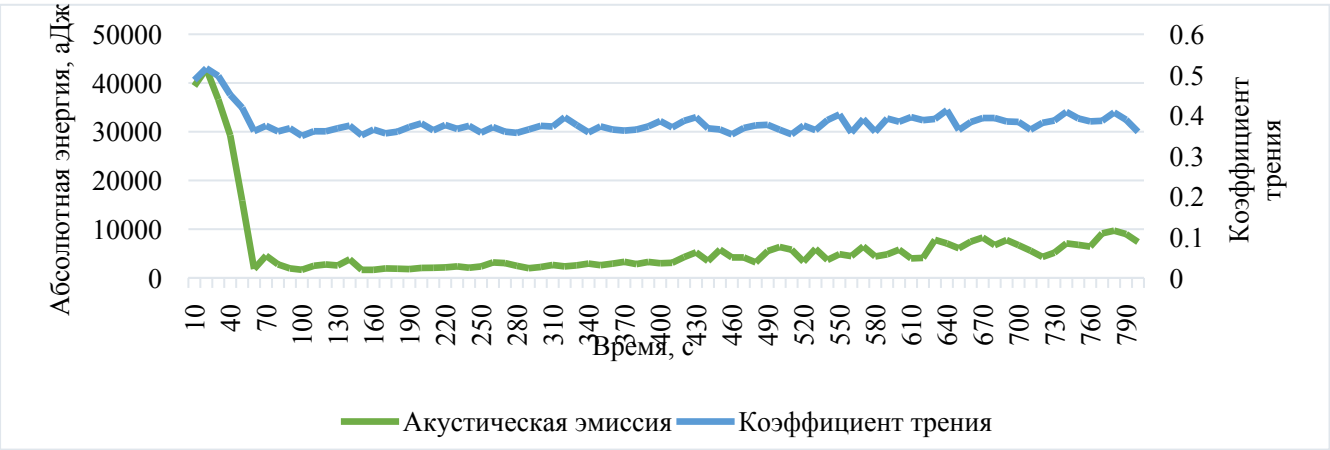


Рисунок 45 - Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения в процессе закалки в водополимерный раствор без старения

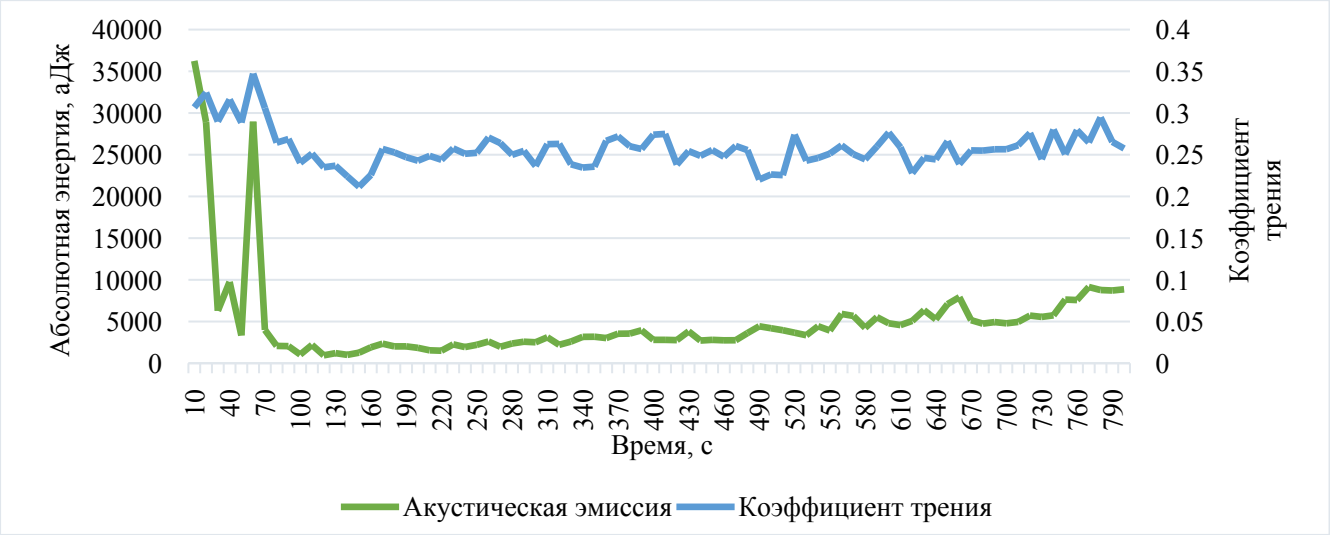


Рисунок 46 - Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения в процессе закалки в водополимерный раствор + 4 часа старения

Формирование наноразмерных зародышей между пластинами β-фазы способствует образованию пор, тем самым уменьшая этап «стабилизации» и увеличивая этап «накопления энергии» (рисунок 47).

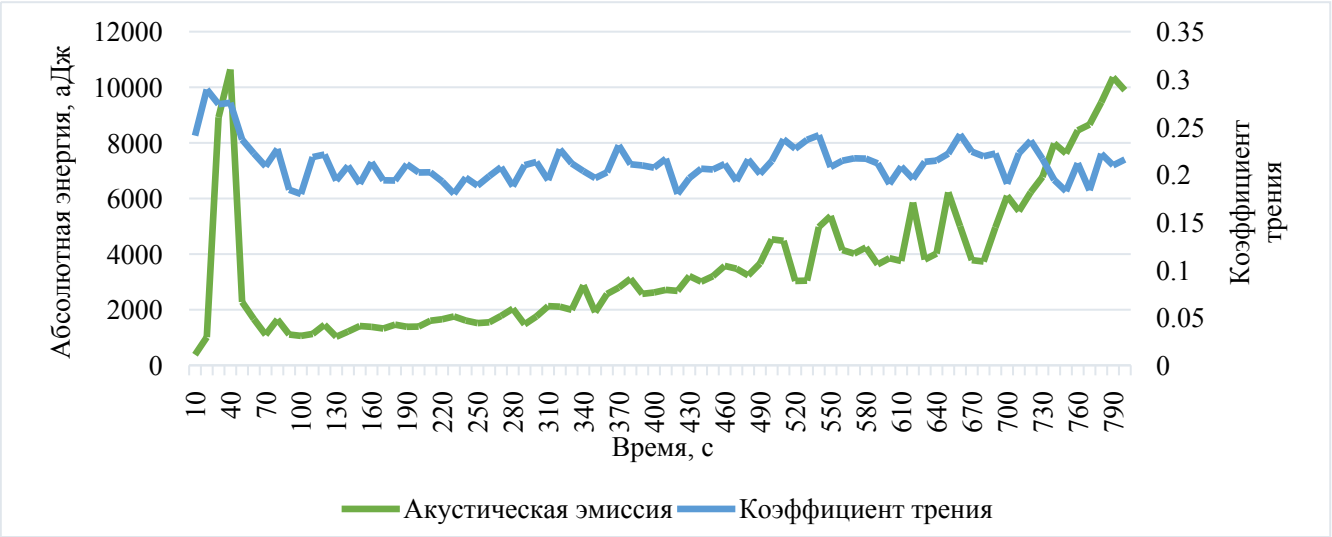


Рисунок 47 - Изменение параметров акустической эмиссии и коэффициента трения в процессе нагрева до 800°С под закалку, закалка в 10% водополимерном растворе + 4 часа старения

По результатам исследования влияния микроструктуры сплава на износостойкость установлено, что в процессе трения механизм разрушения зависит от доли стабильных и метастабильных фаз, так как перестройка структуры сопровождается генерацией упругого импульса. Появление пластичной α-фазы снижает стабильность отклика абсолютной энергии АЭ, т.к. часть энергии осевой нагрузки расходуется на пластическую деформацию.

Заключение 3 раздела

При закалке в водополимерные растворы, изменяя концентрацию, можно добиться формирование различной микроструктуры, избегая при этом деформаций.

Наличие дисперсных промежуточных фаз способствует не только повышению твердости и износостойкости, но и стабильного отклика акустической эмиссии на коэффициент трения, тем самым обеспечивая возможность отслеживать динамику структурных изменений в процессе трения.

Заключение

В результате проведенной работы установлено, что коэффициент корреляции показателей акустической эмиссии с трибологическими свойствами зависит от формирования микроструктуры в процессе термической обработки, тем самым позволяя оценить состояние материала и прогнозировать долговечность изделия.

В ходе исследований было установлено:

– наиболее благоприятной температурой нагрева под закалку является температура выше 750℃, но ниже 800℃, так как нагрев до 800 ℃ приводит к ускоренному распаду пересыщенного раствора;

– в зависимости от рабочей концентрации водополимерного раствора можно зафиксировать различное структурное состояние и добиться твердости латуни ЛМцАЖКС, эквивалентной достигаемой при закалке в воде (и выше). При этом значимые деформации сплава не зафиксированы;

– установлено, что после закалки фиксируются: в воде - стабильная мартенситоподобная микроструктура; 10% водополимерный растворе - неустойчивый перенасыщенный раствор β-фазы и метастабильные полосы α-фазы, уменьшение концентрации способствует появлению мартенситоподобных структур с меньшим количеством полос, увеличение концентрации раствора способствует выделению стабильной фазы по границам зерен;

– увеличение твердости на 35…55 %, относительно закаленного состояния, в результате старения, связано с формированием мелкодисперсных структур;

– выявлена сильная связь между коэффициентом трения неустойчивого раствора и абсолютной энергией АЭ;

– значительное, более чем двукратное (260%), увеличение износостойкости сопровождается устойчивой зависимостью сигнала АЭ от коэффициента трения. Это открывает перспективные возможности для мониторинга динамики структурных изменений, происходящих непосредственно в процессе трения.

Список используемых источников

1. Акустическая эмиссия. [Электронный ресурс]: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения 10.09.2024).

2. Анализатор SIAMS 800 [Электронный ресурс] - URL : https://siams.com/siamss800/ (дата обращения 20.10.2024).

3. Антипов В.В. Исследование фазового состава и повышение эксплуатационных характеристик марганцевых латуней, используемых в автомобильной промышленности : дис. канд. тех. наук: 05.16.01 / Антипов Владислав Валерьевич. - Москва, 2002 – С 32.

4. Влияние охлаждающей способности на механические свойства латуней. [Электронный ресурс]: URL: https://masters.donntu.ru/2015/fmf/suprun/diss/index.htm (дата обращения 25.10.2024).

5. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу : Государственный стандарт СССР : дата введения 1985-09-27 / Государственный комитет СССР по стандартам. – Изд. Официальное. – Москва : Госстандарт, 1985 – 31 с.

6. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2007-06-14 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. Официальное. – Москва : Стандартфарм, 2007 – 16 с.

7. ГОСТ 8233 - 56. Сталь. Эталоны микроструктуры : Межгосударственный стандарт : дата введения 1957-07-01 / Комитет стандартов, мер и приборов при совете министров СССР. – Изд. Официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1957 – 12 с.

8. ГОСТ 9716.1-79. Сплавы медно-цинковые. Методы спектрального анализа : межгосударственный стандарт : дата введения 1990-07-01 / Министерство цветной металлургии СССР . – Изд. Официальное. – Москва : Издательство

стандартов, 1990 – 7 с.

9. Деев А.А. Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания / А.А.Деев // Cyberleninka : электронная библиотека [Электронный ресурс]: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/akusticheskie-kolebaniya-v-friktsionnom-kontakte-kak-sposob-kontrolya-poverhnostey-treniya-na-etape-prirabotki-dvigateley-vnutrennego/viewer (дата обращения 6.11.2024)

10. Изменение свойств закалочных сред в зависимости от температуры нагрева / А. В. Святкин, В. Г. Азизбекян, Н. И. Сардаев [и др.] // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 2(16). – С. 74-76.

11. Исследовательская микроскопия. [Электронный ресурс]: URL: https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/sem-fib-sem/sem/evo.html (дата обращения 10.02.2025).

12. Классификация закалочных сред. [Электронный ресурс]: URL: https://autocode.by/oils-lubricants/zakalochnye-sredy-i-masla/zakal.html (дата обращения 30.10.2024).

13. Козлов В. В. Влияние кремния и интерметаллида Mn_5Si_3 на структуру и механические свойства кремнисто-марганцовистых латуней / В.В. Козлов, А. А. Тишков, В. Н. Федоров // Тематический сборник научных трудов "Оптимизация свойств и рациональное применение латуней и алюминиевых бронз". - Москва, 1988. 95 с. - ISBN 5-229-00219-0.

14. Копыл М.Д. Латунные сплавы для колец синхронизаторов совершенствуются / М.Д. Копыл, А.В. Тропотов, И.В. Котляров // Автомобильная промышленность. - 1999 - № 10 - С. 26 - 29.

15. Котляров И.В. Влияние химического и фазового состава специальных латуней на их твердость и износостойкость: автореферат дис. канд. тех. наук: 05.16.01 / Котляров Игорь Викторович. - Тула, 2009 - 25 с.

16. Котов Д.А. Комплексное воздействие на структуру литых заготовок из сложнолегированных латуней: дис. канд. тех. наук: 05.06.04 / Котов Дмитрий Анатольевич. – Екатеринбург, 2005 - 169 с.

17. Кузьмин О.С. Разработка технологии полунепрерывного литья кремнемарганцевых износостойких латуней, применяемых в автомобилестроении: дис. канд. тех. наук: 05.16.04 / Кузьмин Олег Сергеевич. - Екатеринбург, 1999 - 174 с.

18. Куксенова Л.И. Методологические основы выбора состава латуней для узлов трения скольжения в среде поверхностноактивных смазочных материалов / Л.И. Куксенова, С. А. Поляков // Вестник научно-технического развития . - 2022 - № 164 - С.10 - 22.

19. Лабораторная исследовательская система сбора и анализа акустической эмиссии PAC PCI-2. [Электронный ресурс]: URL: https://www.tltsu.ru/science-and-innovation/scientific-innovative-activity/equipment/234 (дата обращения 25.10.2024).

20. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов: справочник / М.В. Мальцев ; "Металлургия" - Москва : [б. и.], 1970. - 364 с.

21. Машков Ю. К. Трибофизика конструкционных материалов : учебное пособие / Ю. К. Машков, О. В. Малий ; Омский государственный технический университет - Омск, 2017. 176 с. - ISBN 978-5-8149-2439-1.

22. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: курс лекций / Г.А. Меркулова ; ФГОУВПО "Сибирский Федеральный Университет" - Красноярск : [б. и.], 2007. - 263 с.

23. Мурашкин С.В. Применение метода акустической эмиссии для оценки величины износа пары трения скольжения в условиях лабораторных испытаний на стенде с возвратно-поступательным движением образцов / С.В. Мурашкин, Е.Н. Гайворонская, Е.В. Пучнина, Е.В. Мезенцева // Маханика и машиностроение / ред. Известия Самарского научного центра Российской академии наук - г. Самара, 2016.

- т. 13, вып. 4 - С.1148-1153.

24. Микротвердомеры KB30S [Электронный ресурс] - URL : https://priby.ru/catalog/nerazrushayushchiykontrol/tverdomery/mikrotverdomery/mikrotverdomery-kb10s-kb30s-kb50s/ (дата обращения 20.10.2024).

25. Осколкова Т.Н., Шорохова О.В. Закалка легированных сталей в водном растворе полимра «Термовит-М» // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 5. – С. 141.

26. Патент № 2764687 Российская Федерация. Высокопрочный латунный сплав и изделие из высокопрочного латунного сплава : № 2021105171 : заявл. 29.10.2018 ; опубл. 19.01.2022 / Б. Реетц, Г. Гуммерт, Т. Плетт [Электронный ресурс]: URL: https://patents.google.com/patent/RU2764687C1/ru (дата обращения 5.11.2024).

27. Патент № 3255161 Европейское патентное ведомство. Специальный латунный сплав и изделия из сплава : № 20171213 / MITSUBISHI MATERIALS CORP [Электронный ресурс]: URL: https://data.epo.org/gpi/EP3255161A1-SPECIAL-BRASS-ALLOY-AND-ALLOY-PRODUCT (дата обращения 6.11.2024).

28. Пугачева Н. Б. Управление структурой и свойствами (a + β)-латуней / Н.Б. Пугачева, А.А. Панкратов, А.Г. Титова, Л.М. Жукова, И.В. Котляров, Н.Ю. Фролова // ГОУ ВПО "Уральский государственный технический университет" - Екатеренбург, 2006. - С.117-121.

29. Растегаев И.А. Методика определения критических точек при трибологических испытаниях с применением метода акустической эмиссии / И.А.Растегаев, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов, А.В. Данюк // Elibrary : электронная библиотека [Электронный ресурс]: URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25717333 (дата обращения 6.11.2024).

30. Растегаев И.А. Методические указания по работе на трибометре NANOVEA TRB 50N / И.А. Растегаев, М.А. Афанасьев // Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий / ред. Тольяттинский

государственный университет - г.Тольятти, 2017. - 60 с.

31. Растегаев И.А. Методические указания по работе на трибометре NANOVEA TRB 50N / И.А. Растегаев, М.А. Афанасьев // Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий / ред. Тольяттинский государственный университет - г.Тольятти, 2017. - 60 с.

32. Свойства латунных сплавов. [Электронный ресурс]: URL: https://cuprum--metall-ru.turbopages.org/turbo/cuprum-metall.ru/s/informatsiya/latun/ (дата обращения 10.09.2024).

33. Святкин А.В. Влияние нагрева латуни марки ЛМцАЖН в диапозоне температур горячей деформации на размер и форму включений упрочняющей фазы / А.В. Святкин, Н.Н. Грызунова, А.М. Гнусина // Сборник материалов XI международной школы "Физическое материаловедение" / ред. Тольяттинский государственный университет - г.Тольятти, 2023. - С.128-129.

34. Святкин А.В. Изменение свойств закалочных сред в зависимости от температуры нагрева / Святкин А. В., Азизбекян В. Г., Сардаев Н. И., Герасин А. П., Абрамова А. Н., Викарчук А. А. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета / ред. ТГУ - г. Тольтти, 2011. - № 2 - С. 74–76.

35. Сканирующий конфокальный лазерный микроскоп Olympus LEXT OLS4000. [Электронный ресурс]: URL: https://www.tltsu.ru/science-and-innovation/scientific-innovative-activity/equipment/160 (дата обращения 15.11.2024).

36. СТО 83120.0050−2024. Технологическая документация. Изготовление образцов и шлифов для контроля качества металлопроката, комплектующих изделий и других автомобильных компонентов : Стандарт организации - Тольятти : АО "АвтоВАЗ", 2024 - 25 с.

37. СТО 00232934-03.13. Технологическая документация. Подготовка образцов для металлографического анализа : Стандарт организации - Тольятти : АО «АвтоВАЗ», 2021 - 13 с.

38. Титарев Н. Я. Влияние марганца и кремния на свойства и структуру износостойкой латуни / Н.Я. Титарев, Л.И. Митина, Э.И. Мироненко // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. - 1982 - №2. - С.105 - 110.

39. ТУ 184550-106-033-97. Технологические условия. Трубы прессованные латунные для колец синхронизатора : Стандарт организации - Тольятти : АО "АвтоВАЗ", 2016 - 25 с.

40. Шмыров С.С. Использование трибоакустической эмиссии для контроля качества поверхностей трения / С.С. Шмыров, И.Д. Ибатуллин, А.А. Минаев, А.В. Скользнев, А.В. Иващенко // Машиностроение и машиноведение / ред. Известия Самарского научного центра Российской академии наук - г. Самара, 2016. - т. 18, вып. 4 - С.383-388.

41. ASTM G 99. Стандартный метод испытания на износ с использованием штифтодисковой машины : стандарт Амереканского общества испытаний и материалов : дата введения 2000-05 / Комитет ASTM G02 по износу и эрозии. – Изд. Официальное. – Германия : Beuth Verlag GmbH, 1996 – 12 с.

42. IVF SmartQuench [Электронный ресурс] - URL : https://www.semanticscholar.org/paper/ivf-SmartQuench (дата обращения 20.10.2024).

43. ISO 9950. Промышленные закалочные масла. Определение характеристик охлаждения : Международный стандарт : дата введения 1995-05-01 / Международная организация по стандартизации. – Изд. Официальное. – Швейцария, 1996 – 12 с.

44. OBLF QSG 750-II - оптико-эмиссионный спектрометр [Электронный ресурс] - URL: https://patents.google.com/patent/RU2764687C1/ru (дата обращения 19.10.2024).

45. Matucha H, Becker H.-J. und Bernd Mittelbach.Verbesserte Wercstoffe fur Synchronzing. ATZ Automobitechnische Zeitschrift. № 5 (83). 1981. P. 227-230.

Приложение А

Изменение микроструктуры после 4 часов старения

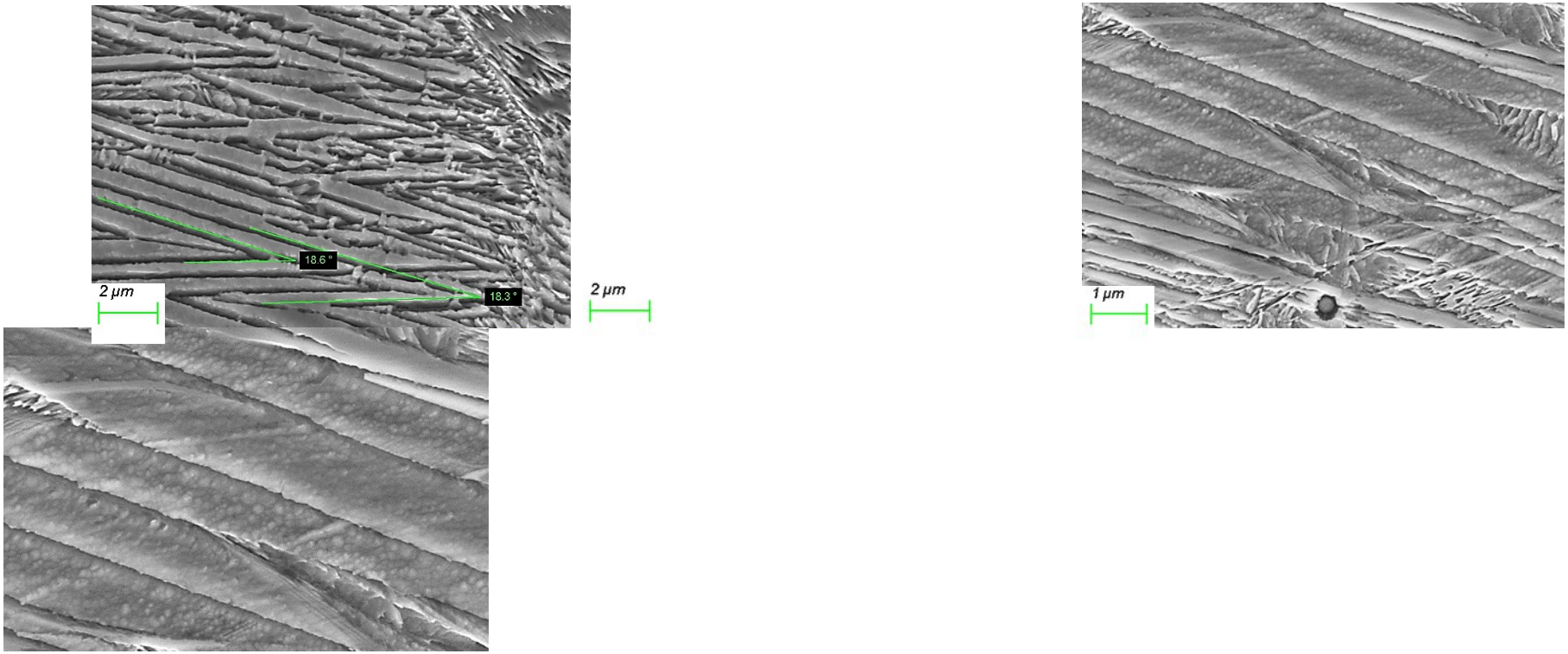


Рисунок А.1 – Закалка в воде: увеличение параметров пластин, начало образования высокодисперсных включений Í10 000; Í18 000

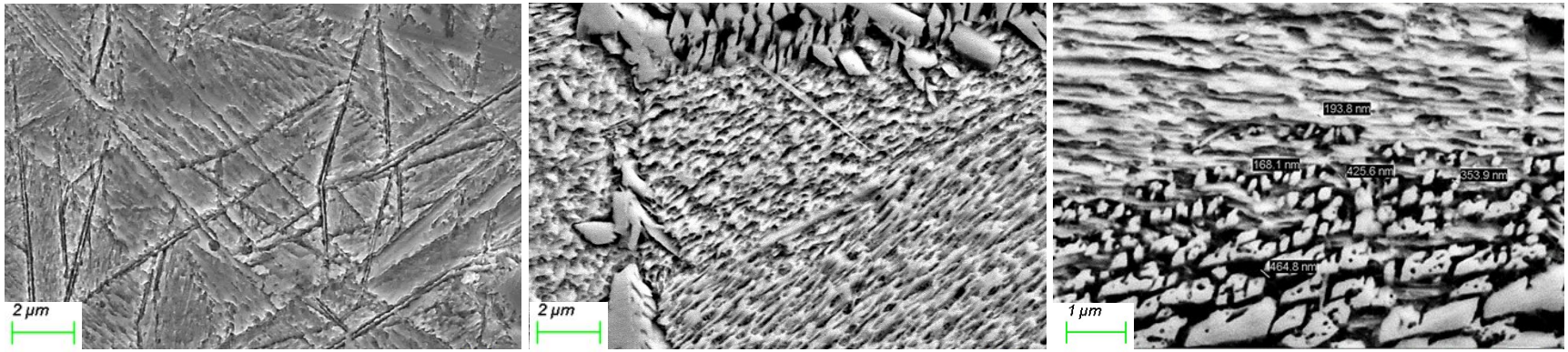


Рисунок А.2 – Закалка в 10 % растворе: формирование мелкодисперсной фазы между пластинами β-фазы

Í10 000; Í18 000