

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Климановой Анастасии Михайловны «Влияние легирования фосфором
на структурное состояние и свойства многокомпонентных латуней»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.17. Материаловедение

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Актуальность исследования обусловлена комплексом технологических и экологических задач современной автомобильной промышленности. Диссертационная работа Климановой А.М. посвящена повышению износостойкости, трещиностойкости и структурной стабильности кремнемарганцевых многокомпонентных латуней системы Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Si за счет управления фазовым состоянием и дозированного легирования фосфором. Результаты работы имеют существенное значение для повышения надежности деталей пар трения и элементов автомобильных трансмиссий, в частности кованных заготовок колец синхронизаторов, поскольку позволит сократить количество брака при производстве, связанного с растрескиванием при горячей деформации и быстрым износом латунных колец.

Необходимость разработки многокомпонентных латуней, не содержащих свинец, также является актуальной задачей и отвечает современным требованиям к экологической безопасности и технологичности. В этом контексте рассмотрение фосфора не только как вредной примеси, но и как легирующего элемента является обоснованным и значимым практическим направлением исследований.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей влияния фосфора (до 0,50 %масс.) на соотношение α - и β -фаз, морфологию фосфидных, силицидных и сложных фосфорсодержащих включений в многокомпонентных латунях системы Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Si. Установлены различия в термической стабильности фосфидов (до 750 °С) и силицидов (до 700 °С), а также продемонстрировано перераспределение легирующих элементов между твёрдым раствором и вторичными фазами. Эти результаты расширяют представления о кинетике фазовых превращений в сложнолегированных медно-цинковых сплавах и позволяют управлять структурной стабильностью материала.

Установленное протекание сдвигового механизма превращения при содержании фосфора около 0,10 %масс., обусловленного формированием метастабильной пластинчатой α -фазы имеет существенное научное и практическое значение, т.к. способствует повышению твердости до 210 HRV без применения традиционной закалки и расширяет область применения латуней.

Полученные результаты имеют научную значимость для развития представлений о фазовых превращениях в сложнолегированных медных сплавах. В работе прослеживается связь между химическим составом, структурным состоянием, технологическими свойствами и

Структурным
эксплуатационной
"29" 05. 2026

Вход №

5/11

С отзывом согласована 29.05.2026

работоспособностью материала, что позволяет перейти от эмпирического подбора состава к более целенаправленному конструированию фосфорсодержащих латуней.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Практическая значимость работы подтверждена актом внедрения разработанных технических условий (ТУ48.43.31-001-00232934-2025), технологического регламента горячей деформации, термической обработки и системы контроля химического состава и микроструктуры фосфорсодержащих латуней на производственной площадке АО «АВТОВАЗ», а также патентом на изобретение РФ № 2025120619.

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выводы по работе подтверждаются достаточно широким набором экспериментальных данных, полученных с использованием современных стандартизированных методик исследования, аттестованного исследовательского оборудования и приборов, а также применением методов статистической обработки результатов и оценкой погрешностей при исследовании многокомпонентных латуней. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными.

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 171 наименования и двух приложений. Работа изложена на 129 страницах, включает 47 рисунков и 25 таблиц. Структура диссертации соответствует поставленной цели и позволяет последовательно раскрыть как научную, так и прикладную стороны исследования.

Во введении. Обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет работы, приведены положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературных данных по формированию структуры и свойств сложнолегированных латуней, проанализировано влияние отдельных легирующих элементов на фазовый состав и морфологию включений. Обоснована перспективность дозированного легирования фосфором как метода управления структурной стабильностью и эксплуатационными характеристиками сплавов системы Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Si.

Во второй главе описаны объекты исследований, методики изготовления образцов, химического, металлографического и трибологического анализов, режимы термической обработки, а также оборудование, использованное для получения экспериментальных данных. Приведена оценка источников погрешностей и неопределённостей измерений, что обеспечивает достоверность и воспроизводимость представленных результатов.

В третьей главе установлены закономерности влияния примесного фосфора на структурно-фазовое состояние промышленной латуни ЛМцАЖН и выявлены различия в термической стабильности фосфидных и силицидных

включений в интервале температур горячей деформации. Показано, что фосфиды $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{P}$ сохраняют морфологическую устойчивость до $750\text{ }^\circ\text{C}$, тогда как силициды начинают растворяться уже при $700\text{ }^\circ\text{C}$. Установленная устойчивость частиц $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{P}$ является важным результатом для понимания механизмов формирования технологической устойчивости материала.

В четвертой главе оценено влияние легирования многокомпонентных латуней фосфором (до $0,50\%$ масс.) на соотношение α и β -фаз, морфологию выделений и твердость экспериментальных сплавов в литом состоянии и после стабилизирующего отжига. Выявлен аномальный рост твердости при $0,10\%$ масс. P, связанный с формированием метастабильной пластинчатой α -фазы, и установлено дисперсионное упрочнение сплава с $0,50\%$ масс. P после отжига при $430\text{ }^\circ\text{C}$.

В пятой главе представлены результаты промышленной апробации разработанных фосфорсодержащих латуней: обоснованы составы новых марок (ЛМцАЖНФ, ЛМцАЖНФ1, ЛМцАЖКФС), разработаны технические условия и технологические регламенты, подтвержденные актами внедрения на АО «АВТОВАЗ». Сравнительные трибологические испытания продемонстрировали снижение объемного износа на 48% в смазочной среде для сплава с $0,50\%$ масс. P относительно промышленного аналога. Проведена оценка обрабатываемости резанием. Эта глава подтверждает прикладную направленность диссертации и связь полученных научных результатов с технологией производства.

В заключении сформулированы основные выводы, отражающие решение поставленных задач. Выводы согласуются с материалами глав и подтверждают достижение цели диссертационного исследования.

СООТВЕТСТВИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ УКАЗАННОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение. Работа направлена на установление закономерностей формирования структуры, фазового состава и свойств металлических материалов, а также на разработку способов повышения их технологических и эксплуатационных характеристик. Полученные результаты относятся к области физико-химических и физико-механических процессов в материалах и к созданию материалов с заданным комплексом свойств.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

При общей положительной оценке диссертации следует отметить следующие замечания и вопросы:

1. Из диссертации не ясно, как были выбраны концентрации добавок фосфора в многокомпонентную латунь и как учитывается возможная неоднородность его распределения в слитке.

2. В диссертации рассматривается снижение склонности фосфорсодержащих латуней к растрескиванию при горячей деформации. Однако методика оценки носит преимущественно качественный характер. Для большей убедительности было бы полезно привести более формализованный критерий

такой оценки: количество исследованных слитков, условия определения трещин, предельные деформации и характер разрушения.

3. Фактический состав латуни ЛМцАЖН, представленный в таблице 14 (стр. 62) отличается от регламентированного состава латуни по ТУ, представленного в таблице 2 (стр. 40). В частности, фактическое содержание Cu в сплаве составляет 53,66 %масс., а Ni – 0,52 %масс., тогда как в ТУ указаны диапазоны содержания легирующих элементов: Cu 59,0-60,5%масс, Ni 0,3-0,5%масс. Влияние отклонения состава по Cu от нормативного по ТУ на дальнейшие результаты исследования требует дополнительного разъяснения, которое отсутствует в работе.

4. На стр. 49 автор указывает, что достижение единства условий получения образцов достигалось за счет заливки приготовленного расплава в стальные кокилы комнатной температуры, однако при этом не указывается, при какой температуре производилась заливка металла, сколько плавов было выполнено, какие параметры имел кокиль (размер, толщина стенки, материал и т.д.). По тексту работы (стр. 48) приводится только температура проведения плавки, которая составляет 950 °С. Это делает невозможным повторение эксперимента по получению образцов. Для достижения единства измерений и воспроизводимости результата следовало указать скорость охлаждения, при которой были получены экспериментальные образцы, т.к. она является наиболее важным параметром для формирования размера фаз и их морфологии.

5. Объяснение результатов повышения твердости при добавлении 0,1 %масс. Р протеканием сдвигового превращения основано на результатах сканирующей электронной микроскопии и литературных данных. Для надежного подтверждения протекания сдвигового превращения при добавлении 0,1 % масс Р требуется проведение рентгеноструктурного анализа (РСА) и исследования с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

6. Результаты испытания на износ носят качественный характер. Испытания на износ проведены не по стандартной методике. Автор указывает, что испытания проводились в условиях, приближенных к работе колец синхронизатора при нагрузке 600 Н и скорости вращения шпинделя 1350 мин⁻¹. При этом не приводятся данные по параметру шероховатости контробразца, условиях приработки пары трения и параметров окончания измерения. Указывается только длительность проведения испытания – 15 минут. При стандартных методиках антифрикционных испытаний режим стабилизации режима трения (приработки) может достигать нескольких часов. Для количественного сравнения опытных сплавов рекомендуется использовать стандартизированные методики испытаний.

7. Работа содержит неточности, в частности в приложении 1 «Технические условия ТУ 48.43.31-001-00232934-2025» на стр. 125 в разделе 4.3 требования к твердости приводятся в значениях по Виккерсу (HV30), тогда как в разделе 6.4 указано, в качестве метода испытания твердости по ГОСТ 9012 (метод Бринелля) с указанием единицы измерения по Роквеллу (HRB).

8. В диссертационной работе подробно исследованы химический состав, морфология и термическая стабильность включений в латуни, однако, не проведена оценка их объемной доли в исходном сплаве и влияние на объемную долю включений дополнительного легирования фосфором. Объемная доля

включений может оказывать значительное влияние на механические, трибологические и эксплуатационные свойства латуни.

9. Из работы не ясен принцип выбора материалов для сравнения обрабатываемости резанием и износостойкости (сухое трение и в среде масла). Например, сравнение обрабатываемости резанием проводится для сплавов ЛМцФЖКС и ЛМцФЖКФС, тогда как сравнение износостойкости при сухом трении проводится для сплавов ЛМцАЖКС, ЛМцАЖН, ЛМцАЖКФС и ЛМцАЖНФ1. Испытаниям на износ в масле подвергались только ЛМцФЖКС и ЛМцФЖКФС.

10. Графический материал работы оформлен некачественно: на рисунке 3 (а и б) представлены зависимости объёмной доли фаз и силицидов в латуни от содержания железа. При этом оси графиков подписываются по-разному: «количество фаз, об. %» (рис. 3а) и «объёмная доля, %» (рис. 3б); на рисунке 4а, 12, 17, 44 отсутствуют подписи оси ординат; на рисунках микроструктур 9, 10, 11, 13, 14, 15, 28 практически не читается объект-микрометр.

Высказанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы. Они касаются главным образом уточнения отдельных методических и производственно-технологических аспектов и могут быть учтены при дальнейшем развитии темы.

ОФОРМЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями. Текст написан грамотным научно-техническим языком, иллюстративный материал в целом достаточен для восприятия результатов. Таблицы, рисунки и выводы логически связаны с основным содержанием исследования. Принципиальных замечаний к оформлению работы не имеется.

ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ и журналах, индексируемых в международной базе Scopus. Материалы диссертации прошли апробацию на российских и международных научных конференциях, а также отражены в патентных материалах. Это свидетельствует о достаточной полноте представления результатов научному сообществу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Климановой Анастасии Михайловны на тему «Влияние легирования фосфором на структурное состояние и свойства многокомпонентных латуней» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача установления закономерностей влияния фосфора на структуру и свойства сложнолегированных латуней и предложены подходы к их практическому применению.

Полученные результаты обладают научной новизной, имеют практическую значимость и подтверждены комплексом экспериментальных данных. Содержание диссертации соответствует специальности 2.6.17. Материаловедение. Работа отвечает требованиям пп. 9-14 Положения о порядке

присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842.

Из вышеизложенного следует, что **Климанова Анастасия Михайловна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности **2.6.17. Материаловедение**.

На обработку персональных данных, связанных с защитой диссертационной работы Климановой Анастасии Михайловны, согласен.

Официальный оппонент,

Доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»,

кандидат технических наук

22.05.2026 г.

А
У

Титов Андрей Юрьевич

ПОДПИСЬ _____ ЗАВЕРЯЮ _____
Проректор по безопасности _____
и общим вопросам _____
НИТУ МИСИС _____ И.М. Исаев



Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 4, стр. 1

Телефон: +7 (495) 638-46-37

Адрес электронной почты: titov.ay@misis.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»