

На правах рукописи



Климанова Анастасия Михайловна

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ФОСФОРОМ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И
СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЛАТУНЕЙ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Выбойщик Михаил Александрович

Официальные оппоненты:

Пугачева Наталия Борисовна - д.т.н., доцент, главный научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург

Титов Андрей Юрьевич - к.т.н., доцент, доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва

Ведущая организация: ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург

Защита состоится «19» июня 2026 г., в 13 час. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»: <https://d99203902.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара ул. Молодогвардейская, д. 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета,
к.т.н., доцент



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Многокомпонентные латуни, благодаря сочетанию уникальных свойств (прочности, упругости, износостойкости и пластичности) широко используются в разных отраслях промышленности, в частности для производства трансмиссий. Основные трудности в использовании латунных материалов связаны с их низкой технологичностью и износостойкостью, что проявляется в склонности к растрескиванию на стадии формообразования (горячая и холодная штамповка) и в процессе эксплуатации при высоких силовых нагрузках. Токсичность свинецсодержащих латуней также не способствует их распространению. Требуются качественно новые решения по разработке многокомпонентных латуней с более высокими технологическими и эксплуатационными свойствами.

Основной вклад в изучение диаграмм состояния, структурообразования и свойств многокомпонентных латуней внесли отечественные исследователи Логинов П.Н., Колацев В.А., Елгарин В.И., Ливанов В.А., Антипов В.В., Котляров И.В., Пугачёва Н.Б., Святкин А.В., Xiao Z., Callcut V., Nielsen W.D. и другие отечественные и зарубежные учёные, определившие направление проводимых работ.

В настоящее время для латуней отсутствуют надёжные представления о связи состава, структурного состояния и свойств. В частности, фосфор традиционно рассматривается в латунях, как вредная примесь из-за склонности вызывать межкристаллитное разрушение. Однако, накопленный опыт использования фосфора в бронзах и его способность образовывать крупные упрочняющие включения, стабилизирующие структурное состояние, позволяют предположить положительное воздействие фосфора на свойства многокомпонентных латуней.

Таким образом, разработка фосфорсодержащих латуней для создания современных экобезопасных материалов, сочетающих износостойкость, структурную стабильность и трещиностойкость при горячей обработке весьма **актуальна**.

Объект исследования. Кремнемарганцевые многокомпонентные латуни, содержащие алюминий, железо и свинец, а также экспериментальные сплавы с дозированным содержанием фосфора (0,05–0,50 мас.%).

Предмет исследования. Закономерности влияния легирования фосфором (в диапазоне 0,05–0,50 мас.% и при примесных концентрациях 0,005–0,01 мас.%) на структурно-фазовые превращения и свойства многокомпонентных латуней.

Цель работы. Повышение износостойкости, трещиностойкости и структурной стабильности кремнемарганцевых многокомпонентных латуней на основе дозированного легирования фосфором.

Для реализации указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести комплексный структурный и фазовый анализ промышленных латуней ЛМцАЖН и ЛМцАЖКС, используемых для изготовления колец синхронизатора коробки передач.
2. Исследовать изменение структурных составляющих промышленных латуней ЛМцАЖН и ЛМцАЖКС при нагреве в интервале температур горячей деформации.
3. На основе исследуемых латуней изготовить экспериментальные сплавы с варьируемым содержанием фосфора в диапазоне 0,05–0,50 мас.% и оценить воспроизводимость результатов на трёх комплектах образцов.
4. Исследовать взаимодействие фосфора и кремния в изучаемых сплавах. Оценить влияние концентрации фосфора на химический состав твердого раствора и упрочняющих фаз.
5. Оценить влияние структурных изменений, вызванных легированием фосфором, на механические (твёрдость), технологические (обрабатываемость резанием, склонность к растрескиванию при горячей деформации) и эксплуатационные (износостойкость) свойства сплавов.
6. Разработать техническую документацию для промышленного внедрения фосфорсодержащих латуней: технические условия и регламент изготовления деталей; систему контроля качества.

Методы исследования

Использовали методологию научных исследований, применяемую в материаловедении, в частности комплекс современных методов исследований микроструктуры, фазового рентгеноструктурного анализа, локального анализа химического состава и механических свойств, что позволило получить достаточно полную информацию о связях состава и структурного состояния с прочностными, технологическими и эксплуатационными свойствами многокомпонентных латуней. Экспериментальные исследования выполнены аттестованными лабораториями по стандартным и международным методикам с компьютерной обработкой полученных результатов.

Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечивается: применением различных методов и достаточным объемом исследований свойств и структурного состояния металла; сходимостью результатов, полученных при лабораторных и промышленных испытаниях; соответствием результатов и выводов основным положениям современных представлений материаловедения. Выполнен системный анализ источников погрешностей и неопределённостей при исследовании многокомпонентных латуней, результаты которого сведены в таблицы и использованы при интерпретации экспериментальных данных. Диссертационное исследование соответствует пунктам 1,2,3,4,7 паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение.

Научная новизна:

1. Установлено, что увеличение содержания фосфора от 0 до 0,50 мас.% в кремнемарганцевых многокомпонентных латунях сопровождается ростом доли α -фазы с 10 до 50% в литом состоянии и с 30 до 80% после стабилизирующего отжига (430 °С, 3,5 ч).

2. Выявлено, что при содержании фосфора 0,10 мас.% реализуется сдвиговой механизм превращения $\beta \rightarrow \alpha$ с формированием метастабильной пластинчатой α -фазы, обеспечивающей аномально высокую твёрдость (≈ 210 HV30).

3. Различия в температурной устойчивости основных типов включений в условиях горячей деформации: растворение силицидных включений начинается при 700 °С, тогда как фосфидные включения (Fe,Mn)₃P сохраняют морфологическую стабильность до 750 °С.

4. Показано, что при легировании фосфором ($\geq 0,15$ мас.%) изменяются состав и морфология силицидных включений системы (Fe,Mn)-Si с образованием фосфорсодержащих фаз. Это сопровождается перераспределением кремния: его содержание в β -фазе возрастает с 0,18–0,20 % (в образце без фосфора) до 0,35–0,40 % (при 0,50 % P) на фоне одновременного обеднения кремнием фосфидных включений.

5. Экспериментально установлено, что при содержании фосфора 0,50 мас.% стабилизирующий отжиг (430 °С, 3,5 ч) вызывает дисперсионное выделение силицидов системы Mn-Fe-Si, обеспечивающее повышение твёрдости на 29% (с 169 до 213 HV30).

Практическая значимость:

1. Разработаны и внедрены в АО «АВТОВАЗ» Технические условия ТУ 48.43.31 - 001 - 00232934-2025 на кованные латунные заготовки для колец синхронизаторов с регламентированным содержанием фосфора (0,08–0,12% для ЛМцАЖНФ; 0,15–0,25% для ЛМцАЖНФ1; 0,40–0,55% для ЛМцАЖКФС), устанавливающие требования к химсоставу, твёрдости и микроструктуре. Документ используется при приёмке и контроле в производстве (акт внедрения от 09.10.2025).

2. Созданы и внедрены в производство АО «АВТОВАЗ» технологические регламенты обработки фосфорсодержащих латуней (акт от 09.10.2025), включающие режимы горячей деформации (≤ 750 °С) и термообработки, нормирующие соотношение α/β -фаз и твёрдость 165–213 HV30.

3. Разработана система контроля качества фосфорсодержащих латуней, основанная на металлографическом анализе структуры, обеспечивающая стабильность состава готовой

продукции. Фосфор включён в процедуру одобрения химического состава как фактор, значимо влияющий на свойства сплавов. Система внедрена в лаборатории ОТМиТО УЛИР АО «АВТОВАЗ» (подтверждено актом внедрения от 09.10.2025) и используется при контроле заготовок и сертификации опытных партий.

4. Поданы патентные заявки (№ 2025120619 от 25.07.2025 и № 2025120267 от 23.07.2025) на составы многокомпонентных латуней с содержанием фосфора 0,2 и 0,5%, обеспечивающие сочетание высоких значений обрабатываемости, прочности и износостойкости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Количественные закономерности влияния содержания фосфора (0–0,50 мас.%) на соотношение α/β -фаз и морфологию включений в многокомпонентных латунях (рост доли α -фазы до 50% в литом состоянии и до 80% после стабилизирующего отжига).

2. Установленные интервалы термической стабильности включений при нагреве в диапазоне горячей деформации: начало растворения силицидов при 700 °С и сохранение стабильности фосфидных включений $(Fe, Mn)_3P$ до 750 °С.

3. Выявленный эффект легирования фосфором в количестве 0,10 мас.‰: формирование метастабильной пластинчатой α -фазы с повышенной твёрдостью (до 210 HV30) без применения традиционной закалки.

4. Экспериментально подтверждённые преимущества разработанных сплавов по износостойкости и технологичности, включая снижение объёмного износа в смазке GL-4 75W-90 до 48% для сплава с 0,50 мас.‰ P, а также предложенные режимы горячей деформации и стабилизирующего отжига.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 24 таблицы, 47 рисунков и список литературы, включающий 171 наименование.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на XIV Всероссийской школе-конференции молодых учёных с международным участием «КоМУ-2022» (г. Ижевск, 2022 г.), XI и XII Международных школах «Физическое материаловедение» (г. Тольятти, 2023 и 2025 г.), XXIII Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов – молодых учёных (г. Екатеринбург, 2025 г.), а также на Международной научно-практической конференции «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (г. Тольятти, 2025 г.).

Публикации: Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в пяти научных изданиях рецензируемых ВАК РФ и журналах из базы цитирования Scopus. По результатам исследований получено положительное решение о выдаче патента РФ.

Личный вклад автора: Все эксперименты и испытания выполнены при участии автора. Им сформулированы цели и задачи исследования, проведён анализ и обобщение литературных источников по теме, разработаны методики и выполнен комплекс экспериментальных исследований. Автор осуществил обработку, систематизацию и интерпретацию полученных данных, сформулировал основные положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, а также подготовил практические рекомендации для промышленного применения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности исследования, определены цель и задачи работы, раскрыта её научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Аналитический обзор. Особенности формирования структуры и свойств сложнолегированных латуней.

Свойства многокомпонентных латуней определяются соотношением α - и β' -фаз и легирующими элементами (Al, Fe, Si, Mn, Pb и др.), которые формируют многочисленные

включения. Показана роль каждого элемента в формировании структуры и свойств. Свинец улучшает обрабатываемость, но экологически нежелателен. В Европе его пытаются заменить фосфором, повышающим коррозионную стойкость и износостойкость при содержании 0,4–1,6%. Фосфор в малых количествах (0,05–0,2%) упрочняет и стабилизирует фазовый состав. Его взаимодействие с Mn и Fe формирует устойчивые фосфиды и меняет состав силицидов, что повышает температуру рекристаллизации и стабильность структурного состояния.

Наиболее высокие свойства обеспечивают кремнемарганцевые латуни с упрочняющими силицидами Mn_5Si_3 , применяемые для изготовления колец синхронизаторов. Однако для них характерна нестабильность структуры, склонность к образованию трещин при горячей деформации и низкая износостойкость в условиях высоких силовых нагрузок. Современные тенденции связаны с созданием бессвинцовых латуней с легированной фосфором системой (Mn,Fe)-Si. По результатам анализа сформулирована цель работы и задачи исследований.

Глава 2. Материалы, методики и оборудование для исследований.

Объектами исследования являлись промышленные сплавы ЛМцАЖН и ЛМцАЖКС, применяемые для изготовления деталей трансмиссий и опытные сплавы, легированные фосфором в диапазоне 0,05–0,50%. Усреднённый химический состав исследуемых сплавов представлен в таблице 1. Состав промышленных латуней приведён по ТУ 184550-106-033-97 на поставку, где наличие фосфора не контролируется. Постоянный входной анализ состава плавок показал, что фосфор находится в пределах от 0,005% до 0,01%.

Таблица 1 - Химический состав исследуемых латуней

№	Определяемые элементы, массовая доля, %									
	Cu	Zn	Mn	Al	Fe	Si	Pb	Ni	Sn	P
Промышленные марки ЛМцАЖН (1) и ЛМцАЖКС (2)										
1	59,0-60,5	ост.	3,0-4,0	2,0-2,6	0,3-0,7	≤0,1	≤0,15	0,3-0,5	≤0,2	0,005-0,01
2	69,5-71,5	ост.	6,5-7,5	5,0-6,0	1,4-2,4	2,00	0,6-1,2	≤0,1	≤0,1	0,005-0,01
Базовый сплав										
3	65,64	24,97	3,21	3,05	1,29	0,50-1,1	0,56	0,29	0,10	0,00
Фосфорсодержащие сплавы										
4	65,95	24,60	3,20	3,08	1,35	0,87	0,57	0,25	0,12	0,05
5	65,00	25,63	3,20	3,03	1,22	0,86	0,65	0,30	0,10	0,10
6	65,44	24,41	3,41	3,32	1,23	0,90	0,63	0,46	0,18	0,15
7	65,15	24,51	3,44	3,30	1,35	0,93	0,66	0,46	0,18	0,20
8	66,15	24,32	3,19	3,11	1,34	0,88	0,58	0,32	0,11	0,25
9	72,05	19,00	2,30	3,78	1,61	0,48	0,31	0,36	0,09	0,51

Исследуемые сплавы характеризуются близким базовым составом при варьируемом содержании фосфора (среднее содержание меди — около 65 %). Сплав с содержанием фосфора около 0,50 % отличается несколько повышенной концентрацией меди и, соответственно, пониженной — цинка, что учитывалось при интерпретации результатов: сопоставление свойств проводилось с акцентом на структурные особенности и поведение материала при стабилизирующем отжиге.

Все опытные составы представляют собой двухфазную ($\alpha+\beta$) структуру, что отвечает

промышленным тенденциям и удобно для исследований. Легирование фосфором выполнено в дозированном диапазоне концентраций: базовый состав (без фосфора) и фосфорсодержащие варианты с содержанием 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 и 0,51 % (таблица 1). Сплавы получали сплавлением латуни ЛМцАЖН и ЛМцАЖКС с добавлением фосфора в виде медной лигатуры. Плавки шихтовых материалов проводили в ротационной печи фирмы Balzers (Германия) при температуре 950°С в керамическом вращающемся тигле. Каждый сплав разливали в три тигля, что позволило получить три комплекта образцов, на каждом из которых проведён весь комплекс исследований. Это позволило снизить влияние случайных факторов и подтвердить воспроизводимость результатов. Исследования многокомпонентных латуни проводили с использованием комплекса аналитических и экспериментальных методов для изучения структуры и свойств. Химический анализ получен на спектрометре Belec Vario Lab. Металлографический анализ выполнены на световом микроскопе OLIMPUS GX 41 и на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) EV018 Carl Zeiss, оснащённом детекторами вторичных и обратнорассеянных электронов. Для элементного микроанализа использовалось программное обеспечение EDX Bruker, позволяющее проводить качественный и количественный анализ состава в различных точках образца с высоким пространственным разрешением. Термическую обработку (нагрев до 700-830°С и стабилизирующий отжиг при 430°С, соответствующие промышленным режимам горячей деформации и старения), проводили в лабораторных печах с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Твердость измеряли по Виккерсу на приборе Zwick/Roell.

Испытание на обрабатываемость резанием выполняли при сверлении с постоянным усилием подачи. Испытания на износ проводили по принятой методике при нагрузке и кинематических условиях, соответствующих работе колец синхронизатора КПП автомобилей LADA.

Проведена оценка неопределённости и погрешности каждого из используемых методов исследования. Для минимизации этих факторов применяли стандартные методики подготовки и измерений, многократные повторные измерения с последующей статистической обработкой и использовали специализированные методики.

Глава 3. Структурно-фазовые превращения и свойства многокомпонентных латуни в литом состоянии и после термической обработки

Целенаправленное повышение свойств латуни возможно на основе надёжных представлений о фазовом и структурном состоянии базового материала, которым является латунь ЛМцАЖН, используемая для изготовления колец синхронизаторов коробки передач. Микроструктура промышленной латуни ЛМцАЖН, фосфор в ней присутствует в концентрации от 0,005 до 0,01 % масс. (таблица 1), характеризуется преимущественно β -фазой с дисперсными интерметаллидными частицами. В структуре сплава выявлено шесть типов включений, отличающихся морфологией и химическим составом (таблица 2).

К первому типу относятся одиночные интерметаллиды неправильной формы размером до 1,5 мкм, соответствующие соединению $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{NiAl}$; второй тип представлен цепочками из частиц до 2 мкм и протяжённостью 10–50 мкм; третий тип составляют эллипсообразные силициды размером 2–4 мкм, соединение $(\text{Fe}, \text{Mn})_2\text{Si}$ с повышенным содержанием алюминия; четвёртый тип образуют крупные интерметаллиды неправильной формы около 3 мкм; пятый тип характеризуется крупными эллипсообразными включениями более 4 мкм состава $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$; шестой тип представлен стержневидными включениями соединения $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{P}$ с примесью кремния. СЭМ выявила гетерогенную структуру β -фазу, и морфологию включений разного типа (рисунок 1).

Химический состав различных типов включений (таблица 2) демонстрирует существенные различия в распределении элементов. Фосфор в исследуемой латуни полностью связан в химические соединения.

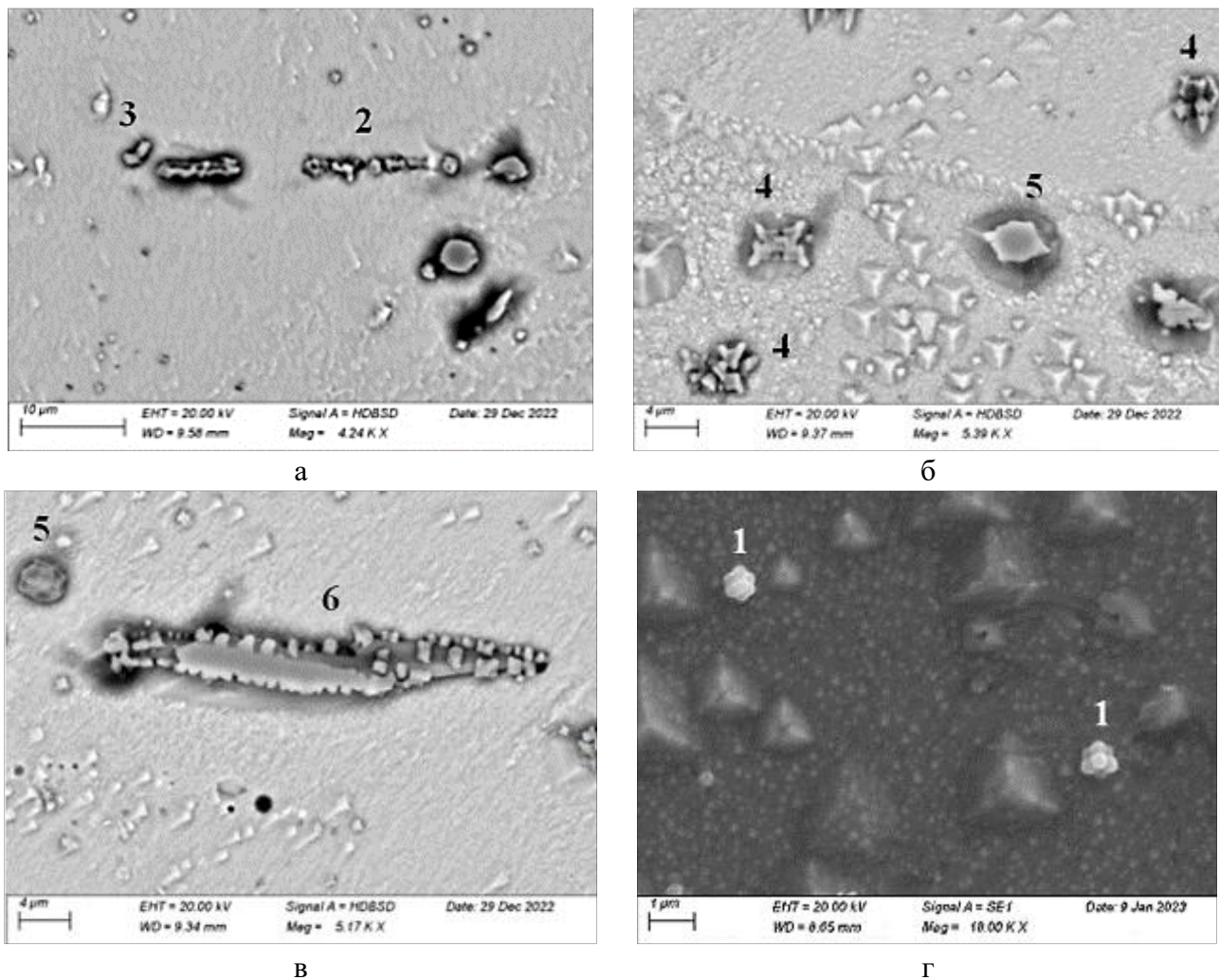


Рисунок 1 – Микроструктура заготовок латуни ЛМцАЖН: а) включения неправильной формы и округлые; б) крупные интерметаллиды неправильной формы; в) стержневидное включение; г) никелид железа-алюминия

Таблица 2 – Химический состав включений в латунных заготовках до термообработки

Тип	Морфология и усредненные размеры интерметаллических включений	Элементный состав							Тип соединения
		Al,%	Mn,%	Fe,%	Cr,%	Ni,%	Si,%	P,%	A_xB_y
1	Высокодисперсные включения правильной формы (рис. 1 г); 0,6-1,3 мкм	30,9 ± 2,6	12,1 ±1,7	45,9 ±2,0	—	10,1 ±2,3	0,9 ±0,5	—	FeNiAl
2	Цепочки из включений неправильной формы, средним размером до 2 мкм (рис. 1 а)	13,5 ±0,4	16,4 ±0,2	58,8 ±1,2	0,5 ±0,1	4,3 ±1,4	6,5 ±1,2	—	(Fe,Mn) ₃ Si совместно с FeNiAl
3	Эллипсообразные включения, размером до 4 мкм (рис. 1 а)	7,8 ±1,0	17,8 ±2,0	63,1 ±1,9	3,2 ±2,1	0,7 ±0,2	7,4 ±3,3	—	(Fe,Mn) ₄ Si
4	Крупные включения неправильной формы, средний размер 4 мкм (рис. 1 б, в)	14,2 ±2,2	14,9 ±1,7	59,7 ±3,2	0,5 ±0,1	4,8 ±1,7	6,0 ±1,7	—	(Fe,Mn) ₃ Si совместно с FeNiAl
5	Крупные эллипсообразные включения, размером более 4 мкм (рис. 1 а, б, в)	3,1 ±0,8	16,8 ±0,9	67,4 ±0,6	1,0 ±0,3	0,5 ±0,3	11,2 ±0,5	—	Fe ₄ Si
6	Стержневидные включения* (рис. 1 в)	1,7	33,5	46,2	2,9	1,3	3,0	11,5	Fe ₃ P

*- из-за небольшого количества включений приведено только среднее арифметическое значение

Основная его масса концентрируется в стержневидных включениях, тогда как в округлых силицидах его содержание незначительно. В матричном растворе и на границах зерен фосфор не обнаружен. Элементный состав стержневидных включений соответствует соединению типа $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{P}$, с примесью кремния. Электронно-микроскопические исследования с цветовой индикацией элементов (рисунок 2) подтвердили, что стержневидные включения представляют собой фосфидосилициды марганца-железа.

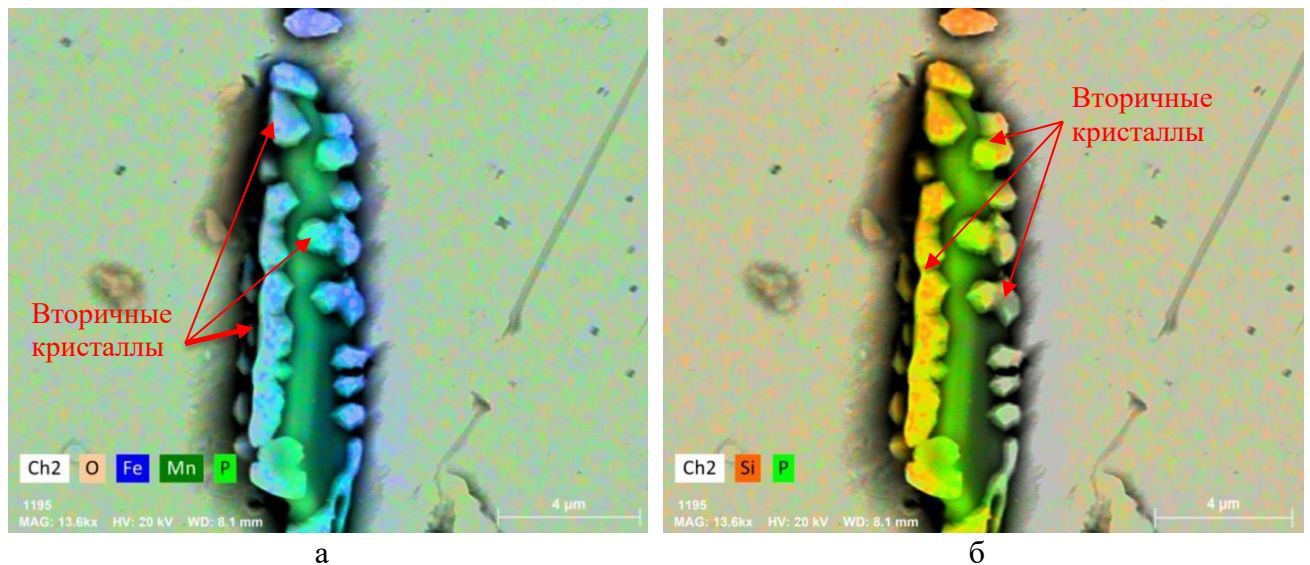


Рисунок 2 – Стержневое включение с цветovým выделением химических элементов:
а) кислорода, железа, марганца и фосфора; б) кремния и фосфора

Таблица 3 – Химический состав включений в латунных заготовках после разных температурах нагрева

Температура нагрева	Тип	Элементный состав						
		Al,%	Mn,%	Fe,%	Cr,%	Ni,%	Si,%	P,%
700° C	1	21,12±0,87	20,61±1,24	43,04±2,15	-	14,06±0,95	1,18±0,38	-
	2	4,31±0,65	16,23±0,94	66,54±1,08	1,06±0,28	1,34±0,81	10,41±1,70	-
	3, 4	5,44±0,52	15,68±0,61	66,87±1,32	0,79±0,16	1,17±0,66	10,05±1,66	-
	5	3,01±0,28	15,94±0,14	69,19±0,50	1,00±0,29	0,90±0,23	9,96±0,52	-
	6 *	0,37	32,86	41,88	2,93	1,19	3,65	17,13
750° C	1	22,79±5,74	19,08±3,62	45,17±4,31	-	10,83±5,17	2,12±1,23	-
	2	4,45±0,28	16,93±0,35	66,50±0,93	0,99±0,51	1,50±0,64	9,62±0,62	-
	3, 4	6,02±1,58	15,74±0,73	65,19±2,23	0,82±0,13	1,22±0,44	11,02±1,30	-
	5	2,50±0,90	17,25±0,69	68,76±1,12	1,24±0,37	0,82±0,32	9,15±1,18	-
	6 *	0,67	33,99	40,83	1,37	2,87	4,06	16,24
800° C	1	23,74±1,31	21,23±6,60	37,42±11,21	-	16,55±4,22	1,06±0,38	-
	2	5,97±0,95	14,49±0,75	68,40±1,45	0,74±0,14	1,44±0,84	8,97±1,43	-
	3, 4	6,88±1,45	13,98±0,62	67,32±1,18	0,68±0,18	1,06±0,44	10,06±1,49	-
	5	2,86±0,65	15,75±1,12	69,68±1,36	1,08±0,48	0,64±0,26	9,97±1,22	-
	6 *	0,40	33,58	41,32	1,35	3,07	3,95	16,33
830° C	1	21,89±3,01	22,71±6,11	38,48±14,28	-	15,87±5,83	1,03±0,87	-
	2	8,21±1,11	15,96±1,20	64,28±2,50	0,54±0,21	3,69±0,83	7,31±1,22	-
	3, 4	6,93±1,58	14,97±1,60	65,69±2,77	0,75±0,19	1,61±1,06	9,95±1,51	-
	5	3,08±0,97	15,49±0,73	70,11±0,96	0,99±0,26	0,76±0,22	9,50±0,62	-
	6 *	0,30	33,79	41,26	1,34	2,82	4,23	16,26

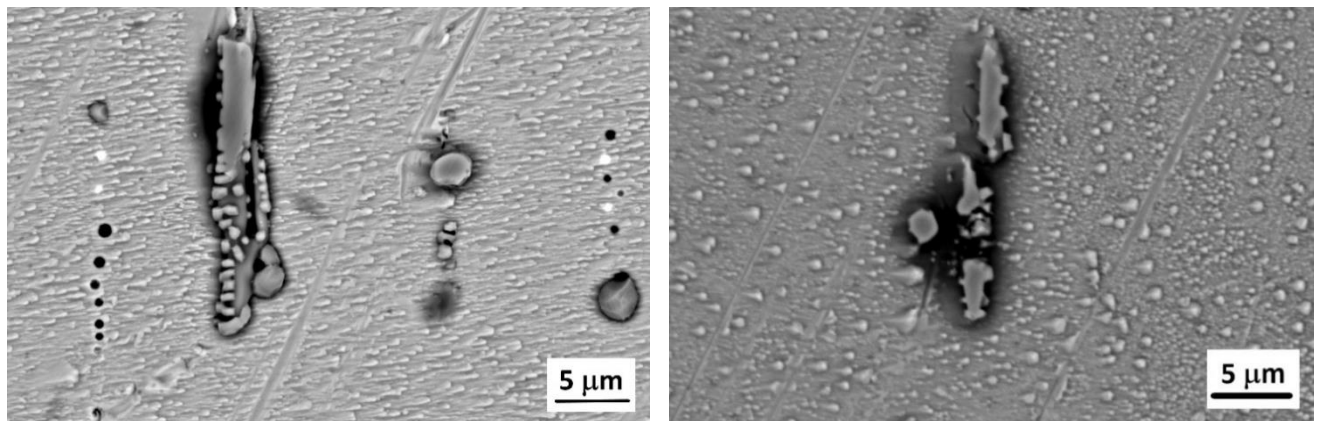
* по 6 типу стандартное отклонение не определялось, в таблице приведены только средние значения

Линейное сканирование химического состава показало четкую корреляцию фосфора и марганца, указывающую на их тесное взаимодействие (рисунок 2). Фосфор не только образует устойчивые химические соединения (фосфиды и силикофосфиды), но и определяет морфологию включений, в частности стержневидных, на поверхности которых обнаружены вторичные кристаллы.

Термическую стабильность структурного состояния исследовали в интервале температур горячей деформации (700–830 °С) с изотермической выдержкой 15 минут при 700, 750, 800 и 830 °С. Показано, что начиная с температуры 700 °С силициды растворяются и расслаиваются. Фосфидные включения стабильны до 750 °С и их заметное растворение наблюдается только при 800 °С. Фосфорсодержащие фазы стабильны вплоть до 800 °С, хотя при нагреве возникают вторичные кристаллы (таблица 3).

Нагрев до температур горячей деформации 780 °С (технология «АВТОВАЗ») приводит к разрушению и частичному растворению силицидных включений (рисунок 3) и образованию локальных зон, обогащённых фосфором (метастабильные выделения). Граница раздела матрица-выделение становится более расплывчатой. Сравнительный анализ химического состава твёрдого раствора и приграничной зоны таких выделений показал значительное различие составов (таблица 4).

Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации обработки латуней. Стабильность фосфидов при 700–750 °С повышает структурную стабильность при горячей деформации, тогда как превышение 800 °С разрушает их и ухудшает механические свойства.



а
б
Рисунок 3 – Силицидное включение: а) до нагрева;
б) после нагрева при 780 °С и выдержки 15 минут

Таблица 4 – Локальный химический состав твердого раствора после нагрева при 780° С

Область анализа	Концентрация элементов, мас, %								
	Al	Si	Mn	Cu	Zn	Fe	Ni	P	Cr
Приграничная к фосфиду	1,38	1,11	10,54	43,80	27,78	9,70	0,63	4,80	0,73
Твердый раствор β-фаза	2,47	0,18	3,34	57,72	35,41	0,32	0,47	–	–

Фосфор в концентрациях (0,005–0,01 % Р) не образует значительного количества собственных фаз, но существенно влияет на процесс формирования многочисленных включений. Для более полного понимания роли фосфора в структурообразовании латуней требуются дополнительные исследования сплавов с дозированным содержанием фосфора в широком диапазоне концентраций.

Глава 4. Влияние легирования фосфором на структуру и свойства кремнемарганцевой латуни.

Для получения информации о влиянии фосфора на структурное состояние и свойства

многокомпонентных латуней были выплавлены семь сплавов с дозированным содержанием фосфора: 0,00%, 0,05%, 0,10%, 0,15%, 0,20%, 0,25% и 0,50%, из которых изготовили три комплекта образцов для исследований.

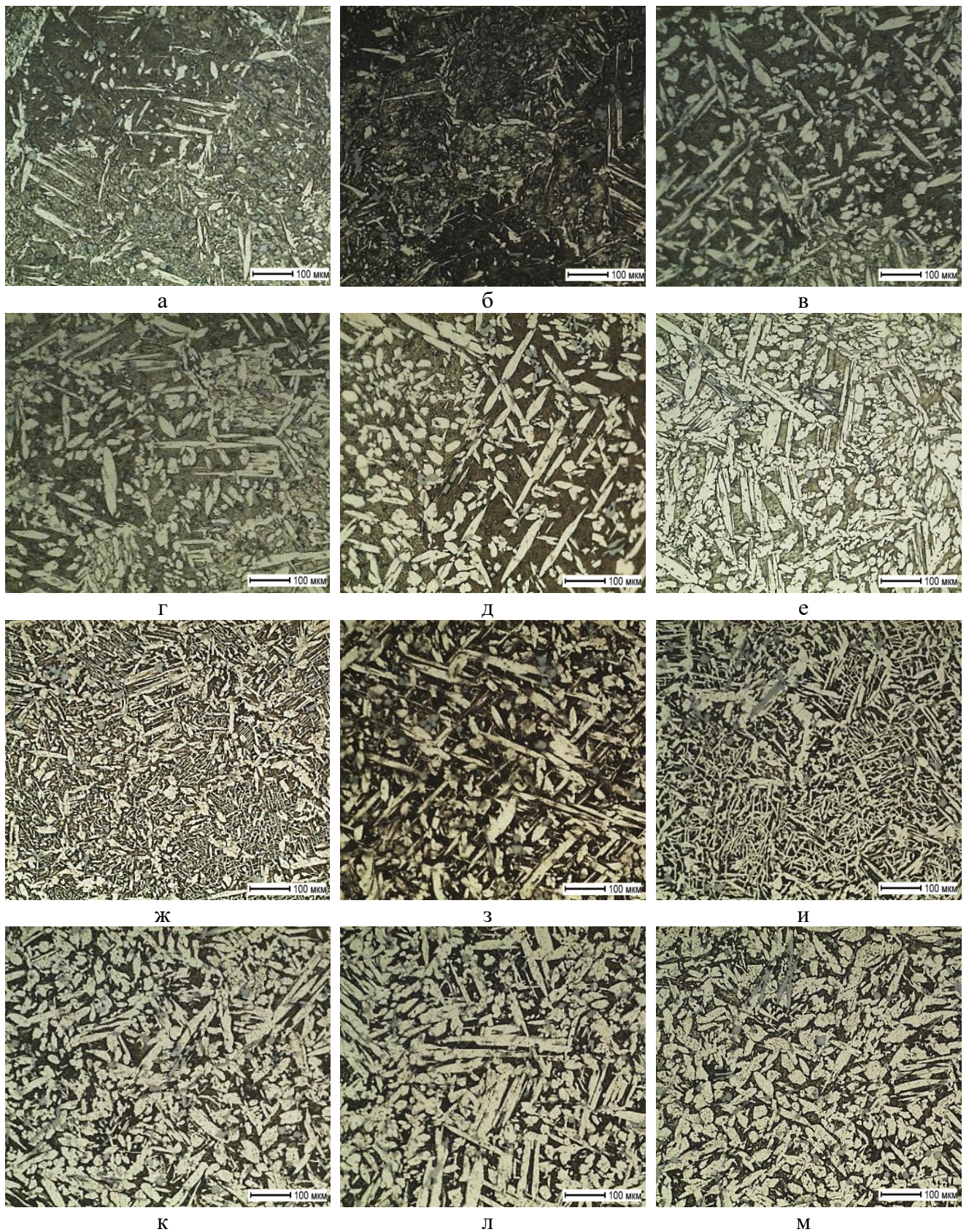


Рисунок 4 – Микроструктура образцов: а, б, в, г, д, е - сплавы с содержанием фосфора 0,00%, 0,05%; 0,10 0,15%, 0,20, 0,25, в литом состоянии; ж,з, и , к, л, м – те же сплавы после стабилизирующего отжига

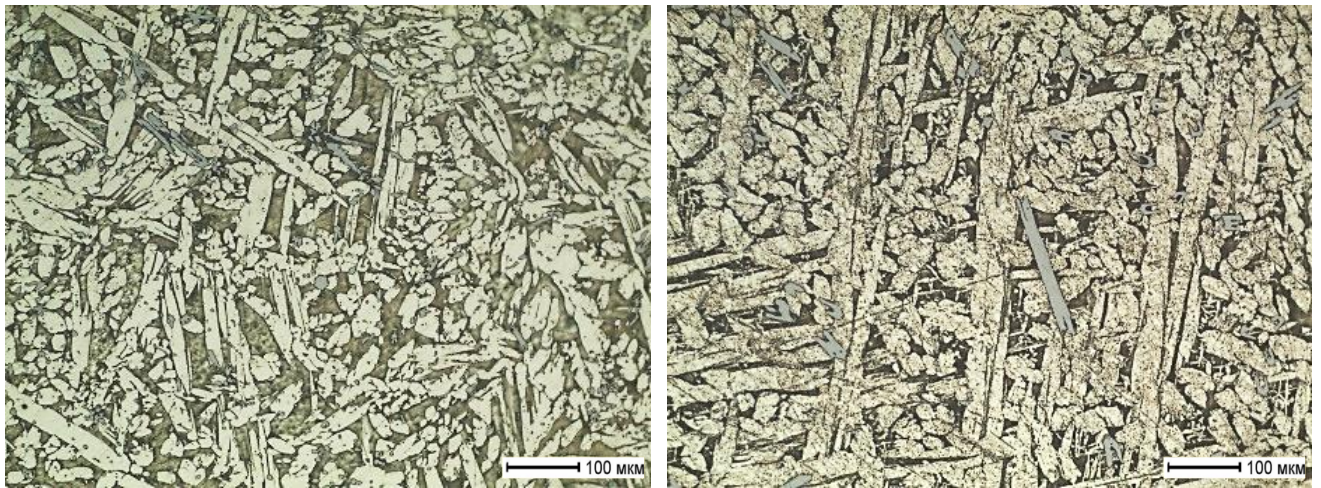


Рисунок 5 – Микроструктура образцов сплава 0,50% Р:
а- литое состояние; б- после стабилизирующего отжига

Химический состав сплавов приведён в таблице 1.

Изменение структуры латуней с ростом концентрации фосфора в литом состоянии и после стабилизирующего отжига при 430°C с выдержкой 3,5 часа (обычный промышленный режим) показано на рисунках 4 и 5.

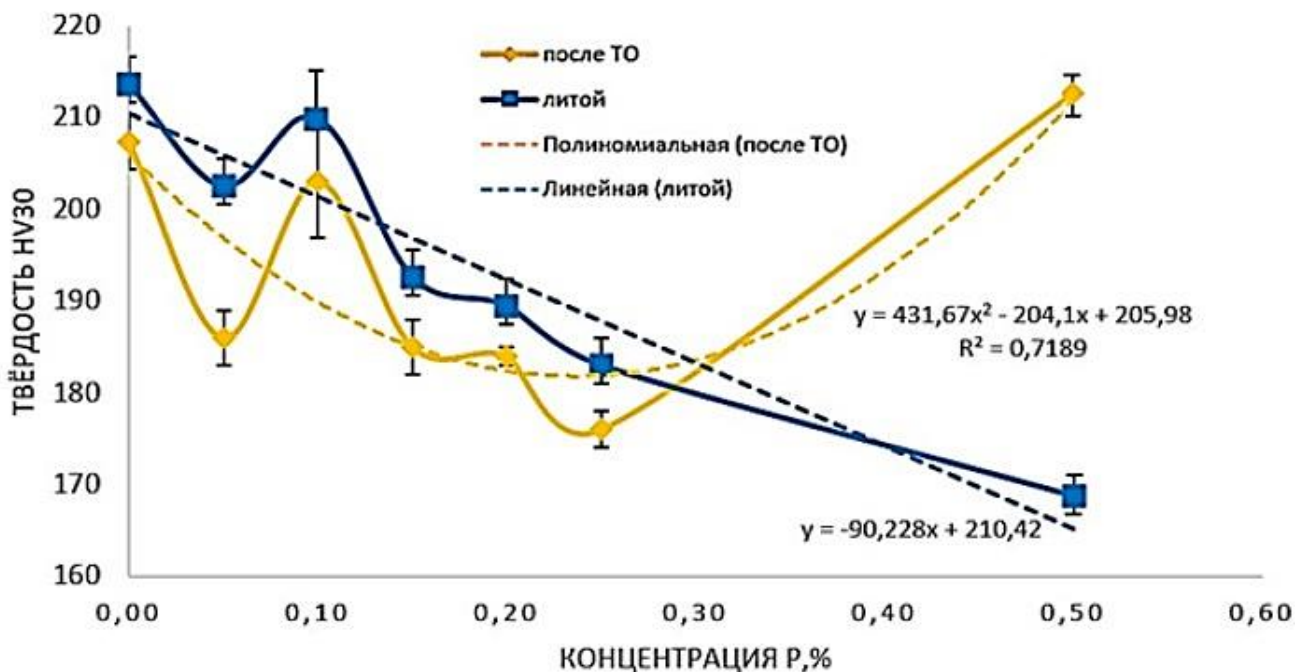


Рисунок 6 – Изменения твёрдости от содержания фосфора в литом состоянии и после стабилизирующего отжига

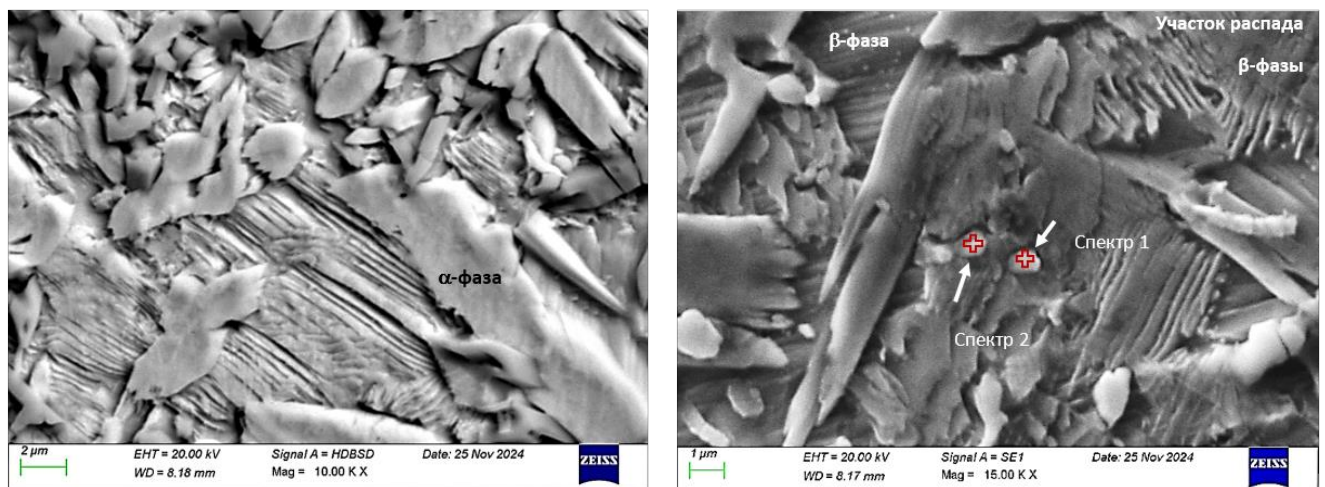
В литом состоянии базовый сплав (0% Р) характеризуется преимущественно β -фазой (90%) с незначительной долей α -фазы (10%). Введение фосфора приводит к увеличению α -фазы до 50% при 0,5% Р (таблица 5, рисунок 6). Также происходит изменение морфологии и формы интерметаллидных включений: мелкие силициды замещаются более крупными стержневидными образованиями с повышенным содержанием фосфора. Рост концентрации фосфора сопровождается снижением твёрдости литых образцов от 214 HV (0% Р) до 169 HV (0,51% Р), за исключением аномального увеличения до 210 HV при 0,10% Р (таблица 5). Это отклонение связано со сдвиговым образованием α - фазы: метастабильное состояние с высоким уровнем

остаточных напряжений. Легирование фосфором приводит к увеличению количества α -фазы, укрупнению, изменению состава включений и снижению твёрдости, что существенно влияет на износостойкость материала.

Таблица 5 – Зависимость содержания α - фазы и твёрдости сплавов от концентрации фосфора (литое состояние и после стабилизирующего отжига)

Концентрация P, %	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,50
Литое состояние							
Содержание α , %	10	20	10	30	35	40	50
Твёрдость, HV	214	203	210	193	190	183	169
После стабилизирующего отжига							
Содержание α , %	30	40	70	50	60	65	80
Твёрдость, HV	207	186	203	185	184	181	213

Более полное представление о влиянии фосфора на фазовый состав и структурное состояние многокомпонентных латуней было получено на основе использования СЭМ и локального рентгеноспектрального анализа. Небольшие добавки фосфора в сплав приводят к формированию α -фазы в виде крупных островков и участков с тонкодисперсной структурой (рисунок 7). Зафиксированы включения фосфосилицидов размером 200–800 нм, когерентные с матрицей и содержащие 4–8% фосфора (рисунок 7в). Наиболее характерные изменения проявились в сплаве с содержанием 0,10% P, где формируется α -фаза с геометрической формой бейнитных структур (полосчатое строение).



а

б

Образец	Определяемые элементы, массовая доля, %							
	Al	Si	P	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
Спектр1	2,07	9,11	4,12	23,12	13,12	36,03	12,42	—
Спектр 2	0,56	18,44	8,08	31,14	27,87	9,79	3,12	1,01

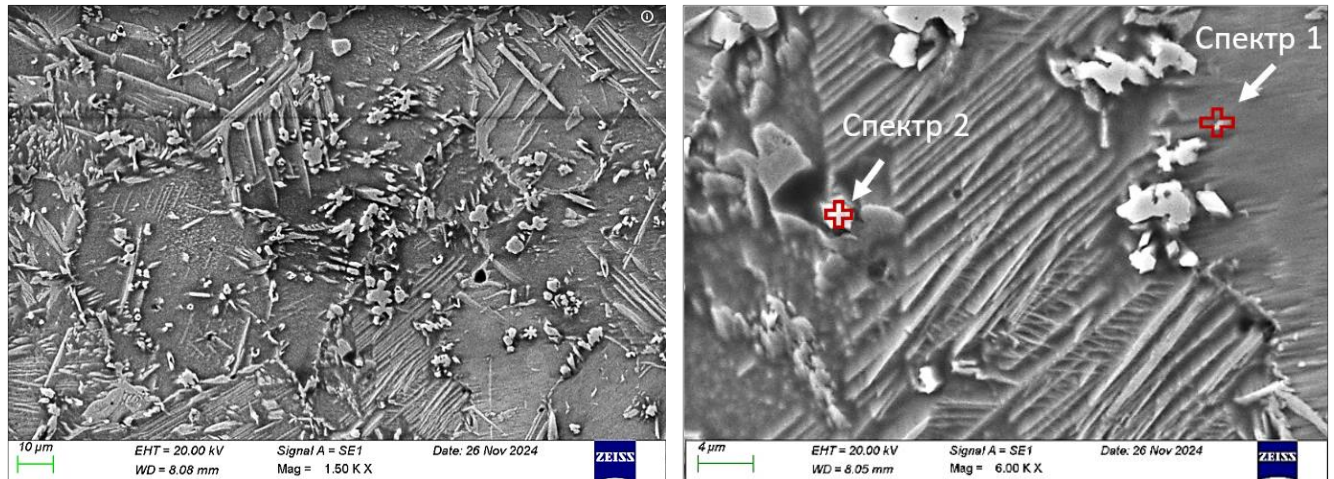
в

Рисунок 7 – Структура и состав сплава (0,05% фосфора):

а) пластины сдвигового распада β -фазы; б) фосфосилициды с указанием точек локального микроанализа; в) химический состав дисперсных включений

В литых образцах при содержании 0,10% P фосфор распределяется в двух формах: в составе крупных $(\text{Fe,Mn})_x(\text{Si,P})$ и мелких включений состава MeSi(P) , где кремний находится в избытке (рисунок 8).

С ростом концентрации фосфора (0,20-0,25%) неравновесные (бейнитные) формы α -фазы исчезают, количество мелких выделений резко уменьшается и появляются крупные стержневые включения, содержащие фосфор (рисунок 9). Фосфор вытесняет кремний из силицидных включений в твёрдый раствор, что обусловлено термодинамически более выгодным образованием фосфидов марганца и железа: их энергия Гиббса существенно отрицательнее, чем у соответствующих силицидов. Благодаря более высокому сродству к марганцу и железу фосфор формирует стабильные фосфидные соединения, высвобождая кремний в β -фазу, что подтверждается данными локального микроанализа.



Образец	Определяемые элементы, массовая доля, %						
	Al	Si	P	Mn	Fe	Cr	Ni
Спектр1	0,15	21,75	10,82	31,74	35,54	-	-
Спектр 2	-	9,05	10,82	32,53	46,62	0,12	0,86

В

Рисунок 8 – Структура и состав литого образца (0,10% P): а) сдвиговый распад β -фазы; б) фосфиды с указанием точек их анализа; в) состав дисперсных включений

Максимум структурных изменений при 0,10 % P объясняется пороговым характером распределения фосфора между фазами. При данной концентрации фосфор присутствует одновременно в двух формах: в составе крупных $(\text{Fe,Mn})_x(\text{Si,P})$ и мелких включений MeSi(P) (рисунок 8), что инициирует сдвиговый механизм распада β -фазы с образованием метастабильной пластинчатой α -фазы бейнитного типа. При увеличении содержания фосфора до 0,15 % характер структурообразования меняется: бейнитные формы α -фазы исчезают, количество мелких выделений резко сокращается, и формируются устойчивые стержневые фосфиды (рисунок 9). Таким образом, концентрация 0,10 % P соответствует переходу от сдвигового механизма фазовых превращений к диффузионному, что сопровождается сменой морфологии α -фазы и перераспределением фосфора в сторону образования стабильных фосфидных фаз.

Для изучения влияния фосфора на стабильность структурно-фазового состояния латуней, образцы подвергали стабилизирующему отжигу по производственным режимам изготовления деталей (нагрев 430°C, выдержка 3,5 часа). Структурное состояние исследуемых сплавов до и после отжига представлено на рисунках 4 и 5. Количество α -фазы и твёрдость всех сплавов в литом состоянии и после отжига приведены в таблице 5.

Стабилизирующий отжиг вызывает заметную трансформацию фазового состава сплавов: во всех образцах зафиксировано увеличение объёмной доли α -фазы и снижение твёрдости в интервале 0,00–0,25 % P (таблица 5, рисунок 5), что коррелирует с влиянием увеличения концентрации фосфора в литых образцах. Наиболее значительные структурные изменения

наблюдаются при содержании фосфора 0,10 %, где интенсивно формируются дисперсионные структуры и количество α -фазы возрастает с 10 до 70 % (рисунок 3 в, и; таблица 5, рисунок 5).

В исследуемых сплавах только при содержании фосфора 0,5% стабилизирующий отжиг приводит к росту твёрдости на 29% – с 165 до 213 HV30 (таблица 5, рисунок 6), что обусловлено дисперсионным упрочнением за счёт образования силицидов состава: 15,3% Si, 43,9% Mn и 40,1% Fe. Эти включения формируются в твёрдом растворе, пересыщенном кремнием. Они закрепляют дислокации и границы зёрен, что повышает термическую стабильность структуры и сопротивление пластической деформации. Выдержка сплава с 0,51% P при отжиге 3,5 часа обеспечивает максимальное упрочнение ($\approx 30\%$). Дальнейшее повышение времени выдержки до 5,5 часов приводит к снижению твёрдости с 213 до 177 HV30. Это свидетельствует о перестаривании: дисперсные частицы коалесцируют и сфероидизируются, что приводит к ослаблению упрочняющего эффекта.

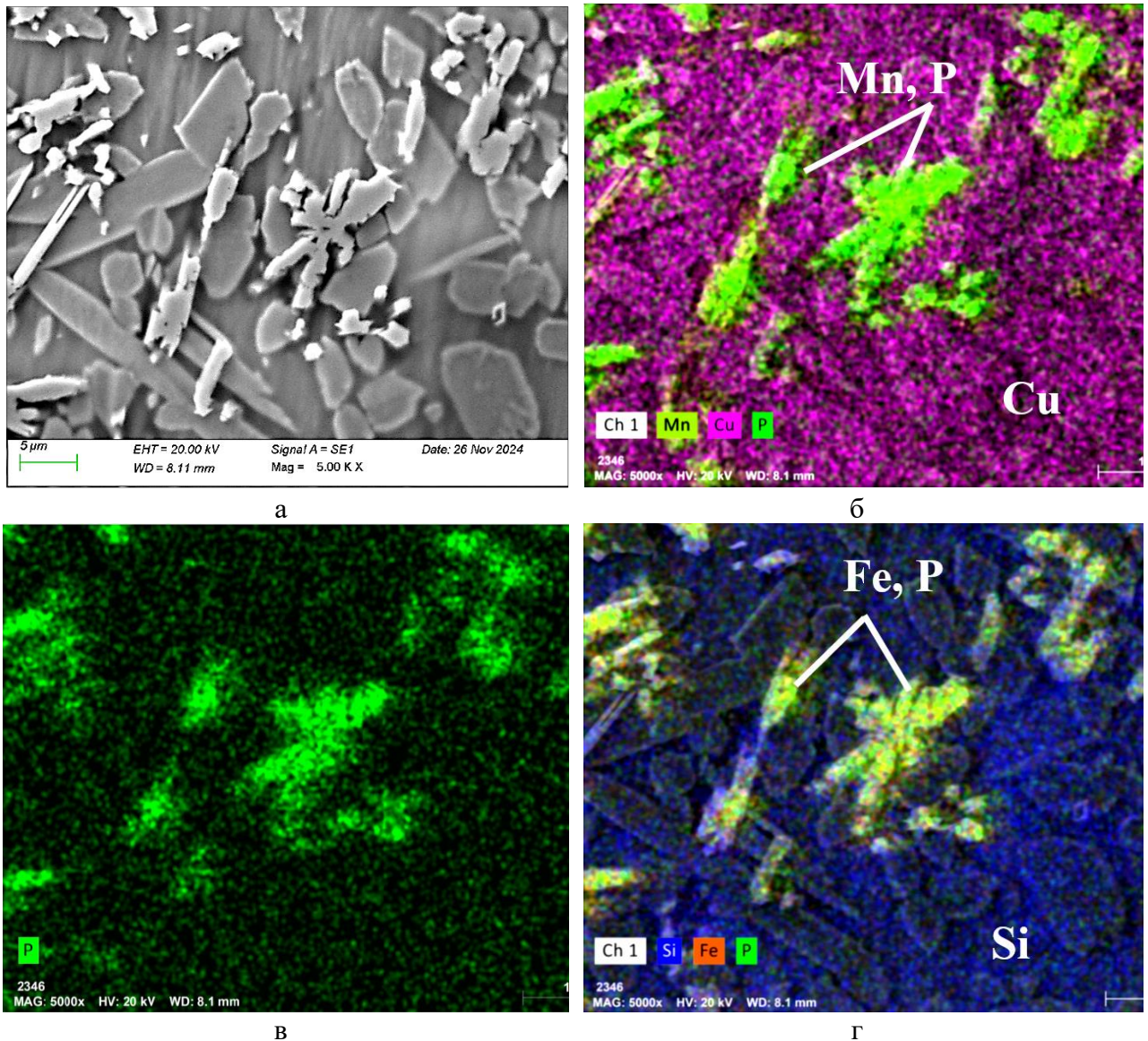


Рисунок 9 – Структура и элементное картирование сплава (0,20% фосфора):
 а) исследуемая структура; б) распределение марганца, меди и фосфора; в) распределение фосфора; г) распределение кремния, железа и фосфора

В целом, стабилизирующий отжиг приводит к переходу многокомпонентных латуней в более стабильное структурное состояние, что выражается в значительном росте α -фазы, исчезновении бейнитных структур, снижении количества мелких выделений и формировании устойчивых стержневых фосфидов, из которых кремний вытесняется в твёрдый раствор.

Таким образом, фосфор выполняет функции модификатора, стабилизатора и структурообразующего элемента. Целенаправленный выбор состава сплава и режимов стабилизирующего отжига позволяет получить сочетание высоких значений фазовой стабильности, дисперсионного упрочнения и трибологических свойств многокомпонентных латуней.

Глава 5. Реализация в промышленности результатов проведённых исследований.

В массовом производстве колец синхронизатора в качестве полуфабриката используется трубный прокат сплавов из сложнoleгированной латуни. Технология производства детали включает нарезку трубных заготовок с последующей горячей штамповкой в два этапа при 650-800°C для формирования зубчатого профиля. После деформации заготовки подвергаются отжигу при 350-550°C в течение 1-2 часов с охлаждением на воздухе для снятия напряжений. Затем выполняют механическую обработку (токарную и фрезерную) для достижения точных размеров и качества рабочих поверхностей.

Многолетнее производство колец синхронизаторов на АО «АВТОВАЗ» из многокомпонентных латуней ЛМцАЖН и ЛМцАЖКС выявило следующие технологические недостатки:

- низкая технологичность, что проявляется в высокой вероятности образования дефектов на каждом из этапов передела;
- растрескивание и образование пор при горячей деформации, что является следствием нестабильности структурного состояния;
- ограниченная работоспособность, что обусловлено наличием остаточных напряжений и низкой износостойкостью при высоких силовых нагрузках.

Проведенные исследования влияния фосфора на многокомпонентные латуни показали значительный потенциал этого элемента для решения ключевых производственных проблем и кардинального повышения качества трансмиссий. Установлено, что контролируемое легирование фосфором в оптимальных концентрациях позволяет подавить образование микропор при горячей деформации и снизить склонность к растрескиванию, благодаря формированию термически стабильных дисперсных выделений, а также повысить твёрдость и износостойкость.

На основании полученных результатов разработаны новые сплавы, включающие регламентированное содержание фосфора как активного модификатора структуры.

Для оценки свойств фосфорсодержащих латуней проведены их сравнительные испытания с промышленными латунями ЛМцАЖН и ЛМцАЖКС, используемыми для изготовления колец синхронизатора коробки передач, на износостойкость и обрабатываемость резанием. Проводили два вида испытаний на износ: в условиях сухого трения и при смазывании трансмиссионным маслом GL-475W-90, при кинематических условиях соответствующих работе колец синхронизатора. По результатам испытаний на износ (таблица 6) видно, что опытный сплав ЛМцАЖКФС (0,5%P) по сравнению со сплавом ЛМцАЖКС имеет более высокие значения по всем показателям износостойкости: сухое трение на 4%; уточнение значения по содержанию силицидов на 28%, трение в смазке на 48%.

По обрабатываемости резанием опытный сплав ЛМцАЖКФС (0,5% P), содержащий вдвое меньше свинца, находится на уровне латуни ЛМцАЖКС (0,6–1,2% Pb), обладающей наиболее высокой обрабатываемостью: среднее время сверления экспериментального сплава превышает аналогичный показатель для промышленной марки в 1,5 раза. Это позволяет считать использование опытного сплава с 0,5%P весьма перспективным, тем более что он имеет лучшие показатели по износостойкости. Ключевой особенностью таких сплавов является способность фосфора стабилизировать α -фазу и образовывать равномерно распределенные столбчатые фосфосилицидные включения. Это позволяет решить фундаментальную проблему традиционных латуней — низкая износостойкость из-за образования мелких силицидов размером 0,5–5 мкм, которые не выдерживают контактных нагрузок, выкрашиваются и вызывают абразивный износ.

Таблица 6 – Результаты анализа на износ

Маркировка	ρ - плотность испытуемого материала, г/см ³	Δm потери по массе, г	ΔW Объёмный износ, мм ³
Сухое трение			
ЛМцАЖКС	7,63	0,011±0,001	1,44±0,042
ЛМцАЖН	7,91	0,016±0,002	2,02±0,059
Опытный сплав ЛМцАЖКФС (0,50% Р)	7,82	0,010±0,002	1,28±0,038
Пересчёт по содержанию силицидов			
ЛМцАЖКС	7,63	–	1,86±0,042
Опытный сплав ЛМцАЖКФС (0,50% Р)	7,82	–	1,28±0,042
Трение со смазкой GL-4 75W-90			
ЛМцАЖКС	7,63	0,0026±0,0008	0,341±0,014
Опытный сплав ЛМцАЖКФС (0,50% Р)	7,82	0,0014±0,0006	0,179±0,008

Первый сплав ЛМцАЖНФ с содержанием фосфора около 0,1% отличается аномально высокой твёрдостью и дисперсностью структур. Его ключевое преимущество — способность формировать закалочную структуру без проведения традиционной термообработки. Это исключает коробление и деформации, характерные для термического упрочнения, что особенно критично для тонкостенных отливок со сложной геометрией. Сплав предназначен для деталей, где требуется получить высокую поверхностную твёрдость без термических искажений геометрии.

Второй сплав ЛМцАЖНФ1 содержит ориентировочно 0,2% фосфора и характеризуется повышенной структурной стабильностью, что обеспечивает баланс между упрочнением за счет образования дисперсных фосфосилицидных включений и сохранением технологической пластичности. Сплав демонстрирует стабильные свойства при переделе и эксплуатации, что делает его идеальным для ответственных деталей, требующих сочетания надежности и износостойкости.

Третий сплав ЛМцАЖКФС с 0,5% фосфора и двукратным снижении содержания свинца, является термоупрочняемым за счёт механизма дисперсионного упрочнения. Высокое содержание фосфора обеспечивает интенсивное образование упрочняющих фаз при стабилизирующем отжиге, что значительно повышает прочностные характеристики. Данный сплав оптимален для деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и износа, где требуется максимальное сочетание твёрдости и износостойкости.

Поданы патентные заявки на состав этих сплавов.

Для внедрения предложенных сплавов в АО «АВТОВАЗ» разработана следующая технологическая документация:

1. Технические условия (ТУ48.43.31-001-00232934-2025) на кованые латунные заготовки колец синхронизаторов из латуней ЛМцАЖНФ. ЛМцАЖНФ1. ЛМцАЖКФС для автомобилей АО «АВТОВАЗ» с регламентированным содержанием фосфора (0,08–0,12% для ЛМцАЖНФ; 0,15–0,25% для ЛМцАЖНФ1; 0,40–0,55% для ЛМцАЖКФС).

2. Технологические регламенты обработки фосфорсодержащих латуней:

- Режимы горячей деформации с ограничением температуры штамповки $\leq 750^\circ\text{C}$ для сохранения фосфидных фаз;

- Режимы термической обработки для достижения заданного соотношения α/β -фаз и твердости (165–213 HV30).

3. Система контроля качества на основе металлографического анализа и мониторинга распределения фосфора, обеспечивающая стабильность свойств готовой продукции.

Результаты и выводы

1. В промышленной латуни марки ЛМцАЖН (0,005 мас.%P) весь фосфор находится в связанном виде в составе стержневидных фосфидов $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{P}$, и отсутствует в твердом растворе, поэтому в указанной концентрации он не оказывает заметного самостоятельного влияния на твердость и фазовый состав матрицы.

2. Установлено, что в интервале 700–750 °С фосфидные включения обладают более высокой термической стабильностью, чем силициды: они менее склонны к растворению и в отличие от силицидов сохраняют морфологию и химическую стабильность, что определяет их устойчивость при горячей деформации.

3. Введение фосфора изменяет соотношение фаз, увеличивая долю α -фазы до 50% при 0,5 мас.% P, и морфологию выделений: мелкие силициды, размером до 5 мкм, исчезают, уступая место крупным столбчатым силицидофосфидным включениям.

4. Повышение концентрации фосфора от 0,00 до 0,50 мас.% приводит к снижению твердости от 214 до 169 HV30. Локальное отклонение от общей тенденции, наблюдаемое при 0,10 мас.% P, связано с формированием метастабильного состояния твердого раствора.

5. Стабилизирующий отжиг исследованных многокомпонентных латуней системы Cu–Zn–Mn–Al–Fe–Si, содержащих 0,00–0,50 мас. % P, при температуре 430 °С в течение 3,5 ч приводит к увеличению доли α -фазы на 20–60 %. Наибольшее повышение твердости, на 29 %, зафиксировано после отжига в сплаве с содержанием 0,50 мас. % P, что связано с изменением его структурно-фазового состояния и дополнительным упрочнением интерметаллидными выделениями.

6. Выявлено, что при содержании фосфора свыше 0,15 мас. % изменяется состав ранее сформированных силицидных выделений, в которых часть кремния замещается фосфором, а избыток кремния переходит в твердый раствор. Это сопровождается образованием в структуре более протяженных стержневидных фосфидных и силицидофосфидных включений.

7. Разработанный сплав ЛМцАЖКФС, содержащий 0,5 мас. % P при минимальном содержании свинца, превосходит промышленный сплав ЛМцАЖКС по износостойкости во всех исследованных условиях: на 4 % при сухом трении, на 48 % при трении в смазочной среде GL-4 75W-90 и на 28 % по расчётной оценке, полученной на основе статистической обработки экспериментальных данных.

8. Легирование фосфором многокомпонентных латуней сопровождается умеренным снижением прочности при одновременной стабилизации структурно-фазового состояния, что способствует повышению технологичности и эксплуатационной надёжности материала.

9. Обоснованы и реализованы в виде технических условий интервалы содержания фосфора в кованных латунных заготовках для колец синхронизаторов: 0,08–0,12 мас. % для ЛМцАЖНФ, 0,15–0,25 мас. % для ЛМцАЖНФ1 и 0,40–0,55 мас. % для ЛМцАЖКФС. Документ нормирует соотношение α/β -фаз и уровень твердости, что обеспечивает повышение надёжности и технологической устойчивости изделий.

10. Созданы технологические регламенты обработки фосфорсодержащих латуней, включающие режимы горячей деформации (≤ 750 °С) и режимы термообработки для обеспечения требуемого соотношения α/β -фаз и твердости (165–213 HV30).

11. Разработана и внедрена система контроля качества фосфорсодержащих латуней, основанная на металлографическом анализе структуры, количественной оценке доли α -фазы, контроле твердости и химического состава сплавов, обеспечивающая стабильность состава готовой продукции. Фосфор включён в процедуру одобрения химического состава как фактор, значимо влияющий на свойства сплавов.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих рецензируемых журналах:

1. Климанова А. М. Эволюция микроструктуры и свойств в процессе старения дисперсионно-твердеющей многокомпонентной латуни с фосфором // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2025. - № 9. - С. 42-47.
2. Svyatkina A.V., Vyboyshchik M.A., Klimanova A.M. Effect of Phosphorus on the Properties and Microstructure of Multicomponent Brasses // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2025. - Vol. 66. - No. 4. - P. 189-198.
3. Святкин А.В., Гнусина А.М., Грызунова Н.Н. К вопросу о влиянии нагрева двухфазных легированных латуней на особенности морфологии интерметаллидных включений // Физика металлов и металловедение. - 2024. - Т. 125. - № 6. - С. 674-685.
4. Святкин А. В., Выбойщик М. А., Гнусина А. М. Влияние метастабильных соединений на склонность к растрескиванию многокомпонентных латуней // Деформация и разрушение материалов. - 2024. - № 4. - С. 32–40.
5. Гнусина А. М., Святкин А. В. Влияние микролегирования фосфором на структурообразование многокомпонентной латуни ЛМцАЖН // Frontier Materials & Technologies. - 2024. - № 3. - С. 31–40.

Публикации в других изданиях:

6. Гнусина А. М., Святкин А. В. Изменение микроструктуры и твердости кремнисто-марганцевой латуни при модифицировании фосфором // Уральская школа молодых металловедов: сб. ст. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. —Екатеринбург, 2025. - С. 244–248.
7. Святкин А. В., Гнусина А. М., Грызунова Н. Н. Влияние нагрева латуни марки ЛМцАЖН в диапазоне температур горячей деформации на размер и форму включений упрочняющей фазы // Физическое материаловедение: сб. материалов XI Междунар. школы. Тольятти, 2023. - С. 128–129.
8. Гнусина А. М., Святкин А. В. Оценка применимости диаграмм состояния системы Cu-Zn-Mn-Si для фазового прогнозирования в зависимости от молекулярной связанности кремния // КоМУ-2022: материалы XIV Всерос. школы-конф. молодых учёных с междунар. участием. Ижевск, 2022. - С. 87–89.
9. Святкин А. В., Климанова А. М. Влияние фосфора на структурно-фазовое состояние и эксплуатационные свойства многокомпонентных кремнемарганцевых латуней // Физическое материаловедение: сб. материалов XII Междунар. школы. Тольятти, 2025.

Патенты.

10. Решение о выдаче патента на изобретение РФ № 2025120619. Многокомпонентная латунь / Святкин А. В., Растегаев И. А., Климанова А. М.; заявитель и патентообладатель АО «АВТОВАЗ». — № 2025120619/05; заявл. 25.07.2025; решение о выдаче от 10.02.2026. — 5 с.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева» (протокол № 3 от «02» апреля 2026 г.)

Заказ № _____ Тираж 100 экз. Форм. лист. 60×84/16. Отпечатано на ризографе.