

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 666.1.036.834+621.785.539:669.3(043.3)

**ПЛЕТЕНЁВ Илья Викторович**

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ МЕДНЫХ ТЕПЛОТВОДЯЩИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ НАСЫЩЕНИЕМ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая  
обработка металлов и сплавов

Минск, 2024

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Константинов Валерий Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Материаловедение в  
машиностроении» БНТУ

Официальные оппоненты **Белый Алексей Владимирович**,  
академик НАН Беларуси, доктор технических  
наук, профессор, профессор кафедры  
«Экспериментальная и теоретическая физика»  
БНТУ, г. Минск

**Комаров Александр Иванович**,  
кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией технологий модифицирования  
конструкционных материалов НТЦ  
«Технологии машиностроения и  
технологическое оборудование»  
Государственного научного учреждения  
«Объединенный институт машиностроения  
Национальной академии наук Беларуси»,  
г. Минск

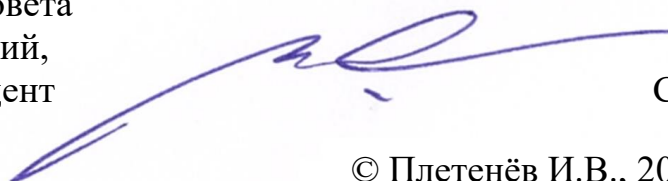
Оппонирующая организация УО «Белорусский государственный  
технологический университет»

Защита состоится «    »    2024 г. в    на заседании Совета по  
защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном  
техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т  
Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202; тел. ученого секретаря +375 (29) 778-  
84-65, e-mail: cadoxa.m@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
канд. техн. наук, доцент



Садоха М.А.

© Плетенёв И.В., 2024

© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Медь и ее сплавы широко используются при изготовлении теплоотводящих элементов технологического оборудования: кристаллизаторы и фурмы металлургического производства, различные охлаждающие устройства химической отрасли, например, подфильерные холодильники стекольного производства. Они эксплуатируются в условиях воздействия высоких температур и агрессивных сред, вызывающих активную коррозию поверхности изделий. Обладая высокой теплопроводностью, медь имеет низкую жаростойкость и коррозионную стойкость в ряде технологических сред.

Способов защиты меди и медных сплавов достаточно много, все они направлены на создание барьерного слоя на поверхности изделия. Одним из наиболее рациональных способов защиты меди от высокотемпературного окисления и коррозии является термодиффузионное насыщение элементами, образующими при окислении плотные, устойчивые оксидные слои. Неизученность применения термодиффузионного упрочнения для работающих в конкретных производственных условиях медных изделий сдерживает промышленное использование.

Данная работа посвящена исследованию влияния термодиффузионного упрочнения холодильников стекольного производства на формирование защитных свойств покрытий и сохранение необходимых показателей теплопроводности и долговечности.

Термодиффузионное насыщение позволяет получить в поверхностном слое изделия сплав различного химического состава и, следовательно, обеспечить комплекс необходимых свойств – физических, химических, механических, и др. Каждое медное изделие, подвергаемое защите, имеет существенные различия по условиям эксплуатации, конструктивным решениям, поэтому требует специального подхода в выборе технико-экономически обоснованного, эффективного покрытия и способа его нанесения. В области упрочнения поверхности химико-термической обработкой медьсодержащих сплавов известны работы: Земскова Г. В., Вавиловской Н.В., Гордевой Л.Т., Григоряна Г.В., Украинцева А.Е. и др., Габриель Пластенсия (Аргентина), Танаи Марин (Канада) и др. В отечественных научных школах можно выделить работы: Ляховича Л.С., Ворошнина Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Ситкевича М.В.

Для отечественных производителей стеклонитей теплоотводящие элементы стекольного производства в виде фильерных холодильников производились до определенного момента исключительно за рубежом. В сложившихся условиях создание импортозамещающей технологии повышения долговечности медных холодильников стекольного производства является актуальной научно-технической задачей.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами, темами.**

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190) по п. 8 «Многофункциональные материалы и технологии», а также приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156) по п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы». Настоящая работа проводилась в рамках следующих заданий государственных программ научных исследований: ГБ 21–216 «Адаптивное формирование функциональных защитных покрытий и диффузионных слоев в условиях активированного насыщения рабочих поверхностей металлических изделий химическими элементами» (2021–2025 гг.); задание № 3.2.11 «Исследование и синтез новых термостойких оксидных покрытий на термодиффузионных слоях для работы в экстремальных условиях» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Электромагнитные, пучково-плазменные и литейно-деформационные технологии обработки и создания материалов» (2021–2025 гг., № гос. регистрации 20213076); НИР «Разработка процесса нанесения градиентного антикоррозионного термостойкого покрытия на основе никеля на медь и ее сплавы», отдельный проект Министерства образования Республики Беларусь (2021–2022 гг., № гос. регистрации 20214075);

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении следующих научно-практических работ: хоздоговор № 4316 от 09.12.2019; хоздоговор № 3277/22 от 07.09.2022.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является повышение стойкости медных теплоотводящих элементов стекольного производства термодиффузионной обработкой.

Для достижения поставленной цели в работе потребовалось решить следующие задачи:

- оптимизировать состав насыщающей смеси и режимы химико-термической обработки;
- исследовать закономерности фазовых превращений и структуру при термодиффузионной обработке меди марки М1;
- исследовать механические, технологические и эксплуатационные свойства полученных термодиффузионных защитных слоев;

– исследовать особенности разрушения медных теплоотводящих элементов с защитным слоем, полученным термодиффузионным упрочнением, при эксплуатации;

– разработать и внедрить экономически-обоснованную технологию термодиффузионного упрочнения медных теплоотводящих элементов стекольного производства.

Объектом исследования являются термодиффузионные слои на медных изделиях.

Предмет исследования: структура, элементный и фазовый состав, теплофизические и эксплуатационные свойства термодиффузионных защитных покрытий на меди.

### **Научная новизна**

Установлено, что введение в состав алитирующей смеси бора и хрома позволяет увеличить толщину термодиффузионного слоя в 1,2–1,5 раза за счет более активного раскисляющего действия компонентов смеси. Это обеспечивает повышение защитных свойств термодиффузионного по сравнению с традиционным высокотемпературным алитированием меди в 1,2 раза.

Установлен экстремальный характер влияния толщины термодиффузионного слоя на меди на эксплуатационные свойства ламельного холодильника, обусловленный противоречивым характером влияния толщины слоя на теплопроводность, жаростойкость и жесткость медного изделия. Увеличение толщины термодиффузионного слоя от 20 до 120 мкм приводит к повышению жаростойкости ламельного элемента от 180 г/м<sup>2</sup> до 52 г/м<sup>2</sup>; жесткости ламельного холодильника от менее 0,1 мм<sup>-1</sup> до 0,3 мм<sup>-1</sup>. Однако, при этом снижается теплопроводность с 206 Вт м/К до 37 Вт м/К. Полученные данные позволили оптимизировать толщину термодиффузионного слоя 80–100 мкм для обеспечения высокой работоспособности изделий и непрерывности выработки стекловолокна.

Впервые исследован механизм потери работоспособности медных холодильников стекольного производства с термодиффузионным защитным слоем в процессе промышленной эксплуатации при производстве стекловолокна, заключающийся в протекании двух конкурирующих процессов высокотемпературного диффузионного рассасывания слоя и структурных изменений при фазовом взаимодействии, позволивший разработать эффективный защитный слой, что позволило повысить долговечность подфильерных холодильников в жестких условиях производства Е-стекла.

### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Разработанный и запатентованный состав смеси для комплексного насыщения преимущественно алюминием, содержащий дополнительно бор и хром, а также режимы насыщения (520–560 °С, 4-5 часов). Предложенный состав

и режимы позволяют увеличить толщину диффузионного слоя на меди марки М1, при низкотемпературном насыщении в 1,2–1,5 раза и обрабатывать поверхности при уменьшении толщины оксидной пленки за счет более активного раскисляющего действия компонентов смеси.

2. Закономерности влияния термодиффузионного слоя, его толщины на теплопроводность, жесткость и жаростойкость медных ламельных элементов холодильников стекольного производства, которые позволили определить интегральную теплопроводность диффузионного алитированного слоя для диапазона толщин 80–120 мкм составляет 38–54 Вт/м·К и угол загиба, гарантирующий целостность и работоспособность защитного диффузионного слоя, составляющий 25 °, жаростойкость — 85 г/м<sup>2</sup> (25 часов 800 °С).

3. Механизм разрушения термодиффузионного слоя на медном ламельном холодильнике при производстве Е-стекла, состоящий в диффузионном перераспределении легирующих элементов по глубине слоя, образовании пленки оксидов шпинельного типа  $\text{CuAl}_x\text{O}_y$  и выгорании легирующих элементов с поверхности изделия при температурах выше 800 °С.

4. Технология и оснастка для комплексного насыщения медных ламельных холодильников стекольного производства, обеспечивающая повышение стойкости относительно неупрочненных изделий в 8,2 раза и экономическую эффективность процесса упрочнения, и снижающая стоимость изделия относительно холодильника с гальваническим покрытием в 2,5–3 раза.

**Личный вклад соискателя.** Вместе с научным руководителем д.т.н., проф. В.М. Константиновым определены цель и задачи исследований. Работы, связанные с исследованием теплопроводности ламельных элементов и жесткости, выполнены совместно с к.т.н., доц. Дашкевичем В.Г. и аспирантом БНТУ Судниковым М.А. Основными соавторами опубликованных работ являются Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Судников М.А., которые принимали участие в обсуждении полученных результатов, а также в подготовке публикаций. Отдельная благодарность к.т.н., доц. В.Г. Дашкевичу за совместную подготовку конкурсных работ и участие в выставках с разработками по теме диссертационных исследований, получение диплома победителя конкурса «Лучшая научная разработка 2021 года» БНТУ за разработку и внедрение инновационной технологии нанесения термодиффузионных на ресурсных медных деталях, и специального приза конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках НИ-ТЕСН Петербургской технической ярмарки (21-23 апреля 2021 года) с разработкой «Инновационные термодиффузионные слои на ресурсных деталях машиностроения». Все основные результаты работы получены соискателем самостоятельно.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: Республиканской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, (2020, 2021, 2022, 2023 гг.); МНТК «Литейное производство и металлургия. Беларусь» г. Минск (2021 г., 2022 г.); МНТК «Наука – образованию, производству, экономике» г. Минск (2019 г.); Республиканской научной конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования», г. Гомель (2014 г.); XI Форум вузов инженерно-технологического профиля «Технологическая интеграция», г. Минск (2022 г.); Белорусско-Узбекский инновационный форум, г. Минск (2023 г.); МНПК «Проблемы и перспективы инновационной техники технологий в агропроизводственном секторе», г. Ташкент (2023 г.); МНТК «Инновационные технологии в машиностроении», г. Новополоцк (2023 г.).

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из которых 4 – статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,68 авторского листа), 11-ти статьях в сборниках и материалах конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 3,88 авторских листа. По результатам исследований получен 1 патент на изобретение Республики Беларусь и подана 1 заявка на изобретение в евразийское патентное ведомство.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем работы составляет 134 страницы, она содержит 103 страницы основного текста, 34 иллюстрации, 14 таблиц, библиографический список из 152 наименований, список публикаций соискателя из 17 научных работ и 15 приложений на 30 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Во введении** обоснованы актуальность темы и необходимость решения исследовательских задач для разработки технологии защиты медных изделий термодиффузионным насыщением. Отмечена важность работ с позиций импортозамещения.

**В первой главе** проанализировано производство стекловолокна в Республике Беларусь и за рубежом с точки зрения проблемы повышения стойкости изнашиваемых изделий при производстве отдельных видов волокон. Проанализированы современные технологии упрочнения меди и медных

сплавов с целью повышения стойкости, прежде всего при высокотемпературной коррозии, проведена их технико-экономическая оценка. В мировой практике создание жаростойких покрытий на изделиях из меди является актуальной проблемой. В результате сравнения известных технологий, образующих защитные слои на меди и медных сплавах, отмечено, что получение качественного, достаточной толщины гальванического никелевого слоя для защиты теплоотводящих элементов стекольного производства, является труднореализуемой, дорогостоящей технологической задачей. Для отечественного производителя необходимо использование более доступных, менее трудозатратных и более дешевых технологий.

Для производителей стеклонити в Республике Беларусь теплоотводящие элементы стекольного производства в виде ламельных холодильников являются импортной продукцией, а применяемые сплавы для поверхностной защиты таких изделий имеют высокую стоимость, поскольку, как правило, содержат, никель как основной жаропрочный и коррозионно-защитный компонент.

Показано, что одним из наиболее рациональных способов защиты от высокотемпературного окисления и коррозии изделий на основе меди и ее сплавов является термодиффузионное насыщение поверхности легирующими элементами и формирование защитного слоя, который при окислении образует плотные, устойчивые оксидные слои, непроницаемые для агрессивных сред. Однако термодиффузионная обработка требует оптимизированных режимов и научно-обоснованных составов насыщающих смесей, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства для конкретной детали или изделия.

Традиционно, элементами, увеличивающими жаростойкость меди являются алюминий, кремний, хром, бор и ряд других. Известно, что уже при 4 % алюминия в меди сплав имеет повышенное сопротивление высокотемпературному окислению.

Показано, что основным фактором, способствующим разрушению теплоотводящих элементов стекольного производства, является высокая температура (в зоне отвода тепла она составляет от 1240 до 1490 °С), которая усугублена коррозионным воздействием паров компонентов шихты при стекловарении, а также термоциклированием за счет кратковременных остановок процесса производства стеклонити для обслуживания и вынужденных простоев, связанных с цикличностью производства (рисунок 1).

Образованный различными способами защитный слой является тепловым сопротивлением, замедляющим теплопередачу в медном элементе. Теплопроводность слоя в большинстве случаев ниже исходной теплопроводности меди. Анализ негативного воздействия защитного слоя на теплопроводность представляет собой важную научную задачу для практического применения медного изделия с защитным слоем в теплоотводящих элементах. Отмечен



потенциал по повышению стойкости медных изделий многокомпонентным насыщением, преимущественно алюминием из порошковой насыщающей среды.



а



б

**Рисунок 1 – Внешний вид подфильерного медного холодильника стекольного производства ламельной конструкции (а) и его работа в составе установки (б)**

**Во второй главе** приведены использованные в работе стандартные и оригинальные методики исследований.

Термодиффузионное насыщение проводили в специальных порошковых средах при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором. Для проведения процесса использовали шахтные

электрические печи с силитовыми нагревателями. Насыщение меди марки М1 ГОСТ 1173 проводили в порошковой среде, приготовленной на основе алюминия марки ПА-2, ГОСТ 5494 с добавкой инертного наполнителя (оксид алюминия –  $Al_2O_3$ , ГОСТ 3136), активатора (аммоний хлористый –  $NH_4Cl$ , ГОСТ 2210) и продуктов реакции алюмотермического восстановления оксидов хрома и бора. Для силицирования, в качестве активной составляющей смеси, был выбран ферросилиций марки ФС-70, ГОСТ 1415-93.

Оптимизация составов насыщающих сред проведена с использованием полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа  $2^3$ . Значимость коэффициентов математических моделей оценена с использованием критерия Стьюдента при доверительной вероятности 95 %. Адекватность уравнений регрессии проверена по критерию Фишера при уровне значимости 5 %. Регрессионный анализ данных выполнен с помощью пакета STATISTICA.

Исследовали микроструктуру диффузионных слоев («Olympus»). МикродюрOMETрические исследования производили методом наноиндентирования по методике Оливера-Фарра на приборе Nano Hardness Tester (NHT2) фирмы CSM Instruments (Швейцария) с алмазным индентором Берковича. Так же применяли микротвердомер ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76. Химический состав диффузионного слоя исследовали микрорентгеноспектральным анализом на электронном микроскопе «CamScan 4» с энергодисперсионным анализатором «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments». Рентгенофазовые исследования покрытий выполнены на дифрактометре ДРОН-3.0 на  $Cu\ K\alpha$ -излучении.

Термическую обработку образцов и испытание на жаростойкость (гравиметрический метод) проводили в печи СНОЛ 1,6.2,5.1/11-И2, контроль массы – с использованием весов RADWAG AS 60/220.X2. Коррозионную стойкость оценивали методом ускоренных коррозионных испытаний в соответствии с разделом 1 ГОСТ 9.308-85. Испытания проводили в среде 5% раствора NaCl в течение 36 часов при комнатной температуре и непрерывном распылении хлористого натрия с использованием камеры соляного тумана ASCOTT Standard S120is (Великобритания).

Морфологию поверхности и элементного состава изучали на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira 3» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания), а также на сканирующем электронном микроскопе ZEM 15 фирмы «ZerTools» (Китай). Дополнительно элементный состав диффузионного слоя определяли с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра «GENIUS IF» фирмы «Xenometrix» (Израиль).

Состояние поверхности оценивали визуальным осмотром и с использованием лупы с увеличением  $\times 10$  (ГОСТ 25706–83). Контролировали наличие различных несплошностей на поверхности образца, определяли площадь дефектной области, характер ее распределения. Кроме этого проводили оценку шероховатости поверхности методом сравнения с эталонными образцами, используя бинокулярный стереоскопический микроскоп Альтами ПС и BS-3040Т фирмы BestScope (Китай).

Исследование теплопроводности проводили на разработанном стенде. Измерение температуры и регистрацию ее распределения (в зоне высоких температур) выполняли с использованием измерителя температурного оптического ИТ-ЗСМ (высокотемпературный трехзональный термовизор).

**Третья глава** посвящена изучению термодиффузионного упрочнения меди из порошковых сред, особенностям структурообразования диффузионных слоев. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для эффективного упрочнения и реализации на теплоотводящих элементах, имеющих паяные соединения, необходима более низкая температура насыщения. Важно, что при высоких температурах обработки, вследствие больших скоростей диффузии, не достигается высокое содержание алюминия на поверхности изделия, что сказывается на их последующей стойкости.

Установлено, что использование смесей для насыщения, исходно рассчитанных на более высокую температуру, в условиях низкотемпературного насыщения дает резкое снижение качества покрытия. При промышленном применении известных технологических смесей в таких условиях, наблюдаются несплошности диффузионного слоя, а в местах с плохо удаленной

оксидной пленкой диффузионный слой не формируется.

Определены легирующие элементы (Al, Cr, B, Si) и варианты легирующих комплексов, которые способствуют повышению стойкости медных изделий при упрочнении термодиффузионным способом, а также оценено их влияние на технологические и структурные особенности защитных слоев на меди.

Разработана порошковая среда для низкотемпературного насыщения поверхностных слоев меди. Кроме алюминия, как основного элемента, она содержит продукты реакции алюминотермического восстановления оксидов бора и хрома. Сами по себе продукты восстановления после измельчения имеют пористую структуру и, соответственно, развитый микрорельеф поверхности, повышая при этом газопроницаемость насыщающей среды. Активный бор в смеси способствует лучшему растворению оксидов меди на поверхности изделия при начальных стадиях химико-термической обработки, способствуя повышению качества процесса и снижению дефектности. Дополнительное участие хрома и бора в составе порошковой смеси обеспечивает более высокие эксплуатационные показатели получаемых защитных слоев.

В результате проведения многофакторного эксперимента ПФЭ 2<sup>3</sup>, установлено, что количество дополнительного компонента насыщающей среды в виде продуктов реакции алюминотермического восстановления оксидов бора и хрома не должно превышать 50 масс. % (рисунок 2). В результате использования разработанной насыщающей смеси наблюдается увеличение скорости роста диффузионного слоя, которая до 1,5 раз выше традиционно используемой (рисунок 3).

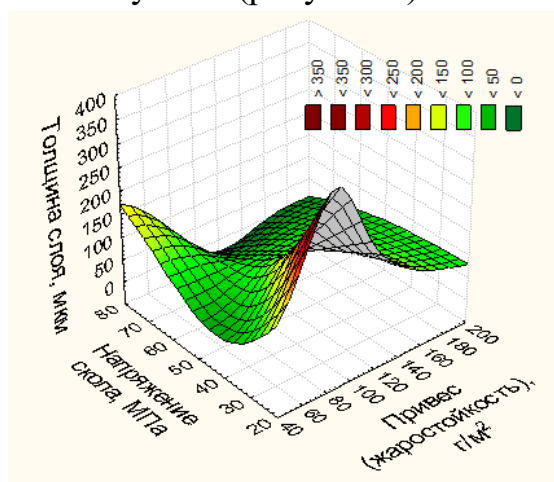


Рисунок 2 – Поверхность отклика с областью оптимизации

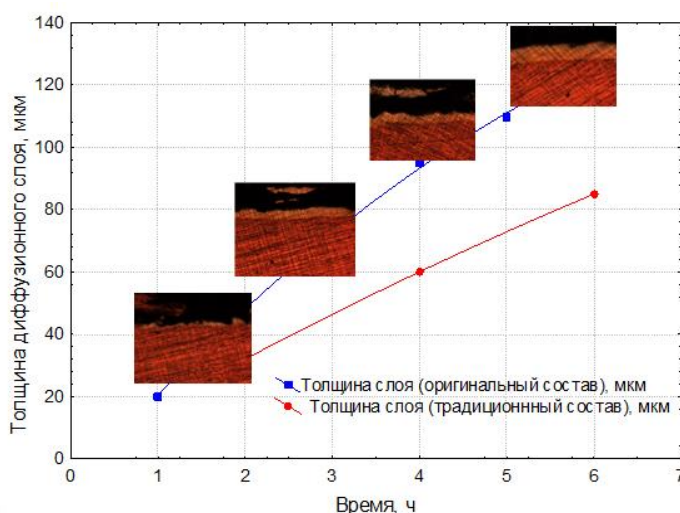
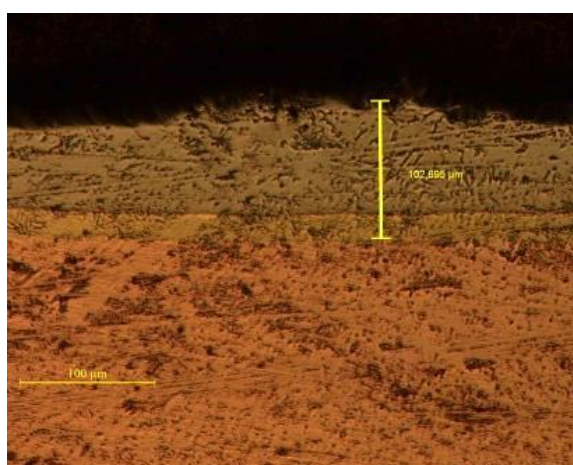


Рисунок 3 – Толщина термодиффузионного слоя при 560 °С

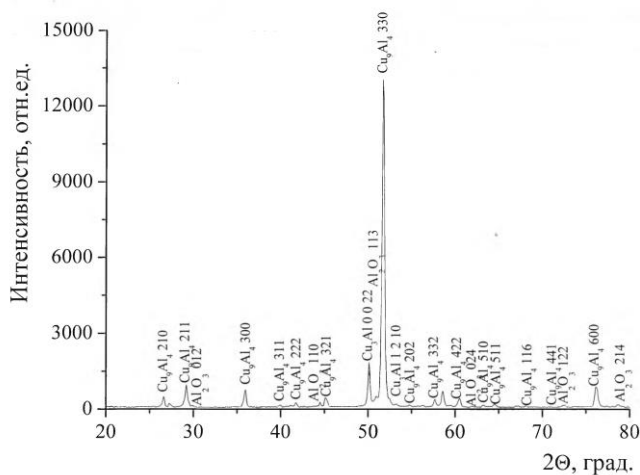
Установлены фазовый состав и структура защитных диффузионных слоев. При насыщении на поверхности образуется диффузионный слой (рисунок 4), в котором отчетливо видны три зоны: первая – комплекс фаз медь-

алюминий – твердого раствора алюминия в меди ( $\alpha$ -фаза), твердого раствора меди на основе соединений  $\text{Cu}_3\text{Al}$  ( $\beta$ -фаза) и интерметаллида  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  общей толщиной 60-70 мкм, вторая – переходная зона (до 9 масс. % Al), представляющая собой твердый раствор меди в алюминии ( $\alpha$ -фазу) толщиной 20-30 мкм и третья зона — оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Микрорентгеноспектральным и рентгенофлуоресцентным исследованиями химического состава подтверждено наличие хрома в термодиффузионном слое до 1 масс. %, что свидетельствует об его участии в диффузионных процессах.

Рентгеноструктурным анализом на поверхности диффузионного слоя зафиксировано наличие фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  как результата взаимодействия слоя с кислородом воздуха.



а)



б)

**Рисунок 4 – Микроструктура алитированного слоя на меди (а) и фрагмент рентгеновской дифрактограммы (б)**

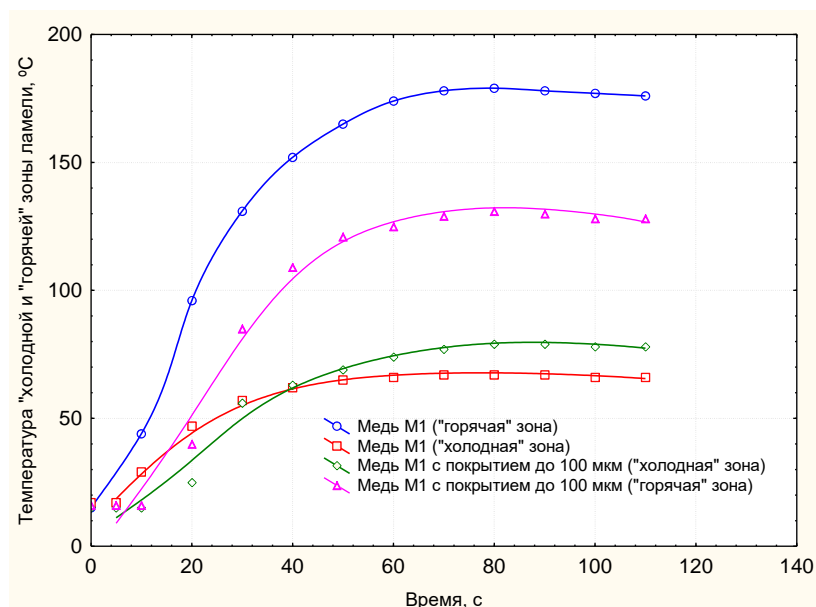
Экспериментально доказано, что для релаксации внутренних напряжений в диффузионном слое, повышения защитных свойств и улучшения сохранности готового изделия при длительном хранении, целесообразно проводить искусственное окисление (наращивание защитной оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при температуре 500-600 °С в течение 2 ч.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования теплофизических, механических и эксплуатационных свойств, как термодиффузионного слоя, так и медной ламели холодильника с защитным термодиффузионным слоем.

Образованный термодиффузионный слой является тепловым сопротивлением. В результате чего замедляется теплопередача в медном элементе. С учетом равенства теплового потока в двух вариантах конвекционного нагрева медной пластины с диффузионным слоем и без него был определен коэффициент теплопроводности диффузионного слоя, учитывающий основные параметры эксперимента: перепад температур по

длине образца без слоя и со слоем; толщина, площадь, коэффициент теплопроводности диффузионного слоя и основного металла (меди М1).

При толщине диффузионного слоя  $100 \pm 10$  мкм интегральный коэффициент теплопроводности диффузионного слоя составил 45 Вт/м·К. Изучена эффективность теплоотвода в условиях стационарного теплового поля ламельного элемента исходя из формирующейся разницы температур по длине элемента со слоем разной толщины и без него (рисунок 5).



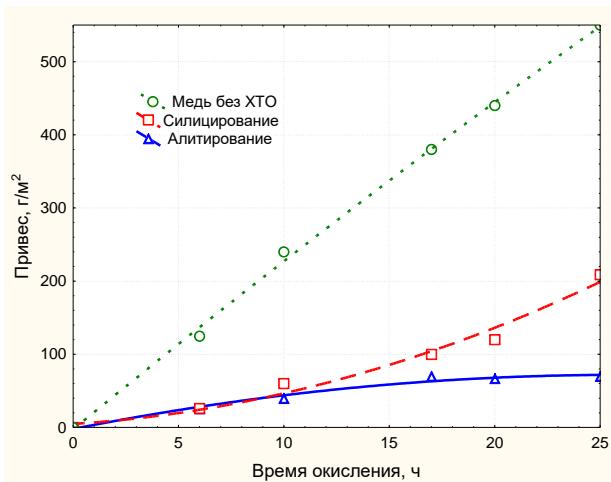
**Рисунок 5 – Скорости нагрева «холодного» торца медной пластины при нагреве газовым пламенем**

Германия) – 80 Вт/м·К, гальваническое покрытие на основе никеля (АМС – НWR, Германия) – 30 Вт/м·К. Установлено, что увеличение толщины термодиффузионного слоя на меди более 180 мкм снижает эффективность теплоотвода практически в два раза.

Исследованы эксплуатационные свойства полученных защитных слоев, в частности, их жаростойкость. Установлено увеличение стойкости медных образцов после термодиффузионного насыщения в 8 раз по сравнению с медью без защитного слоя (рисунок 6). На образцах с термодиффузионным слоем происходит рост толщины слоя вглубь детали и перераспределение концентрации алюминия, а также диффузионное рассасывание слоя. Например, при испытаниях на жаростойкость за 25 ч. слой увеличивается на 10-20 %. Перераспределение приводит к заметному обеднению поверхностных слоев алюминием и снижению в дальнейшем жаростойкости.

Для изучения упругопластических характеристик ламельных элементов с термодиффузионным слоем проведены испытания изгибом (рисунок 7).

Отмечено, что эффективность теплоотвода в исследуемом диапазоне толщин падает на 14–65 % от исходного варианта технической меди без защитного слоя. Сравнительный анализ теплофизических свойств на медных изделиях показывает сопоставимый уровень теплопроводности с известными защитными покрытиями. Например, покрытие металло-керамикой (АМС – HF 120,



б

а

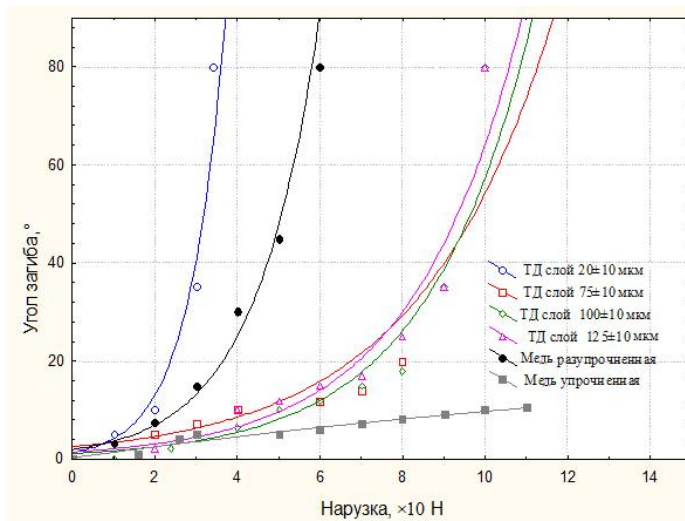
**Рисунок 6 – Зависимость привеса образцов меди с термодиффузионным слоем и без него от продолжительности окисления на воздухе (25 ч при 800°С) (а) и внешний вид образцов меди до и после испытаний (б)**

Установлено, что угол загиба, гарантирующий целостность и работоспособность защитного слоя, составляет 20-25°. Индекс пластичности, измеренный на нанотвердомере по методике Оливера-Фарра, по толщине слоя увеличивается до 8,5 раз. Переход осуществляется через фазу твердого

раствора соединения  $Cu_3Al$ , что снижает риск зарождения и распространения трещин. Установлен определяющий вклад в жесткость и хрупкость lamellarного элемента фазы  $Cu_9Al_4$  и указаны характерные места зарождения трещин при изгибе непосредственно в этой фазе.

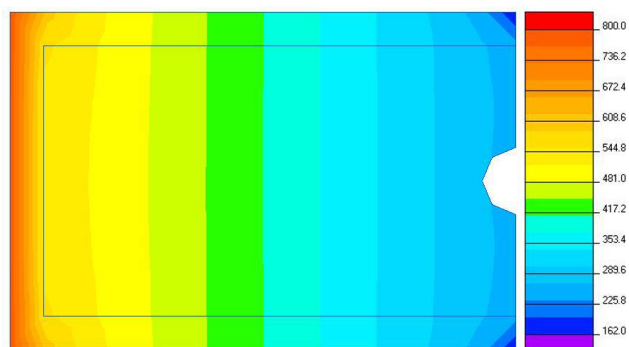
Проведены натурные испытания партии упрочненных холодильников стекольного производства с целью установления ресурса работы и особенностей их коррозионного повреждения. На поверхности в предельном состоянии изделий исследуемых холодильников образуется пленка двойного оксида  $CuAl_2O_4$ ,  $CuAlO_2$  (шпинели), с участием соединений платины, которые образуются в результате их переноса с поверхности используемой фольеры. Установлен механизм потери работоспособности медных холодильников

стекольного производства с термодиффузионными защитными слоями в процессе промышленной эксплуатации. Его особенность заключается в протекании двух конкурирующих процессов: диффузионное рассасывание слоя

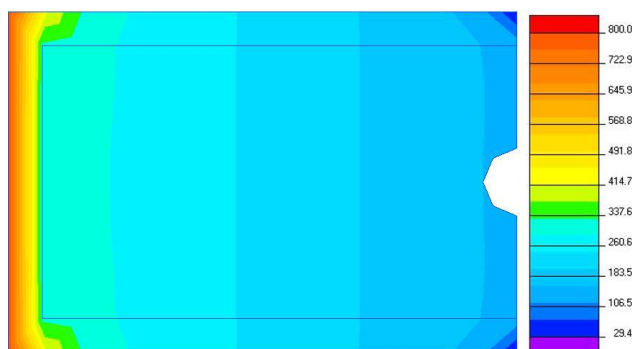


**Рисунок 7 – Зависимость угла загиба пластинчатого элемента, характеризующего разрушение диффузионного слоя от изгибающей нагрузки и толщины слоя**

(рисунок 6, б) и структурные изменения при фазовом взаимодействии. Показано, что основной путь повышения долговечности работы ламельного элемента с термодиффузионным слоем на меди – это контроль количества фазы интерметаллида  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ , а также целостности и сплошности слоя оксида алюминия на поверхности меди. Уменьшение толщины слоя и, соответственно, фазы  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  способствует повышению пластичности.



а)



б)

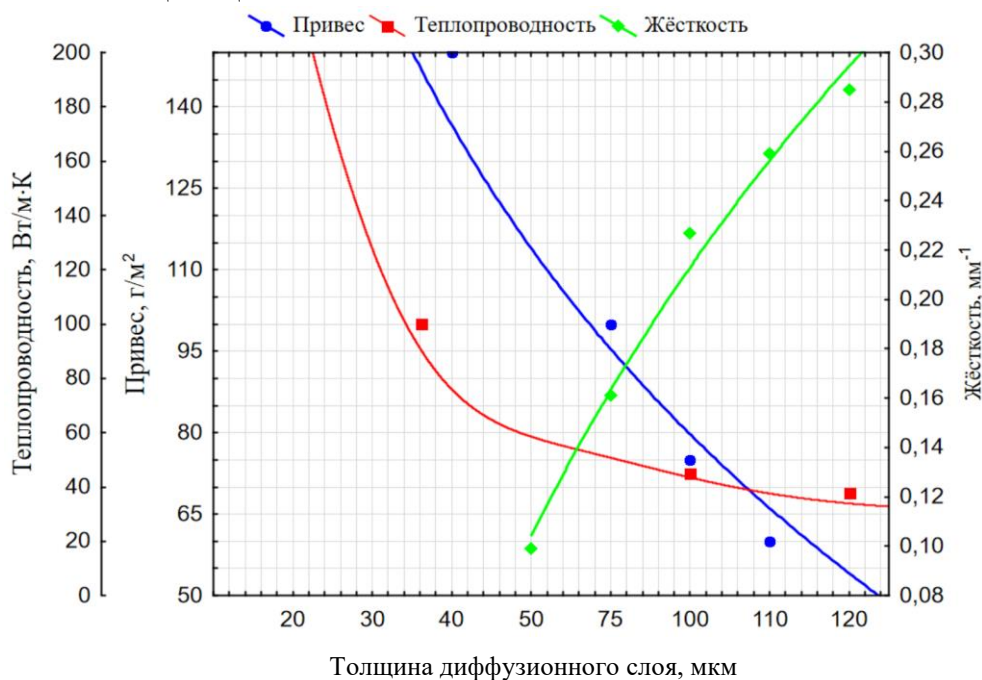
**Рисунок 8 – Имитационная модель в программе Elcut с результатами анализа распределения тепловых полей для пластинчатого элемента с диффузионным слоем разной теплопроводности (а,  $\lambda_{\text{дс}} = 32 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ; б,  $\lambda_{\text{дс}} = 8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ )**

На основе полученных значений теплопроводности в программном пакете Elcut 6.5 проведено моделирование режима нагрева, подтверждающее реальное распределение температур (рисунок 8). На примере пластинчатого медного элемента с диффузионным защитным слоем показаны особенности теплоотвода при различной теплопроводности слоя. Снижение теплопроводности до  $8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  (толщина слоя  $180 \text{ мкм}$ ) увеличивает градиент температур по сечению детали. Термодиффузионный слой на медном изделии оказывает противоречивое влияние на эксплуатационные свойства ламельного элемента (рисунок 9). Повышение жесткости и жаростойкости при увеличении толщины термодиффузионного слоя сопровождается существенным снижением

теплопроводности. Анализ обобщенных данных и результаты производственных испытаний позволили рекомендовать толщину термодиффузионного слоя  $80\text{--}100 \text{ мкм}$ . Рекомендованные толщины слоя обеспечивают работоспособность медных холодильников стекольного производства, и непрерывный, стабильный процесс выработки стекловолокна.

**Пятая глава** посвящена вопросам практической реализации технологии термодиффузионного насыщения в производственных условиях. Установлено влияние масштабного фактора при промышленном использовании технологии, заключающейся в необходимости снижения доли активатора в зависимости от

объема производственного контейнера без изменения состава и количества компонентов насыщающей смеси.



**Рисунок 9 – Зависимость показателей жесткости, теплопроводности и жаростойкости ламельного элемента холодильника стекольного производства от толщины термодиффузионного слоя**

При организации производства реализован системный подход, включающий внедрение процессов системы менеджмента качества (изготовление запасных частей для оборудования химической промышленности по СТБ ISO 9001-2015) с разработкой технологии термодиффузионного упрочнения подфильерных холодильников стекольного производства и проведением ее алгоритмизации. Технология обеспечивает термодиффузионную обработку не менее 500 шт./мес. Специфика производства потребовала дополнительных исследований и введения операции регламентированного окисления, для наращивания оксидной пленки  $Al_2O_3$ , на поверхности подфильерных холодильников. Это обеспечило повышение сохранности готовых изделий с термодиффузионным слоем при длительном хранении (свыше 6 месяцев). Разработан и запатентован состав насыщающей смеси для комплексного низкотемпературного насыщения меди, оптимизированы условия промышленной химико-термической обработки подфильерных холодильников ламельного типа, разработана и изготовлена специальная технологическая оснастка.

Разработанная технология обеспечивает безопасность и промышленную санитариию при проведении процесса химико-термической обработки в порошковых средах для современных условий производства. Отмечены наиболее важные и необходимые требования при проведении работ с



порошковой диффузионной средой на всех этапах производства: подготовки смеси, непосредственного насыщения, извлечения и хранения смеси и готовых изделий.

Изучены и систематизированы характерные виды брака при термодиффузионном насыщении, причины их возникновения. Классификация отбракованных изделий по категориям и систематизация способов устранения, для каждого конкретного случая, позволила исключить неисправимый брак полностью и снизить процент исправимого брака с 15,80 до 3,33 %.

Прямая технико-экономическая эффективность для предприятия-потребителя, использующего холодильники подфилерного типа, в 9 раз выше при использовании изделий с диффузионным многокомпонентным покрытием, чем без него за счет факторов низкой стоимости и использования изделий повышенной стойкости с этим покрытием.

Результаты диссертации внедрены в промышленной технологии диффузионного насыщения на предприятии ООО «Завод НГПО» (рисунок 10).

В 2017 году на базе производственных мощностей предприятия было образовано цеховое производство подфилерных холодильников. В соответствии со спецификой изготовления изделий, был разработан и утвержден типовой технологический процесс ТП 391483-2017 «Типовой технологический процесс изготовления подфилерного холодильника с термодиффузионным покрытием», были приобретены необходимые материалы и оборудование для трудноуправляемых технологических процессов (пайки и термодиффузионного насыщения). На ООО «Завод НГПО» были созданы: механический участок по изготовлению частей холодильников; участок пайки; участок по нанесению термодиффузионного покрытия.

Начиная с 2017 до 2023 г., было освоено промышленное производство 14-ти типоразмеров подфилерных холодильников, отличающихся габаритными размерами, количеством и длиной охлаждающих ребер. В период с 2017 года упрочнено термодиффузионным комплексным насыщением и поставлено в адрес непосредственных потребителей 3580 шт. ламельных холодильников на общую сумму 817885,00 рублей. Пик производственной деятельности пришелся на 2021 год – выпуск ламельных изделий достиг отметки в 1200 шт./год.

Приведены технико-экономические показатели ООО «Завод НГПО» в период с 2017 по 2021 гг., характеризующие реальный эффект от внедрения. Это показатель оборачиваемости денежных средств, добавленной стоимости на одного работника и др. Отмечен процент вклада ООО «Завод НГПО» в объем ВВП обрабатывающей промышленности Республики Беларусь, который вырос с  $1,16 \cdot 10^{-5} \%$  до  $36,15 \cdot 10^{-5} \%$  в период с 2017 по 2021 гг.



а)



б)

**Рисунок 10 – Партия ламельных холодильников, упрочненных комплексным термодиффузионным насыщением (а) и их работа на позиции в составе установки (б)**

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработаны технология и состав насыщающей смеси для комплексного низкотемпературного термодиффузионного насыщения меди, преимущественно алюминием, в диапазоне температур 520–560 °С, содержащий дополнительно бор и хром. Обеспечено повышение долговечности ламельного холодильника стекольного производства в 8,2 раза относительно неупрочненного, за счет увеличения концентрации алюминия в термодиффузионном слое (до 26,4 % масс.), уменьшения толщины оксидной пленки на начальных стадиях химико-термической обработки, а также обеспечения требуемых эксплуатационных свойств изделия [1–А, 2–А, 8-А, 17–А].

2. Проведены структурные исследования образцов технической меди после термодиффузионного насыщения в разработанной смеси. Установлен фазовый состав и структура защитного слоя, представляющая собой слоистую систему, состоящую преимущественно из  $\alpha$ -фазы, интерметаллида  $Al_4Cu_9$ , а также  $\beta$ -фазы (твердого раствора на основе соединения  $Cu_3Al$ ) и оксида алюминия на поверхности. Проанализировано распределение элементов по сечению слоя, подтверждающее определяющую роль фазы  $Al_4Cu_9$  в защитных возможностях слоя. Установлено влияние бора и хрома на окислительно-восстановительные процессы на границе раздела «насыщающая среда – поверхность» при термодиффузионном насыщении [1–А, 8–А, 11–А, 12–А, 14–А].

3. Изучена теплопроводность и жаростойкость меди с разработанным термодиффузионным слоем. Установлено, что при толщине диффузионного слоя  $100 \pm 10$  мкм интегральный коэффициент теплопроводности диффузионного слоя составляет 45 Вт/м·К. Проведена оценка эффективности теплоотвода в условиях стационарного теплового поля ламельного элемента. Эффективность теплоотвода в диапазоне толщин 30–120 мкм снижается на 14–65 % от исходной технической меди без защитного слоя, что сопоставимо с мировыми аналогами гальванических и металлокерамических покрытий. Установлено повышение жаростойкости меди с термодиффузионным слоем в 8 раз за счет повышенной концентрации алюминия [2–А, 4–А, 5–А, 12–А, 13–А].

4. Изучены упругопластические свойства основных структурных составляющих диффузионного алюмосодержащего защитного слоя на меди, установлены показатели индекса пластичности всех характерных зон слоя. Индекс пластичности по толщине диффузионного слоя увеличивается в 8,5 раз. Переход к основному металлу осуществляется через фазу твердого раствора на основе соединения  $\text{Cu}_3\text{Al}$ , что снижает риск зарождения и распространения трещин. Диффузионный слой выполняет роль жесткого каркаса, снижающего коробление ламельного элемента при эксплуатации, вместе с тем сохраняет достаточную пластичность для правки элемента на угол до  $25^\circ$ , что обеспечивает безаварийный монтаж и демонтаж изделий [3–А, 11–А].

5. Изучен механизм потери работоспособности медных холодильников стекольного производства с термодиффузионным защитным слоем в процессе промышленной эксплуатации. Он состоит в протекании двух конкурирующих процессов: высокотемпературного диффузионного рассасывания слоя и структурных изменений при фазовом взаимодействии. Результаты исследований позволили разработать эффективный защитный термодиффузионный слой и обеспечить повышение долговечности подфиллерных холодильников в жестких условиях производства Е-стекла [7–А, 12–А].

6. Изучено влияние масштабного фактора при переходе от лабораторной технологии термодиффузионного упрочнения к промышленной, состоящее в экспериментально подтвержденной устойчивости эффективной работы насыщающей смеси в интервале температур  $520\text{--}560^\circ\text{C}$ , а также в установлении необходимости снижения доли активатора в зависимости от объема производственного контейнера. Для разработанного состава смеси, контейнера прямоугольной формы объемом от 0,01 до 0,05 м<sup>3</sup> доля активатора должна составлять от 0,24 до 0,15 масс. %, соответственно. Разработана промышленная технология и оснастка для термодиффузионного насыщения меди, обеспечивающая повышение стойкости холодильников и экономическую

эффективность процесса упрочнения (до 9 раз по сравнению с неупрочненными изделиями) [3–А, 5–А, 12–А, 13–А, 15–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты внедрены на ООО «Завод «НГПО» и в дальнейшем могут быть использованы для промышленного повышения стойкости различных охлаждающих устройств из меди и медных сплавов металлургического производства, химической отрасли, предприятий машиностроения, для изделий, которые эксплуатируются в условиях воздействия высоких температур и агрессивных сред в виде паров и веществ, вызывающих активную коррозию поверхности изделий.

Полученные (при выполнении диссертационной работы) результаты используются в образовательном процессе Белорусского национального технического университета и УО «Полоцкий государственный университет» при подготовке студентов и магистрантов.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

### ***Статьи в рецензируемых журналах и сборниках***

1–А. Плетенев, И. В. Анализ теплофизических свойств жаростойких термодиффузионных слоев на меди / И. В. Плетенев, В. Г. Дашкевич // *Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 249–257.*

2–А. Константинов, В. М. Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, И. В. Плетенев // *Литье и металлургия. – 2021. – № 1. – С. 124–129.*

3–А. Дашкевич, В.Г. Анализ и прогнозирование упругопластических свойств термодиффузионных слоев на медной подложке / В.Г. Дашкевич, И.В. Плетенев, М.А. Судников // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 43. – С. 219–229.*

4–А. Плетенев, И.В. Оценка эффективности теплоотвода медных элементов технологического оборудования с диффузионным защитным слоем / *Вестник БарГУ. Серия «Технические науки», 2023. – №1. – С.31–38.*

### ***Статьи в научных сборниках и материалах конференций***

5–А. Дашкевич, В. Г. Формирование многофункциональных поверхностных слоев на конструкционных сталях с использованием термодиффузионной обработки в порошковых средах / В. Г. Дашкевич, М. А. Судников, И. В. Плетенев // *Современные технологии для заготовительного*

производства [Электронный ресурс] : сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, 14 апреля 2021 г. / сост. А. П. Бежок. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 23–25.

6–А. Ковальчук, А. В. Двухслойные износостойкие покрытия для направляющих прессов / А. В. Ковальчук, В. Г. Дашкевич, И. В. Плетенев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Международной научно-технической конференции. - Минск: БНТУ, 2017. - Т. 1. - С. 459.

7–А. Плетенев, И. В. Исследование особенностей окисления и разрушения термодиффузионных жаростойких слоев на меди / И. В. Плетенев // Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс]: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, 14 апреля 2021 г. / сост. А. П. Бежок. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 32–34.

8–А. Плетенев, И. В. Особенности насыщающих сред и температурно-временных параметров термодиффузионной обработки изделий из меди для повышения жаростойкости / И. В. Плетенев, В. Г. Дашкевич // Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс]: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, 14 апреля 2022 года / сост.: А. П. Бежок, И. А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 75–77.

9–А. Дашкевич, В. Г. Возможности электроискрового легирования при создании функциональных слоев на стали / В. Г. Дашкевич, А. В. Ковальчук, И. В. Плетенев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы 3-й Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, 4-6 ноября 2014 г. – Гомель: ИММС НАН Беларуси. – С. 30–32.

10–А. Плетенев, И. В. Опыт промышленного упрочнения медных изделий термодиффузионной обработкой / И. В. Плетенев // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сборник материалов, г. Минск, 12-16 декабря 2022 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 29–32.

11–А. Плетенев, И. В. Структурные особенности и микротвердость термодиффузионных слоев на меди / Сборник материалов научно-практической конференции «Беларусь-Узбекистан: формирование рынка инновационной продукции» 14–15 марта 2023, Минск: БНТУ, 2023. – С. 162–165.

12– А. Плетенев, И. В. Моделирование тепловых полей в пластинчатом медном элементе с диффузионным слоем / Электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой «Инновационные технологии в машиностроении» [Электронный ресурс]; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – С. 249–251.

13–А. Плетенев, И.В. Анализ теплоотводящей способности медных элементов с защитным слоем / И.В. Плетенев, И.М. Матюков // Сборник материалов 3-международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в агропродовольственном секторе» 20-21 апреля 2023 года, Ташкент, 2023. – С. 99–100.

14– А. Дашкевич, В.Г. Оценка эффективности участия ряда металлов и металлоидов в структуре защитных термодиффузионных слоев на меди / В.Г. Дашкевич, И.В. Плетенев // Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс]: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ / сост.: А. П. Бежок, И. А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 139–141.

15–А. Плетенев, И.В. Регенерация насыщающей смеси и особенности влияния масштабного фактора при термодиффузионной обработке изделий из меди в промышленных объемах / И.В. Плетенев // Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс]: сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ / сост.: А. П. Бежок, И. А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 142–144.

### ***Изобретения***

16–А. Подфильерный холодильник стекольного производства: заявка ЕА 202191952 / Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Плетенев И.В. – Оpubл. 30.12.2022. (положительное решение от 17.05.2023г.).

17–А. Смесь для комплексного насыщения изделий из меди и ее сплавов на основе алюминия: пат. 24033 Респ. Беларусь: МПК С23С10/48 / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, И. В. Плетенев; заявитель Белорусский национальный технический университет ; дата публ.: 30.06.2023.

## РЭЗІЮМЭ Плецянёў Ілья Віктаравіч

Павышэнне ўстойлівасці медных цеплаадводных элементаў шкляной вытворчасці тэрмадыфузійным умацаваннем

**Ключавыя словы:** халадзільнік шкляной вытворчасці, дыфузійнае насычэнне, алітаванне медзі, цеплатрывалыя пакрыцці.

**Мэта работы:** павышэнне ўстойлівасці медных цеплаадводных элементаў шклянога вытворчасці термодиффузионной апрацоўкай.

**Метады даследавання:** мікрадзюраметрычны, металаграфічны, рэнтгенаўскі фазавы, спектральны і мікрарэнтгенаспектральны аналізы, выпрабаванне на цеплатрываласць.

**Атрыманыя вынікі:** распрацаваны новы склад насычальнай сумесі для комплекснага насычэння, пераважна алюмініем, медзі і медных сплаваў у дыяпазоне тэмператур 520–560 °С, які змяшчае дадаткова бор і хром, і які дазваляе павялічыць таўшчыню дыфузійнага слоя на медзі маркі М1 пры нізкатэмпературным насычэнні ў 1,2–1,5 разы, а таксама апрацоўваць паверхні з нязначнай аксіднай плёнкай за кошт больш актыўнага раскісляльнага дзеяння кампанентаў сумесі. Вывучаны працэсы структураўтварэння і адзначана спрыяльнае размеркаванне фаз па таўшчыні слоя, асноўнымі складнікамі якога з'яўляюцца цвёрдыя растворы на базе алюмідаў  $\text{Cu}_3\text{Al}$  і  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ . Даследаваны цеплафізічныя ўласцівасці біметалічнага вырабу з тэрмадыфузійным ахоўным слоём таўшчынёй да 120 мкм. Даследаваны эксплуатацыйныя і механічныя ўласцівасці атрыманых ахоўных слаёў на медзі маркі М1, якія ўключаюць мікрамеханічныя, пругкапластычныя характарыстыкі, цеплатрывалую і каранійную ўстойлівасць. Вывучаны заканамернасці разбурэння дыфузійнага слоя, якія складаюцца ў дыфузійным пераразмеркаванні легуючых элементаў па глыбіні слоя, утварэнне плёнкі аксідаў шпінельнага тыпу  $\text{CuAl}_x\text{O}_y$  і выгаранні легуючых элементаў з паверхні вырабаў пры тэмпературы вышэй за 800 °С.

**Ступень выкарыстання:** распрацаваны тэхналагічны працэс і аснастка для ўмацавання з выкарыстаннем парашковых сумесей арыгінальнага саставу на ТАА "Завод НГПО" (Беларусь). Праведзены выпрабаванні і апрабацыя даследчай партыі на ТАА "Мінерал 7" (Украіна) і IMPORTANT SERENITY LDA (Партугалія), а на прадпрыемстве ААТ «Стеклавалакно» (Беларусь) выканана поўнае імпартазамышчэнне па халадзільніках для вытворчасці Е-шкла.

**Галіна выкарыстання:** умацаванне вырабаў з медзі і медных сплаваў з мэтай павышэння цеплатрываласці, якія працуюць у складзе цеплаадводных прылад розных вытворчасцяў.

## РЕЗЮМЕ

Плетенёв Илья Викторович

### Повышение стойкости медных теплоотводящих элементов стекольного производства термодиффузионным насыщением

**Ключевые слова:** холодильник стекольного производства, диффузионное насыщение, алитирование меди, жаростойкие покрытия.

**Цель работы:** повышение стойкости медных теплоотводящих элементов стекольного производства термодиффузионной обработкой.

**Методы исследования:** микродюрметрический, металлографический, рентгеновский фазовый, спектральный и микрорентгеноспектральный анализы, испытание на жаростойкость.

**Полученные результаты:** разработан новый состав насыщающей смеси для комплексного насыщения преимущественно алюминием меди и медных сплавов в диапазоне температур 520–560 °С, содержащий дополнительно бор и хром и позволяющий увеличить толщину диффузионного слоя на меди марки М1 при низкотемпературном насыщении в 1,2–1,5 раза, а также обрабатывать поверхности с незначительной оксидной пленкой за счет более активного раскисляющего действия компонентов смеси. Изучены процессы структурообразования и отмечено благоприятное распределение фаз по толщине слоя, основными составляющими которого являются твердые растворы на базе алюминидов  $\text{Cu}_3\text{Al}$  и  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ . Исследованы теплофизические свойства биметаллического изделия с термодиффузионным защитным слоем толщиной до 120 мкм. Исследованы эксплуатационные и механические свойства полученных защитных слоев на меди марки М1, включающие микромеханические, упругопластические характеристики, жаростойкость. Изучены закономерности разрушения диффузионного слоя, связанные с образованием пленки двойного окисла (шпинели) типа  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuAlO}_2$

**Степень использования:** разработан технологический процесс и оснастка для упрочнения с использованием порошковых смесей оригинального состава на ООО «Завод НГПО» (Беларусь). Проведены испытания и апробация опытной партии на ООО «Минерал 7» (Украина) и IMPORTANT SERENITY LDA (Португалия), а на предприятии ОАО «Стекловолокно» (Беларусь) выполнено полное импортозамещение по холодильникам для производства Е-стекла.

**Область применения:** упрочнение изделий из меди и медных сплавов с целью повышения жаростойкости, работающих в составе теплоотводящих устройств различных производств.



## SUMMARY

Ilya Viktorovich Pletenev

### **Increasing the resistance of copper heat-removing elements of glass production by thermal diffusion saturation**

**Key words:** refrigerator for glass production, diffusion alloying, copper aluminizing, heat-resistant coatings.

**The goal of the work:** increasing the durability of copper heat-dissipating elements of glass production by thermodiffusion treatment.

**Investigation methods:** microdurometric, metallographic, XRD, spectral analysis and EMPA, heat resistance.

**Results obtained:** a new composition of the saturating mixture has been developed for the complex saturation of copper and copper alloys mainly with aluminum in the temperature range of 520–560 °C, containing additionally boron and chromium and allowing to increase the thickness of the diffusion layer on copper grade M1 at low-temperature saturation by 1,2–1,5 times, and to treat surfaces with a slight oxide film due to the more active deoxidizing action of the mixture components. The processes of structure formation were studied and a favorable distribution of phases over the thickness of the layer, the main components of which are solid solutions based on  $\text{Cu}_3\text{Al}$  and  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  aluminides, was noted. The thermophysical properties of a bimetallic product with a thermal diffusion protective layer up to 120  $\mu\text{m}$  thick were studied. The functional and mechanical properties of the obtained protective layers on copper grade M1, including micromechanical, elastic-plastic characteristics, heat resistance were studied. The regularities of the destruction of the diffusion layer related to the formation of a film of double oxide (spinel) type  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuAlO}_2$  were studied.

**Practical significance:** a technological process and equipment for hardening using powder mixtures of the original composition at Zavod NGPO LLC was developed. Tests and approbation of an experimental batch were carried out at Mineral 7 LLC (Ukraine) and IMPORTANT SERENITY LDA (Portugal). Complete import substitution of refrigerators for E-glass production was carried out at Steklovolokno OJSC (Belarus).

**Application area:** hardening of products made of copper and copper alloys in order to increase heat resistance in various industries operating as part of heat-removing devices.