

На правах рукописи



Алеутдинов Александр Дмитриевич

**ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ И РЕСТАВРАЦИИ ЭМАЛЕВЫХ
ПОКРЫТИЙ ЧЁРНЫХ МЕТАЛЛОВ СФОКУСИРОВАННЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА**

Специальность 05.17.11 – технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск –2015

Работа выполнена в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников ИНК ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического университета»

Научный руководитель:

Гынгазов Сергей Анатольевич доктор технических наук

Официальные оппоненты:

Яценко Елена Альфредовна доктор технических наук, профессор,
зав.кафедрой «Технология керамики,
стекла и вяжущих веществ», Южно-
Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

Казанцева Лидия Константиновна доктор технических наук, научный
сотрудник лаборатории
метаморфизма и метасоматизма
Института геологии и минералогии
им.В.С. Соболева Сибирского
отделения Российской академии
наук (г. Новосибирск)

Ведущая организация

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «29» декабря 2015 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 2, ауд. 117

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» по адресу: 634050 г. Томск, ул. Белинского, 55, и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/915/worklist>

Автореферат разослан « » 2015 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Ивашкина Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Благодаря экологической безопасности, высокой химической стойкости, механической прочности, термостойкости и экономической эффективности стеклоэмали широко используются как защитные и декоративные покрытия металлических изделий, для защиты стальной и чугунной химической аппаратуры а также труб для нефтепроводов и водоводов.

Как на этапе изготовления, так и в процессе эксплуатации эмалированных изделий возможно появление дефектов стеклоэмалевого покрытия. Дефекты покрытия, возникающие в процессе эксплуатации эмалированного оборудования, перекрывают слоями неметаллических химически стойких композиций – замазок, герметиков, шпаклёвок.

Технология восстановления стеклоэмалевого покрытия на месте дефекта локальным воздействием высокоэнергетического источника, не требующая обжига всего изделия, позволит повысить эффективность технологического процесса эмалирования и рациональной эксплуатации эмалированного оборудования. Это будет достигнуто за счёт уменьшения расхода энергии и трудозатрат при приведении в работоспособное состояние дефектного эмалированного химического, нефтедобывающего оборудования, эмалированных труб большого диаметра. Развитие таких технологий соответствует направлениям энергоэффективности и энергосбережения государственной программы Российской Федерации по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Степень разработанности. В публикациях о ремонте дефектов стеклоэмалевого покрытия и диссертации Шингаркиной О.В. представлены различные улучшения характеристик химически стойких органических композиций. Но даже наиболее современные, специально разработанные органические защитные составы не могут обеспечить желательного качества ремонта дефектов – речь идёт только о продлении межремонтного срока службы химоборудования, а не о восстановлении стеклоэмалевого покрытия на месте дефекта. Практикуемые методы повторного эмалирования изделий с дефектами эмалевого покрытия трудоёмки и энергозатратны, так как требуют демонтажа и повторного обжига всего изделия.

Разработка методов восстановления стеклоэмалевого покрытия на месте дефекта локальным высокоэнергетическим воздействием на холодном изделии (без послеоперационного отжига всего изделия), непосредственно на месте эксплуатации или после изготовления эмалированного оборудования, является актуальной задачей.

Работа выполнялась в рамках федеральных целевых программ: "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 - 2013 годы. Государственный контракт № 02.740.11.0811, по теме «Создание

и модифицирование методами импульсных физических воздействий композиционных керамических структур на основе диоксида циркония». Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы. Государственный контракт от №16.513.11.3031, по теме «Создание композиционной нанокерамики с повышенными эксплуатационными свойствами»)

Объекты исследования: кислотощелочестойкие стеклоэмали для стальных изделий и стеклокристаллическая эмаль по чугуно

Предмет исследования: процесс формирования стеклоэмалевых покрытий воздействием некогерентного светового потока сфокусированного излучения ксеноновой короткодуговой лампы (в сравнении с традиционным обжигом в камерной печи сопротивления) и воздействие некогерентного полихроматического светового потока на покрытие холодных эмалированных изделий.

Цель работы – разработка методики ремонта дефектов эмалевых покрытий металлических изделий из стали и чугуна сфокусированным излучением дугового источника. Исследовать возможности применения нагрева сфокусированным излучением дугового источника для эмалирования малоразмерных металлических изделий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Анализ достигнутых результатов использования технологических источников локального нагрева, обоснование выбора воздействия потоком сфокусированного светового излучения дугового источника.

2. Исследование эффективности использования светолучевого нагрева для локального формирования стеклоэмалевого покрытия на малоуглеродистых сталях (в сравнении со стеклоэмалевыми покрытиями, полученными традиционным нагревом).

3. Разработка установки и экспериментального оборудования для осуществления технологических процессов в технологии эмалирования с использованием лучистого нагрева.

4. Разработка технологических процессов ремонта дефектов стеклоэмалевых покрытий металлических изделий.

5. Исследовать возможности применения нагрева сфокусированным излучением дугового источника для эмалирования малоразмерных металлических изделий для создания износостойких диэлектрических покрытий, защиты от газовой коррозии, изготовления изделий в технике витражной эмали.

Научная новизна

1. Установлено, что сфокусированное излучение ксеноновой дуговой лампы обеспечивает плавление кислотощелочестойких эмалей и изменение свойств расплава эмали. При плотности мощности светового воздействия 38 Вт/см^2 эти изменения выражены в уменьшении величины коэффициента поверхностного натяжения эмалей в 2,5-2,7

раза в сравнении с традиционным нагревом до 900°C, а при 77 Вт/см² соотношение увеличивается до 8-10 раз, что способствует растеканию расплава эмали и получению более высокого качества поверхности покрытия, чем при традиционном нагреве.

2. Установлено, что импульсно-периодическое воздействие сфокусированного излучения ксеноновой дуговой лампы при плотности мощности 450-550 Вт/см² с длительностью импульса 0,1-0,5 секунды и периодом следования 0,5-1 с позволяет восстанавливать дефектное стеклоэмалевое покрытие на стальных изделиях с толщиной металла 4 мм локальным оплавлением эмали на месте дефекта. Снижение плотности мощности воздействия до 200-250 Вт/см² позволяет залечивать микротрещины и релаксировать термонапряжения в эмали, возникающие при локальном оплавлении эмали на месте дефекта стеклоэмалевого покрытия.
3. Установлено, что удаление эмалевого покрытия чугунных изделий происходит при импульсно-периодическом воздействии сфокусированного излучения ксеноновой дуговой лампы при плотности мощности воздействия 150-200 Вт/см², длительностью импульса 0,5-1с, с периодом следования 2-3 с и площадью воздействия 6-8см².

Теоретическая значимость работы:

Получены новые научные данные о процессе светолучевого нагрева эмалевого покрытия. Произведён расчёт термонапряжений, возникающих в покрытии при охлаждении участка локального расплавления эмали и граничных напряжений эмаль-чугун при нагреве эмалевого покрытия.

Практическая значимость работы:

1. Разработана установка, позволяющая воздействовать на объект исследования сфокусированным светом дугового источника в пульсирующем режиме и на постоянном токе.

2. Разработана методика локального ремонта дефектов стеклоэмалевого покрытия на холодных стальных изделиях.

3. Разработана технология очистки дефектного покрытия эмалированных чугунных изделий для последующего реэмалирования.

4. Разработана технология изготовления объёмных изделий в технике «витражной эмали» методом вытягивания из расплава с одновременным декорированием эмали.

5. Разработана технология ускоренного эмалирования малоразмерных металлических изделий светолучевым нагревом в режиме плавной регулировки мощности излучения.

6. Лабораторное оборудование и методика светолучевого экспресс-эмалирования небольших стальных образцов использованы в процессе обучения на кафедре электроизоляционной и кабельной техники ТПУ.

Методология диссертационного исследования состояла в сравнении свойств покрытий полученных светолучевым оплавлением и традиционным

нагревом в печах сопротивления. Использовались **методы** исследования микроструктуры поверхности, РФА, ИК-спектроскопия и методики исследования химстойкости, микротвёрдости, стойкости к теплосменам

Положения, выносимые на защиту:

1. Положение о расплавлении кислотощелочестойких эмалей сфокусированным излучением ксеноновой дуговой лампы и уменьшении при этом величины коэффициента поверхностного натяжения расплава эмалей.

2. Положение о локальном оплавлении эмали на месте дефекта стеклоэмалевого покрытия стального изделия при импульсно-периодическом светолучевом воздействии с плотностью мощности $450-550 \text{ Вт/см}^2$ и устранении микротрещин и термонапряжений, возникающих при этом, более мягким воздействием с плотностью мощности $200-250 \text{ Вт/см}^2$.

3. Положение о создании напряжений, обеспечивающих скалывание эмалевого покрытия чугунных изделий при импульсно-периодическом светолучевом воздействии с плотностью мощности $150-200 \text{ Вт/см}^2$.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась многократным повторением экспериментов с различным сочетанием эмалей и методик их нанесения, использованием традиционных методик оценки качества эмалевых покрытий с применением современного исследовательского оборудования.

Личный вклад автора заключается в активном участии в разработке и усовершенствовании установки, позволяющей осуществлять локальное воздействие мощным сфокусированным излучением ксеноновой короткодуговой лампы на постоянном и импульсном режимах, планировании и проведении экспериментальных исследований, разработке и реализации экспериментальных методик нанесения, реставрации и удаления эмалевого покрытия светолучевым воздействием, в подготовке докладов, статей и заявки на патент. Эксперименты, анализ, расчёты, интерпретация результатов и создание на их основе технологических последовательностей выполнены лично автором.

Апробация работы: Результаты исследований по диссертационной теме докладывались на: Всерос. Конф. "Создание защитных и упрочняющих технологии с использованием концентрированных потоков энергии" (Барнаул, 1996); конф., посвященной 100-летию строительного образования в Сибири (Томск, 1999); на 2-м Междун. семинаре «Нетрадиционные технологии в строительстве» (Томск, 2001); на Междунар. НТК «Архитектура и строительство» (Томск, 2002), на III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий» (Томск, 2004), на IV Междунар. научн. конф. «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2004), на 13-й Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий (M13-2)» Ялта(2013).

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 131 стр. машинописного текста и состоит из

введения, обзорной главы и 3-х глав, в которых изложены результаты оригинальных исследований. Диссертация завершается выводами и заключением по работе. Содержит 41 рисунок, 19 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 145 наименований.

Публикации

В диссертацию вошли материалы 7 публикаций, 8 докладов в сборниках трудов конференций, изобретения и патента.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование выбора темы, определены задачи исследования, показана актуальность данного направления, научная новизна и практическая значимость работы. Выбор темы обусловлен необходимостью расширить технологические возможности в области эмалирования металлов и, в особенности, те, что касаются проблем устранения дефектов стеклоэмалевого покрытия, возникающих как в процессе производства, так и во время эксплуатации эмалированного оборудования.

В первой главе рассмотрены опубликованные сведения по применению и составам эмалей и глазурей, освещена проблема дефектов эмалевого покрытия чёрных металлов и практикуемые методы ремонта. Дана постановка цели и задач исследования.

Во второй главе

Представлены так называемые кислотощелочестойкие эмали по стали работоспособные в средах со значениями pH от 1 до 14. Таблица 1. Химический состав кислотощелочестойких эмалевых фритт и санитарно-технической эмали ТК-17 (масс.%)

Оксид	№261	УЭС-200	УЭС-300	ТК-17
Li ₂ O	5	4	4	
Na ₂ O	14	13,34	13,34	12,98
K ₂ O	1	4,38	4,38	2,54
CaO	4	2,28	2,28	
MgO				1,31
CoO	0,30	0,30	2,5	0,03
TiO ₂	1			6,71
ZrO ₂	3	8	9,5	
Cr ₂ O ₃	4,7	2,2		
SiO ₂	64	62	62	18,40
B ₂ O ₃	2	2	2	27,40
Al ₂ O ₃				16,11
P ₂ O ₅				9,51

Na_2SiF_6	1			
Na_3AlF_6				5,35

. Эти эмали (также определяемые, как химико-аппаратурные) созданы на базе стеклообразной системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Ti}_2\text{O}-\text{ZrO}_2$, что и обуславливает их повышенную химическую стойкость.

Рассчитана последовательность образования эвтектик при плавлении эмалей, построена кривая плавкости эмалей №261, УЭС-200 и УЭС-300 рис. 1(а).

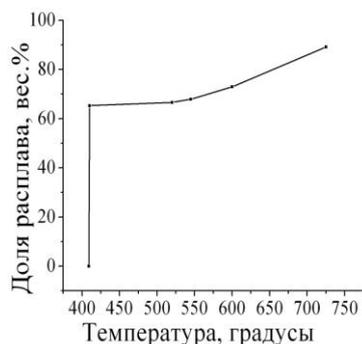
Таблица 2. Последовательность образования эвтектик при плавлении эмали №261

Состав эмали		$\text{Li}_2\text{O}-5; \text{Na}_2\text{O}-14; \text{K}_2\text{O}-1; \text{CaO}-4; \text{CoO}-0,30; \text{TiO}_2-1; \text{ZrO}_2-3; \text{Cr}_2\text{O}_3-4,7; \text{SiO}_2-64; \text{B}_2\text{O}_3-2; \text{Na}_2\text{SiF}_6-1.$		
Система		Состав эвтектики, вес. %	$T, ^\circ\text{C}$	Доля расплава, вес. %
1	$\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ [127]	$2(\text{B}_2\text{O}_3) - 98 (\text{SiO}_2)$	410	$64(\text{SiO}_2)+1,3(\text{B}_2\text{O}_3)=65,3$
2	$\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [128]	$27(\text{Na}_2\text{O}) - 33(\text{B}_2\text{O}_3) - 40(\text{SiO}_2)$	520	$+0,7(\text{B}_2\text{O}_3)+0,6(\text{Na}_2\text{O})=66,6$
3	$\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$	$12(\text{Na}_2\text{O}) - 40(\text{K}_2\text{O}) - 48(\text{SiO}_2)$	545	$+1(\text{K}_2\text{O})+0,3(\text{Na}_2\text{O})=67,9$
4	$\text{Li}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3$	$44(\text{Li}_2\text{O}) - 56(\text{B}_2\text{O}_3)$	600	$+5(\text{Li}_2\text{O})=72,9$
5	$\text{Na}_2\text{O}- \text{CaO}-\text{SiO}_2$	$21(\text{Na}_2\text{O}) - 5(\text{CaO}) - 74(\text{SiO}_2)$	725	$+13,1(\text{Na}_2\text{O})+3,1(\text{CaO})=89,1$

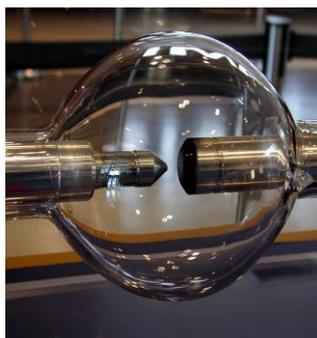
Проведена оценка энергетических затрат, необходимых для формирования стеклоэмалевого покрытия на стальной подложке. Обоснован выбор источника локального нагрева – сфокусированного излучения ксеноновой короткодуговой лампы высокого давления.

Спектр излучения излучения ксеноновой короткодуговой лампы лежит в интервале длин волн 0,2...2,4 мкм. Часть электрической энергии (50...60%), подведенной к лампе, преобразуется разрядом в излучение, спектр которого состоит из 10% излучения ультрафиолетовой области, 35% — видимой области и 55% — инфракрасной. Такой спектр эффективен для нагрева, как металлов, так и оксидов.

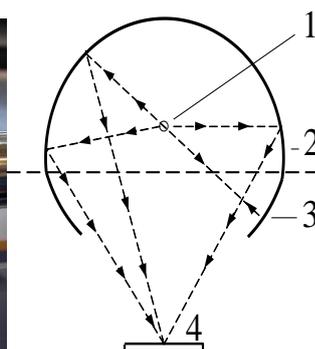
На Рис.1 представлены расчётная кривая плавкости эмалей, дуговая лампа и оптическая схема фокусировки излучения дугового источника.



а)



б)



в)

Рис.1 Кривая плавкости эмалей №261, УЭС-200 и УЭС-300 (а);
 (б) – ксеноновая водоохлаждаемая лампа высокого давления;
 (в) – оптическая сема фокусировки: 1-дуга (ближний фокус эллиптического отражателя), 2- эллиптический отражатель, 3- контротражатель; 4- мишень (дальний фокус эллиптического отражателя)

В работе использовались две установки воздействия сфокусированным излучением ксеноновой короткодуговой лампы высокого давления. Установка с плавной регулировкой мощности воздействия –СУМ-2 (рис.2 а) и разработанная нами установка импульсного воздействия со ступенчатой регулировкой мощности (рис.2 б). На рис. 2 представлены электрические схемы установок.

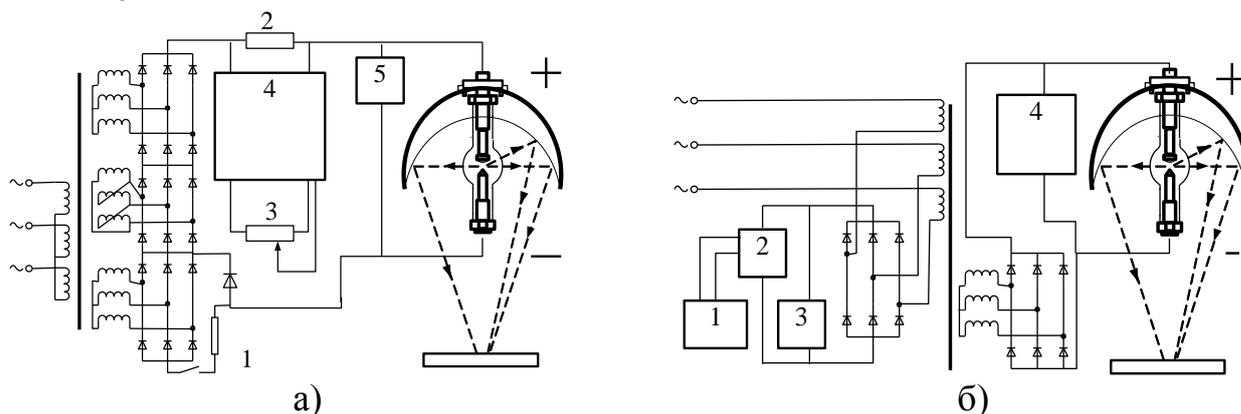


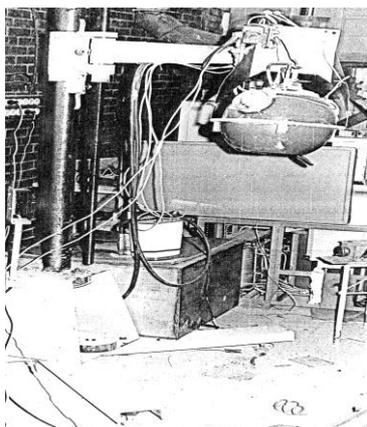
Рис. 2 (а) – упрощённая электрическая схема светолучевой установки СУМ-2:

1- вольтдобавка, 2- водоохлаждаемый шунт, 3- регулировка тока дуги ксеноновой лампы, 4- составной транзистор (80 транзисторов П210А на водоохлаждаемых радиаторах), 5- высокочастотный блок поджига

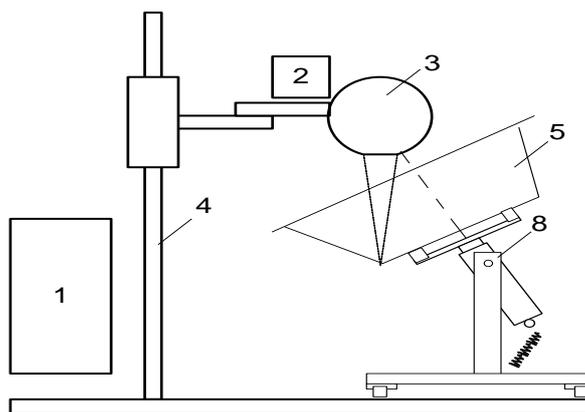
(б) – упрощённая электрическая схема экспериментальной полупромышленной импульсной светолучевой установки:

1- устройство управления частотой и длительностью импульса, 2- набор балластных сопротивлений, определяющих силу тока в импульсе (включаются в цепь на время импульса маслопогруженным коммутатором), 3- набор балластных сопротивлений, определяющих силу тока дуги ксеноновой лампы в отсутствии импульса (темновой ток), 4- высокочастотный блок поджига.

На рис. 3 приведён внешний вид работающей специализированной установки для удаления эмалевого покрытия чугунных изделий (а) и её схематический внешний вид – (б).



а)



б)

Рис. 3 (а) – внешний вид установки для импульсно-периодического воздействия сфокусированным излучением дугового источника.

(б) – схематический внешний вид специализированной установки для удаления эмалевого покрытия чугунных изделий: Установка содержит: импульсный (пульсирующий) источник питания (1), генератор лучистой энергии (3), блок поджига (2) колонну сварочного полуавтомата типа «Т-31021» (4), поворотную тележку(8) на которой крепится ванна (5) или другой объект воздействия

Установка является ступенчато регулируемым генератором мощного пульсирующего полихроматического излучения (солнечного спектра) и позволяет осуществлять светолучевое воздействие на мишень пульсирующим потоком энергии с плотностью мощности светового потока в импульсе (q_0) до 35 КВт/см^2 . Указано на необходимость приточно-вытяжной вентиляции из-за сильного озонирования воздуха ультрафиолетовым излучением.

Представлена методология диссертационного исследования, состоящая в сравнении свойств покрытий полученных светолучевым оплавлением и традиционным нагревом в печах сопротивления. Описаны использованные методы исследования микроструктуры поверхности, РФА, ИК-спектроскопия и методики исследования химстойкости, микротвёрдости, стойкости к теплосменам. Поверхностное натяжение стеклоэмалей под действием светолучевого нагрева определяли методом свободно падающих капель. На рис. 4 приведена структурно-методическая схема работы.



Рис. 4 Структурно-методическая схема работы

Третья глава содержит описание процессов воздействия светового излучения на эмали, процессов формирования стеклоэмалевых покрытий воздействием светового потока сфокусированного излучения ксеноновой короткодуговой лампы (в сравнении с традиционным обжигом в камерной печи сопротивления) и воздействие некогерентного полихроматического светового потока на покрытие холодных эмалированных изделий.

Дан расчёт коэффициента поверхностного натяжения эмалей для температуры 900 °С по А.Аппену и А. Дитцелю. Описан эксперимент по определению коэффициента поверхностного натяжения эмалей. Стержень исследуемой эмали помещался в теневой конус и постепенно подавался в область наибольшей концентрации светового излучения (рис. 5 а). Данные экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения эмалей представлены в виде графика (рис. 5 б).

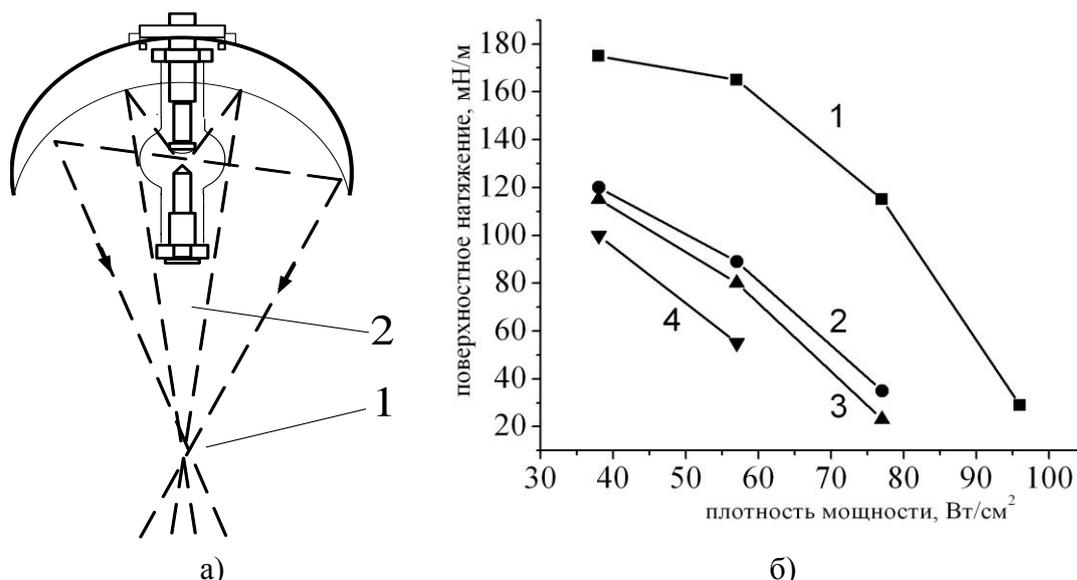


Рис. 5 (а) – оптическая схема фокусировки излучения ксеноновых дуговых ламп. 1 – область наибольшей концентрации светового излучения, 2 – теневой конус; (б) – результаты экспериментов по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения эмалей от плотности мощности воздействующего светового потока. 1 – ТК-17, 2 – УЭС-300, 3 – УЭС-200 и 4 – эмаль №261

Расчётные и экспериментальные значения поверхностного натяжения эмалей сведены в таблицу 3.

Таблица 3 Соотношение расчётных и экспериментальных коэффициентов поверхностного натяжения эмалей

Эмаль	$\sigma_{\text{Расчёт, 900}^\circ\text{C}}$ по Дитцелю	$q(\approx 38 \text{ Вт/см}^2)$		$q(\approx 57 \text{ Вт/см}^2)$		$q(\approx 77 \text{ Вт/см}^2)$	
		$\sigma_{\text{Эксп.}}$	$\sigma_{\text{Расчёт.}}/\sigma_{\text{Эксп.}}$	$\sigma_{\text{Эксп.}}$	$\sigma_{\text{Расчёт.}}/\sigma_{\text{Эксп.}}$	$\sigma_{\text{Эксп.}}$	$\sigma_{\text{Расчёт.}}/\sigma_{\text{Эксп.}}$
№261	265,5 мН/м	96	2,7	55	4,8	-	-
УЭС-200	289 мН/м	115	2,5	80	3,6	28	10,3
УЭС-300	312 мН/м	120	2,6	89	3,5	35	8,9

Данные таблицы показывают, что при плотности мощности светового воздействия 38 Вт/см^2 величина коэффициента поверхностного натяжения эмалей в 2,5-2,7 раза меньше, чем при 900°C печного обжига, а при 77 Вт/см^2 соотношение увеличивается до 8-10 раз.

Исследовано влияние плотности мощности воздействия на продолжительность светолучевого эмалирования образцов.

Образец нагревали сканированием в области наибольшей концентрации световой мощности (рис. 6), наносили эмаль погружением в порошок и аналогично оплавливали эмаль. При этом фиксировалось время эмалирования образца рис. 6 (в).

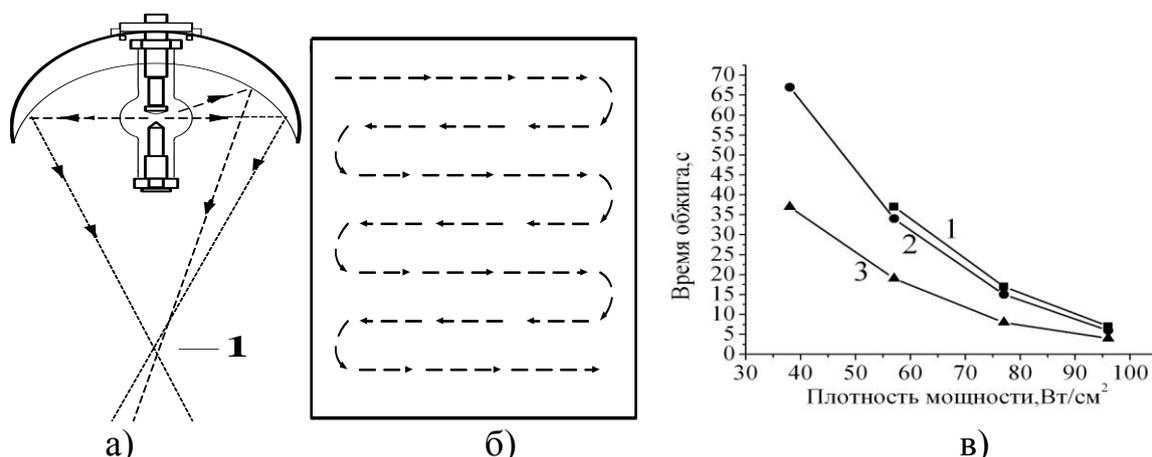


Рис. 6 Область наибольшей концентрации световой мощности – 1(а), схема сканирования светового пятна при обработке подложки – (б), (в) – зависимость времени обжига эмалей от плотности мощности лучистого потока: 1 – УЭС-300 (синяя), 2 – УЭС-200 (темно-зеленая), 3 – №261 (зеленая)

Среднее время светолучевого обжига образца (6 см²) в зависимости от плотности мощности воздействия (рис. 6 б) по мере увеличения интенсивности вводимой световой энергии всё меньше зависит от вида эмали (цвета). Аппроксимация продолжения графиков позволяет прогнозировать длительность обжига при 300-400 Вт/см² на уровне десятых или даже сотых долей секунды.

Таблица 4 Свойства эмалевых покрытий, полученных печным обжигом и светолучевым нагревом при различных плотностях мощности

Метод исследования	№261			УЭС-200			УЭС-300		
	Печной обжиг	q Вт/см ²		Печной обжиг	q Вт/см ²		Печной обжиг	q Вт/см ²	
		77	96		77	96		77	96
Микротв., ГПа	4,4	4,7	4,7	4,8	4,8	5,1	5,3	5,4	5,5
Химстойк.	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,06
Ст. к теплосм.	1	1	1	2	1-2	2	5	5-6	5-6

Такие же серии образцов изготавливались традиционным печным обжигом при температуре 860 °С.

Свойства эмалевых покрытий, полученных печным обжигом и светолучевым нагревом при различных плотностях мощности сведены в таблицу 4.

По данным таблицы 4 отличие покрытий сводится к незначительному увеличению микротвёрдости покрытий при световом обжиге.

Сравнение ИК-спектров эмалей, полученных печным обжигом и светолучевым нагревом даёт основание утверждать, что повышение микротвёрдости эмалевых покрытий после светолучевого обжига следует объяснить увеличением степени упорядочения структуры стекла.

Исследование микроструктуры поверхности эмалированных стальных образцов показало, что поверхность эмали при светолучевом обжиге отличается отсутствием пор и приповерхностных пузырей (рис. 7 и 8).

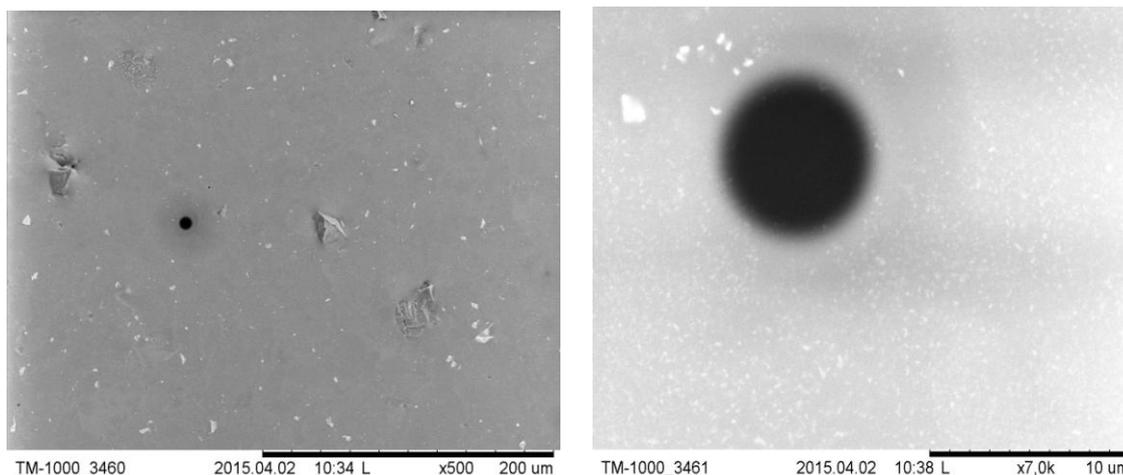


Рис. 7 Микроструктура участка поверхности образца. Эмаль № 261, печной обжиг (860°C)

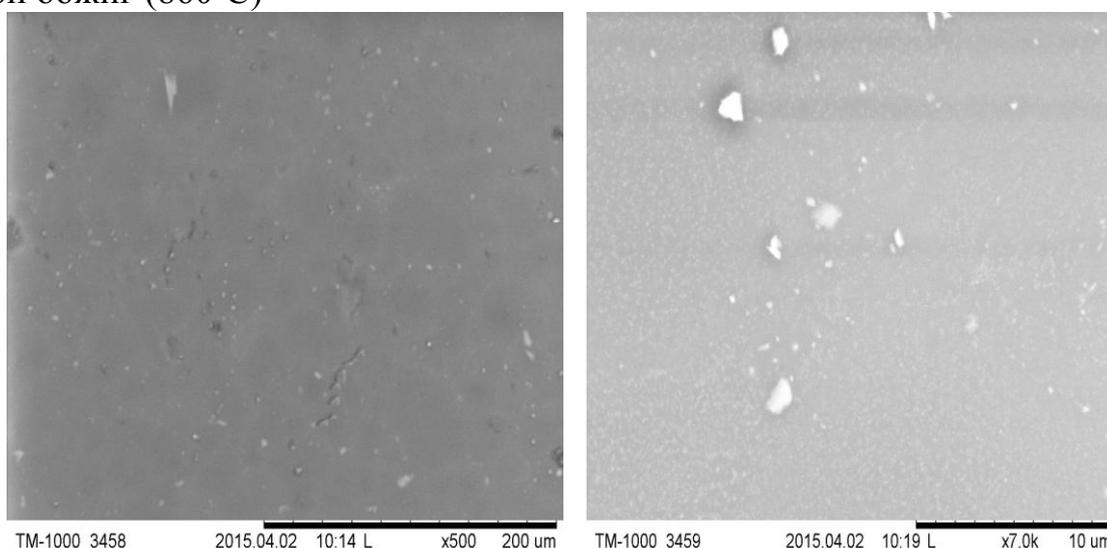


Рис. 8 Микроструктура участка поверхности образца. Эмаль № 261, светолучевая обработка (77 Вт/см^2)

Сравнение микротвёрдости, химстойкости и термостойкости позволяют утверждать, что покрытия, полученные светолучевым оплавлением соответствуют требованиям по практическому использованию эмалевых покрытий. А по качеству поверхности светолучевой обжиг предпочтителен в связи с отсутствием пор и приповерхностных пузырей.

Процесс ремонта дефектов СЭП (до 2 см в диаметре) был реализован и оптимизирован с помощью экспериментальной полупромышленной импульсной светолучевой установки (рис. 3). Импульсно-периодический нагрев с плотностью мощности воздействия $450\text{-}550 \text{ Вт/см}^2$ при длительности импульса $0,1\text{-}0,5 \text{ с}$, с периодом следования импульсов $0,5\text{-}2 \text{ с}$ за $5\text{-}15$ импульсов позволял осуществить заделку дефекта СЭП без существенного нагрева подложки образца и с хорошим качеством поверхности. Однако испытание на теплосмены вызвало трещины и небольшие сколы по границам места заделки. Это выявило необходимость дополнительной релаксирующей

обработки границ места заделки несколькими (6-8) импульсами на том же токе, но с увеличением в 1,5-2 раза светового пятна.

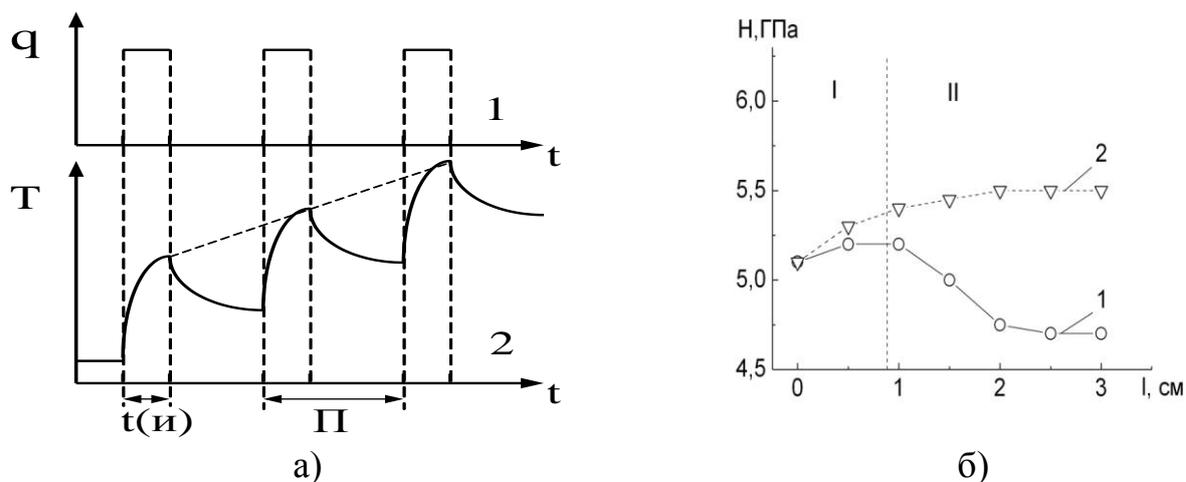


Рис. 9 Импульсно-периодическое воздействие внешнего локального источника нагрева - (а): 1 – воздействующая мощность, 2 – температура поверхности покрытия; (б) – распределение микротвердости стеклоэмалевого покрытия (I) и ремонтной зоны (II): основное покрытие УЭС-300 – ремонтное 261 (график 1); основное и ремонтное покрытие УЭС-300 (график 2)

Таблица 5 Стойкость к теплосменам и химическая стойкость стеклоэмалевых покрытий, отремонтированных с помощью светолучевого нагрева, в кипящей 20,24% HCl (площадь взаимодействия покрытия с кислотой 3,1 см², время взаимодействия 48 часов)

Основа	Заделочная эмаль	Химическая стойкость, мг/см ²	Стойкость к теплосменам (без релаксационной обработки)	Стойкость к теплосменам (с релаксационной обработкой)
УЭС-200	Основа	0,08	0	3
УЭС-300	Основа	0,06	1-2	5-6
УЭС-200	№261	0,09	0	3
УЭС-300	№261	0,08	0	3-4

Суммарная энергия, введённая в образец за время заделки, выравнивания толщины эмали и дополнительной релаксирующей обработки границ места заделки, сравнительно невелика и не вызывает существенного нагрева подложки в области ремонта и образца в целом. На рис. 9 (б) приведен характерный профиль микротвёрдости области ремонта.

Была определена стойкость к теплосменам и химическая стойкость стеклоэмалевых покрытий, отремонтированных с помощью светолучевого нагрева (таблица 5).

Результаты исследований, представленные на графике рис. 9 (б) и в таблице 5 позволяют утверждать, что возможно полноценное локальное восстановление стеклоэмалевого покрытия на месте дефекта на холодном стальном изделии с толщиной основы 4 мм импульсно-периодическим

воздействием сфокусированного излучения ксеноновой лампы без послеоперационного отжига всего изделия

Необходимость релаксационного воздействия на пониженной мощности подтверждена расчётом термонапряжений на периметре локально расплавленного стеклоэмалевого покрытия на стали.

Необходимость релаксационного воздействия на пониженной мощности подтверждена расчётом термонапряжений на периметре локально расплавленного стеклоэмалевого покрытия на стали.

Таблица 6 Оптимизация параметров воздействия при удалении эмалевого покрытия чугунных изделий

Толщина Эмали мм	Ток в импульсе I_n, A	Длительность импульса τ, c	Частота следования ν, c^{-1}	Скорость очистки $cm^2/мин$	Следствия воздействия
1-1,5	450	1,5	0,3	200	Скалывание
	450	1,0	0,4	300	
	500	0,5	0,5	320	
	550	0,5	0,5	140	Частичное оплавление СЭП
	600	0,5	0,5	80	
2,5-3,5	400	1,5	0,3	60	Скалывание
	400	1,5	0,4	80	Оплавление
	450	1,5	0,3	120	Скалывание
	450	1,0	0,4	140	
	500	1,0	0,3	145	
	500	1,0	0,4	140	
	500	0,5	0,5	140	
	550	0,5	0,5	80	Частичное оплавление
	600	0,5	0,5	30	Оплавление СЭП
1,5-2,5	400	1,5	0,3	80	Частичное оплавление
	400	1,5	0,4	120	Оплавление СЭП
	450	1,5	0,3	200	Частичное оплавление
	450	1,0	0,4	240	
	500	1,0	0,4	260	Скалывание
	500	1,0	0,5	280	
	500	0,5	0,5	280	Оплавление СЭП
	550	0,5	0,5	150	Скалывание
				150	Частичное оплавление

Для чугунных изделий необходимо перед восстановлением эмалевого покрытия старое покрытие удалять полностью. Традиционные способы очистки, основу которых составляют механическая и химическая очистка, трудоемки и характеризуются большими временными затратами. Они также вредны для окружающей среды.

Возможности разработанной нами установки позволяют реализовать процесс термоударного разрушения стеклоэмалевого покрытия на чугуне

путем импульсно-периодического воздействия мощным сфокусированным потоком света от ксеноновых дуговых ламп (таблица 6)

Наибольшая скорость очистки покрытия достигается при режимах: ток импульса дуги лампы I - 350-450А (плотность мощности в импульсе 150-200 Вт/см²); длительность импульса τ – 0,5-1с, частота следования импульсов ν – 0,4-0,5 с-1 (период 2-3 с).

Целесообразность этого режима подтверждена расчётом термонапряжений, возникающих на границе эмаль-чугун при нагреве эмали (рис. 10).

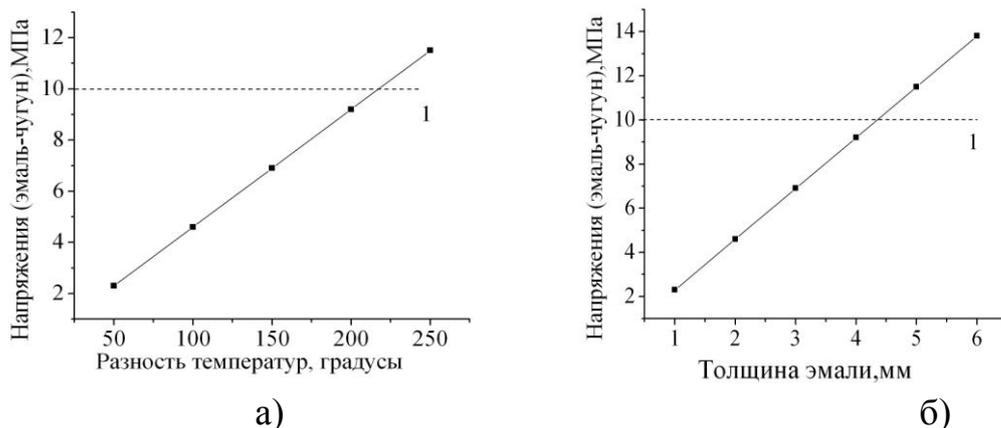


Рис. 10 Напряжения на границе эмаль-чугун в зависимости от разницы температур эмали и чугуна при толщине покрытия 2 мм; 1- прочность сцепления эмали на чугуне – (а), и (б) – напряжения на границе эмаль-чугун в зависимости от толщины покрытия при $\Delta T=100^\circ\text{C}$; 1- прочность сцепления эмали на чугуне

Импульсно-периодическое воздействие сфокусированным излучением дугового источника с плотностью мощности 150-200 Вт/см² на эмалевое покрытие чугунных изделий вызывает появление на границе раздела эмаль-чугун термонапряжений, превышающих прочность сцепления эмали. Происходит удаление эмалевого покрытия чугунных изделий по границе раздела эмаль-чугун

Светолучевое воздействие позволяет нагревать небольшие объёмы стеклокристаллической титансодержащей эмали ТК-17 до температур около 1100 градусов (то есть до состояния полной прозрачности или полной аморфизации). Светолучевое воздействие на быстро охлаждённый расплав ТК-17 вызывает возникновение центров кристаллизации и последующую кристаллизацию охлаждённого расплава (рис. 11)



Рис. 11 Пластина. Эмаль ТК-17, подвергнутая многократному локальному проплавлению сфокусированным излучением ксеноновой короткодуговой лампы

Внешний вид образца (рис.11) зафиксировал картину последовательности созданных в объёме образца температурных градиентов.

Был проведён РФА участков покрытия этого образца и исходного порошка эмали (рис.12).

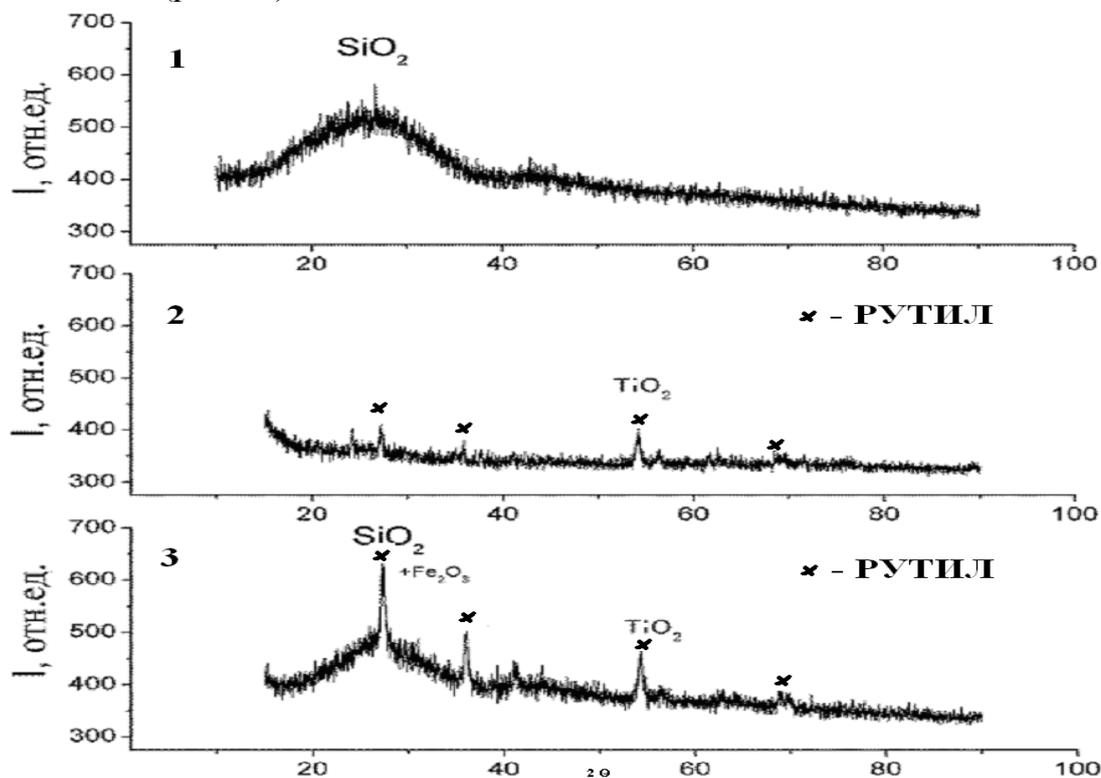


Рис. 12 РФА исходного порошка эмали ТК-17 (1), охлаждённого расплава ТК-17 (2) и расплава, частично закристаллизованного воздействием светового потока (3)

Светолучевое воздействие позволяет, как нагревать небольшие объёмы титансодержащих эмалей до температур около 1100 градусов (то есть до состояния полной прозрачности), так и воздействовать на быстро охлаждённый расплав, вызывая тем самым как возникновение центров окраски, так и их визуализацию с помощью процессов ситаллизации.

В четвёртой главе описаны светолучевые технологии эмалевых покрытий металлических изделий, разработанные по результатам исследований.

Импульсно-периодическое воздействие мощным сфокусированным светом ксеноновой дуговой лампы позволяет осуществить как термоударное разрушение и удаление эмалевого покрытия чугунных изделий, так и локальное восстановление стеклоэмалевого покрытия стальных изделий без последующего релаксационного отжига всего изделия.

Оба этих технологических процесса были реализованы с помощью экспериментальной полупромышленной импульсной светолучевой

установки. Установка является ступенчато регулируемым генератором мощного пульсирующего полихроматического излучения (солнечного спектра) и позволяет осуществлять светолучевое воздействие на мишень пульсирующим потоком энергии с плотностью мощности светового потока в импульсе (q_0) до 35 КВт/см² (рис. 3).

На рис. 13 приведена технологическая схема реэмалирования чугунных изделий с использованием светолучевого удаления дефектного покрытия.



Рис. 13 Технологическая схема реэмалирования чугунных изделий с использованием светолучевого удаления дефектного покрытия

Технологическая схема локального восстановления стеклоэмалевого покрытия стальных изделий приведена на рис. 14.

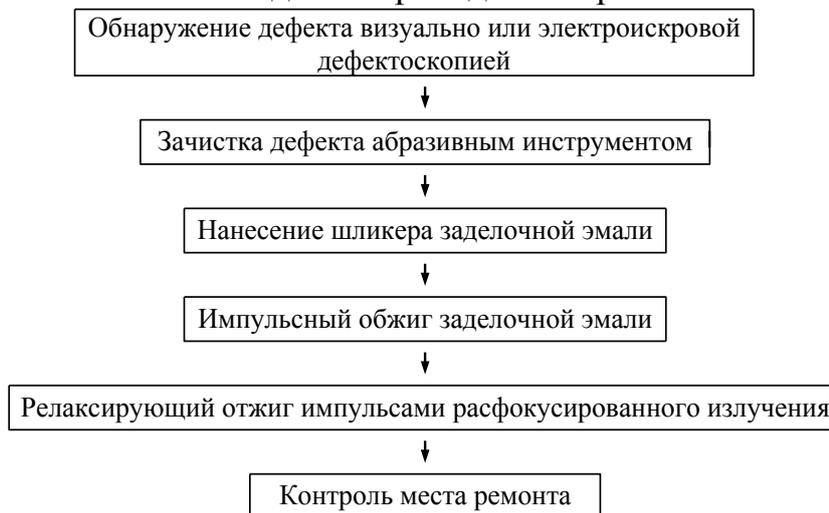


Рис. 14 Технологическая схема светолучевого ремонта дефектов стеклоэмалевого покрытия

Светолучевое воздействие в режиме плавной регулировки мощности (установка СУМ-2) даёт широкий спектр возможностей по экспериментальному экспресс-эмалированию как плоских, так и объёмных небольших образцов позволяет оперативно изготавливать серии образцов для испытаний новых составов, послойного нанесения

различных фритт, вариантов концентраций пигментов, кристаллизаторов и кристаллических включений, формировать диэлектрические (изолирующие) покрытия на небольших металлических изделиях сложной объёмной конфигурации обеспечивая, например, защиту от высокотемпературной газовой коррозии или термически нагружаемой электрической изоляции, декорировать поверхность эмалированных изделий металлическими фрагментами, вкраплениями смальты, цветного стекла и многое другое.

Технологическая схема светолучевого экспресс-эмалирования стальных образцов приведена на рис. 15.

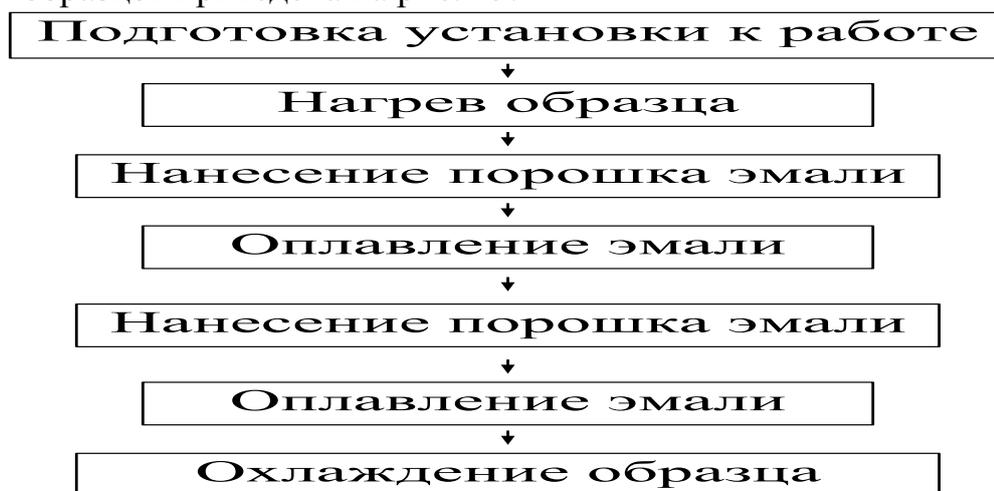


Рис. 15 Технологическая схема светолучевого экспресс-эмалирования стальных образцов

Светолучевое воздействие в режиме плавной регулировки мощности (установка СУМ-2) позволяет, как нагревать небольшие объёмы титансодержащих эмалей до температур около 1100 градусов (то есть до состояния полной прозрачности), так и воздействовать на быстро охлаждённый расплав, вызывая тем самым как возникновение центров окраски, так и их визуализацию с помощью процессов ситализации. Это даёт возможность светолучевого изготовления изделий в технике «витражная эмаль» методом вытягивания изделия из расплава с последующим декорированием охлаждённого расплава в световом потоке (рис16).



Рис. 16 Технологическая схема светолучевого изготовления изделий в технике «витражная эмаль» методом вытягивания изделия из расплава с последующим декорированием охлаждённого расплава в световом потоке

Выводы по работе:

1. Использование эллиптического отражателя для фокусировки излучения ксеноновой короткодуговой лампы позволяет осуществить энергетическое воздействие с плотностью мощности порядка 200 Вт/см^2 на площади до 3 см^2 , достаточное для расплавления кислотоустойчивых эмалей на стальных подложках толщиной до миллиметра, что делает возможным создание установок для реализации технологических процессов нанесения и обработки эмалевых покрытий.

2. Разработанная установка обеспечивает возможность воздействия на обрабатываемый объект с плотностью мощности некогерентного широкодиапазонного излучения до 12 кВт/см^2 в режиме ступенчато регулируемого постоянного воздействия и до 36 кВт/см^2 в импульсном и импульсно-периодическом режиме.

3. Установлено, что светолучевое воздействие сфокусированным излучением дугового источника с плотностью мощности порядка 200 Вт/см^2 позволяет наносить стеклоэмалевое покрытие на стальные изделия с толщиной металла до миллиметра с характеристиками покрытия, удовлетворяющими требованиям для их практического использования. Поверхность этих покрытий отличается отсутствием пор и приповерхностных пузырей.

4. Импульсно-периодическое воздействие сфокусированным излучением дугового источника с плотностью мощности $450-550 \text{ Вт/см}^2$, длительностью импульса $0,1-0,5$ секунды и периодом следования $0,5-1$ секунда позволяет осуществлять локальный ремонт дефектов стеклоэмалевого покрытия стальных изделий с толщиной металла до 4 мм на холодном изделии без послеоперационного отжига всего изделия. Площадь дефекта до $2,5 \text{ см}^2$.

5. Импульсно-периодическое воздействие сфокусированного излучения ксеноновой дуговой лампы при плотности мощности воздействия $150-200 \text{ Вт/см}^2$, длительностью $0,5-1 \text{ с}$ и с периодом следования $2-3$ секунды на эмалевое покрытие чугунных изделий при площади воздействия $6-8 \text{ см}^2$ вызывает напряжения на границе эмаль-чугун, превышающие прочность сцепления покрытия. Эмалевое покрытие чугунных изделий удаляется по границе раздела чугун-эмаль.

6. Светолучевое воздействие позволяет как нагревать небольшие объёмы титансодержащих эмалей до температур порядка 1100 градусов (то есть до состояния полной прозрачности), так и воздействовать на быстро охлаждённый расплав, вызывая тем самым как возникновение центров окраски, так и их визуализацию с помощью процессов ситаллизации, что даёт возможность изготовления изделий в технике витражной эмали методом вытягивания из расплава.

7. Светолучевое воздействие в режиме плавной регулировки мощности даёт широкий спектр возможностей по экспериментальному экспресс-эмалированию как плоских, так и объёмных небольших образцов.

Основные публикации по диссертационной работе:

Статьи в центральной печати

1. Алеутдинов А.Д. Устранение дефектов стеклоэмалевого покрытия воздействием сфокусированного светового излучения // Известия вузов. Физика. - 2013. Т. 56, № 1 / 2. – С. 285 – 286.

2. А.Д. Алеутдинов. Импульсная светолучевая технология удаления старого стеклоэмалевого покрытия чугунных ванн. / Системы. Методы. Технологии 2013 № 2 (18) с. 124-127.

Патенты и заявки на изобретение

3. Патент № 2245940 РФ МПК С23D Способ декорирования изделий витражной эмалью [Романов Б. П.], Алеутдинов А.Д., Отмахов В.И. Оpubл. 10 Февраля, 2005.

4. [Романов Б. П.], Артиш А.С., Зуев А.М., Алеутдинов А.Д. Способ удаления стеклоэмалевых покрытий с металлических изделий: А.с. 1791466.Рос. Федерация. Заявка №4710609, 03.06.1989; опубл. 30.01.1993, Б.И. № 4.

Другие публикации

5. S A Ghyngazov, A D Aleutdinov, S A Ghyngazov, T S Mylnikova¹, P A Luchnikov. Thermal shock removal of defective glass-enamel coating from cast-iron products. 2015 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 81 012069.
6. Гынгазов С.А., Алеутдинов А.Д. Эмали и их применение: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2014 – 57с.
7. А.Д. Алеутдинов. Локальное восстановление стеклоэмалевого покрытия воздействием сфокусированного светового излучения. / Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции, 03– 07 мая 2013 г., г. Ялта.– Киев: АТМ Украины, с. 5-7.
8. Романов Б. П., Алеутдинов А.Д, Светолучевая технология очистки старого покрытия эмалированных ванн/ Изв. вузов. Строительство, 2002, №3, с. 58-61.
9. Эмалирование малоразмерных стальных изделий светолучевым нагревом./ А.Д. Алеутдинов.// Всерос. Конф. “Создание защитных и упрочняющих технологии с использованием концентрированных потоков энергии” (Барнаул, 1996) с.46-47.
10. Светолучевое формирование диэлектрических защитных покрытий малоразмерных стальных изделий./ А.Д. Алеутдинов.// Конф., посвященная 100-летию строительного образования в Сибири (Томск, 1999г., с.54-55.
11. Светоиндуцированная кристаллизация охлаждённого расплава титансодержащих эмалей./ А.Д. Алеутдинов.// III Всероссийская научная конференция «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий» (Томск, 2004), с. 61-83.
12. Аморфизация и кристаллизация титансодержащих эмалей светолучевым нагревом./ А.Д. Алеутдинов.// IV Междунар. научн. конф. «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2004), с.84-86.