

Ю. И. БАКАЛИН

Макроструктура стеклоэмалевых покрытий

**Минск
Издательство БГУ им. В. И. Ленина
1978**

6П7.7
Б 19
УДК 666.293

Рекомендована Советом Брестского
инженерно-строительного института

Рецензент — доктор технических наук,
профессор *Ю. Я. Эйдук*

Макроструктура стекломалевых покрытий. Бакалиц Ю. И.
Минск, Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1978.

В работе представлены результаты отечественных и зарубежных исследований качественных и количественных характеристик макроструктуры стекломалевых покрытий. Дается анализ процессов и явлений, способствующих образованию определенного вида макроструктуры силикатных и тугоплавких неметаллических материалов в состоянии расплава. Приводятся рекомендации по методам исследования и приемам воздействия на макроструктуру покрытий с целью повышения эффективности производства и повышения общего качества продукции. Указаны направления дальнейших исследований в поиске прогнозирования оптимальной макроструктуры и новые экономически выгодные области применения эмалированной стали в народном хозяйстве.

Ил. 36, табл. 10, библиограф. 107 назв.

20503-021
Б _____ резерв-78
М 317-78

© Издательство БГУ им. В. И. Ленина, 1978.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решениями XXV съезда КПСС перед промышленностью нашей страны поставлена задача резкого повышения качества и эффективности производства. Известно, что силикатные покрытия значительно повышают долговечность и качество громадного количества разнообразных изделий производства и деталей оборудования. Процессы, происходящие при формировании силикатного покрытия, являются определяющими на конечной стадии изготовления продукции, и их дальнейшее изучение наряду с поиском оптимальных составов будет способствовать как оптимизации параметров технологических режимов, так и созданию экономически выгодных вариантов машин и оборудования. Завершающие операции по отделке внешней поверхности изделий в значительной степени определяют качество продукции, срок ее службы, экономическую эффективность и конкурентоспособность. На современном этапе научно-технической революции качество становится особо важной характеристикой в связи с выходом на мировой рынок отечественной продукции, с развитием международных связей нашей страны и расширяющимся обменом научно-технической информацией между странами. Поэтому повышение качества продукции всегда остается актуальной задачей.

Проблема получения долговечных и высококачественных силикатных покрытий решается различными отраслями науки и техники по линии усовершенствования технологии получения стекла и ситаллов, при исследовании новой керамики и глазурования, изучении керамических покрытий на металлах и эмалировании металлов наряду с поисками других новейших защитных и декоративных покрытий. Перспективность силикатных покрытий — в надежном обеспечении долговечности изделий и оборудования, в удобстве регулирования фактуры поверхности при незначительном изменении состава. При этом используется простое технологическое оборудование

и достигается высокая эффективность производства. Силикатные покрытия наносятся на разнообразные материалы: металл, керамику, стекло и даже железобетон. Но разбросанность исследований покрытий и отсутствие единого методического подхода к оценке их качества, локальное значение многих выводов при наличии громадного количества экспериментального материала по составам эмали и глазури, майолики и силикатных красок, отсутствие надежных критериев сопоставления результатов даже близких силикатных систем, статичность характера научных исследований в рассматриваемой области, ограничения ведомственного порядка, недостаточно высокий уровень контроля промежуточных этапов формирования силикатных покрытий и некоторые другие причины зачастую сдерживают более широкое внедрение в народное хозяйство высококачественных и долговечных силикатных покрытий.

Формирование стеклоэмалевых покрытий происходит при взаимодействии силикатного расплава с химически активной поверхностью изделия, результат которого определяется действием закономерностей, связывающих поверхностные свойства расплавов со строением и физико-химическими свойствами расплавов и кристаллических веществ, образующихся из этих расплавов.

Макроструктура неорганических силикатных покрытий образуется в результате ряда химических, физических и физико-химических процессов, связанных как с составами покрытия и подложек, так и с кинетикой и динамикой развития процессов в жестких граничных условиях. Особенностью формирования определенной макроструктуры силикатных покрытий являются сравнительно малые скорости движения газовой фазы в очень вязкой среде даже при повышенных температурах ($T > 750^\circ\text{C}$). Оплавление эмали и глазури, имеющее в производственных условиях продолжительность несколько минут, с последующим охлаждением, как правило, «замораживает» в слое силикатного расплава значительное количество пузырьков различных размеров (от $5 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-3}$ м). Размеры пузырьков, их количество и распределение в слое покрытия определяют основу макроструктуры и оказывают большое влияние на физико-механические свойства, долговечность и антикоррозионные характеристики покрытия. Поэтому подбор состава покрытия, качество изделия в целом, а также эффективность произ-

родственного цикла существенно зависят от надежности обеспечения оптимальной макроструктуры покровного слоя.

Узловым моментом получения того или иного вида макроструктуры является процесс оплавления покрытия, когда в условиях высоких температур интенсивно проходят химические реакции. Образование и движение газовой фазы через силикатный расплав может сопровождаться активным тепло- и массообменом. При анализе условий образования определенного вида макроструктуры покрытия или картины газонасыщения силикатного расплава автором были использованы работы по исследованию газообразования в жидких средах в условиях протекания интенсивных химических реакций, проведенные им в Институте тепло- и массообмена АН БССР и Институте ядерной энергетики АН БССР.

За последние двадцать лет опубликовано много статей, посвященных эмалированию металлов. Однако до настоящего времени нет строгой теории образования макроструктуры силикатных покрытий и нет даже надежных рекомендаций по оценке движения газовой фазы в силикатном расплаве. Данная работа представляет собой попытку обобщить многочисленные результаты отечественных и зарубежных исследователей, полученные при изучении различных аспектов эмалирования изделий, дать им физическую интерпретацию с позиций физико-химической гидродинамики и представить некоторые материалы, связанные с перспективой использования эмалирования в новых областях народного хозяйства.

Особенностью эмалирования строительных изделий является большая вероятность повышенного газовыделения системы подложка — покрытие. Поэтому процессы газообразования и поведения газовой фазы в расплаве приобретают первостепенное значение. Этим вопросам посвящена значительная часть монографии.

В главе I описываются причины зарождения газовых пузырей в расплаве и основные химические реакции, связанные с появлением газовой фазы. При этом учитываются динамические и кинетические условия газонасыщения слоя расплава. Дается описание механизма газонасыщения вязких сред с анализом специфических особенностей образования макроструктуры силикатных расплавов.

Теоретическому обоснованию появления различных

ситуаций элементов макроструктуры в двухфазном вязком слое с газовой фазой посвящена глава II. Материал излагается с позиций равновесной термодинамики фазовых переходов и физико-химической гидродинамики. Впервые представлены зависимости, позволяющие производить количественную оценку движения газовой фазы в расплаве. Отмечается связь макроструктуры с прочностью покрытий и описываются контуры оптимизации структуры на базе методов планирования экспериментов.

Глава III посвящена моделированию процессов газо-выделения в вязких расплавах; изложены главные положения теории подобия и описаны методы исследования макроструктуры покрытий и техники эксперимента. Даются рекомендации по выбору моделирующих жидкостей и приводятся примеры моделирования газонасыщения слоя расплава.

В главе IV проводится анализ влияния технологических процессов на образование макроструктуры покрытий. Описывается влияние тепловых режимов на газообразование в слое расплава и воздействие технологических операций до стадии обжига на качество покрытия. Часть материала этой главы посвящена авторским исследованиям по воздействию работы узлов нанесения эмали на качество покрытия. Приводятся расчетно-теоретические и экспериментально обоснованные рекомендации по использованию пневматических узлов нанесения шликера силикатной эмали. Изложены мероприятия по устранению нежелательных газовых включений больших размеров в покрытии.

Глава V дает представление о некоторых новых областях применения эмалированных изделий в народном хозяйстве. Автор описывает собственный опыт промышленного внедрения эмалированных изделий на строительстве новых объектов и при ремонтных работах в городах и населенных пунктах БССР. Обобщается аналогичный опыт других республик нашей страны. Описывается развитие технологии эмалирования деталей и узлов оборудования в судостроении. Представлены перспективы эмалирования отдельных частей агрегатов в общей энергетике.

Многие выводы и обобщения не вошли в монографию, поскольку они на высоком современном уровне представлены в работах А. А. Аппена и К. П. Азарова, В. В. Варгина и Л. Д. Свирского, Ю. Я. Эйдука и

Н. С. Смирнова, Г. И. Журавлева и Д. Ф. Ушакова, Ю. Д. Барина и Б. З. Певзнера, Я. И. Белого и В. Э. Мишень и др.

Изложенный в данной монографии подход к анализу условий формирования макроструктуры стеклоэмалевых покрытий приемлем для большинства случаев эмалирования изделий и тем самым дополняет традиционные методы исследования технологии силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, способствуя вскрытию потенциальных возможностей производства с целью повышения его производительности и качества продукции.

Автор выражает признательность докторам технических наук И. А. Рыбьеву и А. А. Аппену, кандидатам технических наук Н. С. Смирнову и Б. З. Певзнеру за обсуждение отдельных разделов монографии, а также докторам технических наук Ю. Я. Эйдуку и Б. К. Демидовичу за критические замечания и пожелания, которые способствовали улучшению качества рукописи.

В подготовке рукописи большую помощь оказали старший научный сотрудник Брестского инженерно-строительного института Н. Н. Павлусенко и доцент того же института В. И. Никитин, за что приношу им благодарность.

Автор заранее выражает признательность всем, кто сообщит о замечаниях и пожеланиях, дополнениях и необходимых изменениях по адресу: 224017, г. Брест-17, ул. Московская, 267, Брестский инженерно-строительный институт, Бакалина Ю. И.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

<p>w — скорость движения;</p> <p>h — толщина слоя; l — характерный размер;</p> <p>τ — время;</p> <p>t — температура, °С; T — температура, К;</p> <p>Θ — безразмерная температура;</p> <p>d — диаметр пузыря;</p> <p>H — габаритный размер изделия;</p> <p>ρ — плотность;</p> <p>p — давление;</p> <p>μ — динамическая вязкость;</p> <p>ν — кинематическая вязкость;</p> <p>g — ускорение свободного падения;</p> <p>β — температурный коэффициент расширения;</p> <p>a — температуропроводность;</p> <p>λ — теплопроводность;</p> <p>c — теплоемкость;</p> <p>α — коэффициент теплоотдачи;</p> <p>σ — поверхностное натяжение;</p> <p>φ — объемное содержание газовой фазы;</p> <p>R^g — газовая постоянная;</p> <p>Φ — термодинамический потенциал;</p> <p>v — объем;</p> <p>V — внутренняя энергия;</p> <p>S — энтропия;</p>	<p>G — масса;</p> <p>δ — глубина погружения пузыря;</p> <p>k — константа в степенной функции: $\sigma_n = k\varepsilon^n$;</p> <p>$L$ — характерный поперечный размер покрытия, учитывающий размеры газовых включений и прослоек между ними;</p> <p>$\sigma_{\theta, \lambda}$ — напряжение;</p> <p>ε — деформация;</p> <p>ν^n — коэффициент Пуассона;</p> <p>p_σ — равномерно распределенное давление;</p> <p>x, y, z — координаты;</p> <p>X, Y, Z — безразмерные координаты;</p> <p>W — относительная скорость;</p> <p>R — радиус пузыря;</p> <p>Re — критерий Рейнольдса;</p> <p>Ho — » гомохронности;</p> <p>Ga — » Галилея;</p> <p>Gr — » Грасгофа;</p> <p>Ar — » Архимеда;</p> <p>Pe — » Пекле;</p> <p>Pr — » Прандтля;</p> <p>Fo — » Фурье;</p> <p>Nu — » Нуссельта;</p> <p>Bi — » Био;</p> <p>We — » Вебера;</p> <p>Fr — » Фруда;</p> <p>Eu — » Эйлера.</p>
--	---

ГЛАВА I. МАКРОСТРУКТУРА КАК РЕЗУЛЬТАТ ФАЗОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАСПЛАВЕ

Основные причины появления газовой фазы в расплаве эмали

Макроструктура неорганического силикатного покрытия определяется пространственным распределением пузырьков газа в толще покрытия и их размерами. Поэтому для понимания причин появления того или иного вида макроструктуры покровного, или грунтового, слоя эмали (или глазури) необходимо ясно представлять возможные источники газовыделений и характер поведения газовой фазы в слое расплава, имеющего, как правило, большую вязкость. В связи с химической неоднородностью рассматриваемой системы, многообразием причин появления газовой фазы и высокой вязкостью расплава формирование макроструктуры слоя и кинетические характеристики новых образований существенно отличаются от формирования газовых включений в однородных системах, например, при кипении, дегазации, барботаже и т. д.

Большая вязкость расплавленной стекломассы препятствует достижению равновесия между стеклом и газом даже при определенной химической активности. Пересыщенные газом стеклообразные материалы медленно отдают его в атмосферу, а насыщение расплава газом протекает с весьма малыми скоростями. Поэтому исследование взаимодействия газов со стеклообразными материалами представляет собой экспериментально трудную задачу: существующие методы анализа газа, содержащегося в стекле, недостаточно совершенны и дают чаще всего качественные результаты [1].

Известно, что свойства стекол и ход реакций стеклообразования обусловлены составом исходных материалов и подложки. От состава зависит как температура плавления, так и активность процесса стеклообразования в конкретных условиях: корродирующее действие расплава на подложку, вязкость и поверхностное натяжение. Эти свойства находятся в прямой связи с процес-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время проблема получения оптимальной макроструктуры силикатных покрытий выходит за рамки исследований только стеклоэмалевых покрытий. Синтезируемые сейчас многочисленные покрытия и комбинированные изделия также требуют систематизированного прогнозирования количественного и качественного распределения составных частей макроструктуры, в том числе и газовой фазы. Поэтому представляет интерес дальнейшее развитие исследований в области формирования покрытий не только с учетом влияния исходного состава, но и с анализом воздействия компонентов макроструктуры на конечные свойства и качество изделий. С точки зрения направления дальнейших исследований интересны и перспективны исследования связей макроструктуры и микроструктуры стеклоэмалевых покрытий, переход от рассмотрения гомогенных частей систем к гетерогенным и последующий дифференцированный подход к элементам структуры с широким обобщением для комбинированных изделий.

Первоначальный состав системы количественно определяет соотношение жидкой фазы расплава и газов, что позволяет рассматривать задачу в общем плане для неограниченного числа источников газовой фазы с учетом их интенсивности и времени действия в конкретных практических условиях.

Скорости движения газовой фазы в расплаве описываются соотношением типа (2.14). По нему можно оценить время пребывания пузырей заданного размера при их движении через конкретную толщину расплава стеклоэмалевого покрытия и сопоставить со временем пребывания изделия в оптимальном режиме обжига. Таким образом, закладывается основа систематизированного прогнозирования количественного и качественного распределения газовой фазы в расплаве или оптимальной макроструктуры стеклоэмалевого покрытия.

Моделирование газовыделения в вязких расплавах в жестких граничных условиях позволяет вскрывать совокупные эффекты структурообразования в кинетическом плане с учетом многих технологических особенностей процесса эмалирования. В этом методе научно-технического поиска очевиден потенциал для трансмерного прогнозирования технологии комбинированных изделий и имитационного моделирования сложных динамических систем (структурных моделей).

С учетом взаимной корреляции закономерностей и комбинации теории решений с понятием эффективности систем моделирование дает многообещающие подходы в понимании связи конечного качества продукции с исходными компонентами системы или в прогнозе «состав — свойство». В монографии представлены только контуры такого подхода применительно к силикатному расплаву в тонком слое, и развитие его содержит в себе большой объем полезной информации как в научном, так и в техническом плане.

Исследование кинетического аспекта получения того или иного вида макроструктуры позволяет дать полезные рекомендации для производства по росту производительности оборудования и качества выпускаемой продукции, и это является техническим потенциалом существующих предприятий и проектируемых технологических линий.

Поскольку применение стеклоэмалевых покрытий — часть общей проблемы защиты материалов и изделий от воздействия агрессивных сред, использование существующих достижений в области эмалирования в народном хозяйстве будет способствовать претворению в жизнь и реализации исторических решений XXV съезда КПСС и других директивных документов партии и правительства по развитию научно-технического прогресса в нашей стране.

ЛИТЕРАТУРА

1. Славянский В. Г. Газы в стекле. М., 1957.
2. Malleher H.— «Mitt. der dtsh. Emailfache», 17, № 7, 39—43, 1969.
3. Weimer G.— «Glass-Email-Keramo-Techn.», 11, № 12, 445—448, 1960.
4. Горбатенко В. Е., Романенко А. А. Динамика газовых пузырей в покрытии при эмалировании стали. Сообщение III. Исследование условий образования газов H_2CO и CO_2 в системе эмаль—металл.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 2. Новочеркасск, 1974.
5. Аппен А. А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. М., 1967, с. 10.
6. Эмалирование металлических изделий. Под ред. проф. В. В. Варгина. Л., 1972.
7. Петцольд А. Эмаль. Пер. с нем. М., 1958.
8. Seinsinger E. E., Berlinghif K. I.— «Amer. Ceram. Soc.», 13(2), 126—142, 1930.
9. Zappfe C. A., Simse E. I.— «Amer. Ceram. Soc.», 23(7), 187—219, 1940.
10. Poste E. P.— «Bull. Amer. Ceram. Soc.», 11(18), 201—215, 1932.
11. Азаров К. П., Давыдов П. П. О выделении газов при формировании эмалевого покрытия.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов. Л., 1963, с. 18—24.
12. Азаров К. П., Гречанинова С. Б. Методы исследования образования газовых пузырьков в зоне контакта расплава с металлом и кристаллизации эмалей.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов. Л., 1959, с. 117—120.
13. Азаров К. П., Зсрин В. Г. О роли газов в процессе обжига грунтового покрытия.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов. Л., 1959, с. 134—140.
14. Азаров К. П. О процессах формирования эмалевых покрытий на стали.— «Труды Новочеркасского политехн. ин-та». Новочеркасск, 1958.
15. Баринов Ю. Д. и др. Влияние некоторых окислов на вспучивание грунтовых эмалей.— В сб.: Эмалирование металлов. Киев, 1962.
16. Горбатенко В. Е. и др. Некоторые вопросы динамики газовых пузырей в покрытии при эмалировании.— «Тез. докл. конференции «Перспективные направления в развитии науки и технологии производства цемента, огнеупоров, стекла и эмалей». Днепропетровск, 1975, с. 110.
17. Горбатенко В. Е., Романенко А. А. Динамика газо-

вых пузырей в покрытиях при эмалировании стали. Сообщение II. Экспериментальные исследования процесса развития пузырей в слоях эмали.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 2. Новочеркасск, 1974.

18. Горбатенко В. Е., Романенко А. А., Маркина Л. В. Динамика газовых пузырей в покрытиях при эмалировании стали. Сообщение I. Определение диаметра и глубины залегания пузырей.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 1. Новочеркасск, 1974.

19. Горбатенко В. Е., Кричевский Ю. И. О расчете напряжений с учетом неоднородности микроструктуры эмалевого слоя. Макроструктура и эксплуатационные свойства эмалевых покрытий.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов». Челябинск, 1976, с. 120.

20. Бакалин Ю. И. К теории газовыделения в среде большой вязкости.— «Вестн АН БССР», сер. физ.-энерг., 1977, № 2, с. 101—103.

21. Демченко Н. С., Ивахин С. И. Формирование пористой структуры эмалевого покрытия.— «Стекло и керамика», 1973, № 3, с. 25—26.

22. Бакалин Ю. И. и др. Исследование пузырчатой структуры силикатного покрытия с помощью моделирующих жидкостей.— «Тез. докл. конференции «Перспективные направления в развитии науки и технологии производства цемента, огнеупоров, стекла и эмалей». Днепропетровск, 1975, с. 110.

23. Городчанин С. В. и др. Макроструктура и эксплуатационные свойства эмалевых покрытий.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов», Челябинск, 1976, с. 20.

24. Бакалин Ю. И. Некоторые вопросы теории газовыделений при эмалировании металлов.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов». Челябинск, 1976, с. 35.

25. Романенко А. А. Исследования в области непроницаемости (сплошности) стеклоэмалевых покрытий на стальных трубах. Автореф. канд. дис. Новочеркасск, 1974.

26. Дьяконов Г. И. Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов. М., 1956.

27. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газожидкостных систем. М., 1958.

28. Технология стекла. М., 1967.

29. Китайгородский И. И., Кешишян Т. Н. Пеностекло. М., 1953.

30. Демидович Б. К. Пеностекло. Минск, 1975.

31. Каменецкий С. П. Перлиты. М., 1963.

32. Жуков А. В. и др. Вспученный перлит. Киев, 1960.

33. Жуков А. В. и др. Пористые материалы и заполнители для легких бетонов. Киев, 1958.

34. Maпegold E.— «Die Schaum. Heidelberg», 17, 1953.

35. Аппен А. А. Некоторые физико-химические и технологические аспекты получения обжиговых покрытий из расплавов и полурасплавов.— В сб.: Защитные высокотемпературные покрытия («Труды V Всесоюзного совещания»). Л., 1972.

36. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. Новая область. М., 1958.

37. Лыков А. В. Теория сушки. М., 1968, с. 210—211.

38. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. М., 1945.

39. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. М., 1948.

40. Несис Е. И. Кипение жидкостей. М., 1973, с. 103.
41. Бакалин Ю. И., Левин Г. М. Теплообмен при кипении воды в кольцевой щели контура с естественной циркуляцией.— «Изв. вузов СССР. Энергетика», 1963, № 12, с. 119—121.
42. Бакалин Ю. И. О характеристике циркуляционного потока в испарительных аппаратах.— «Вестн АН БССР», сер. физ.-техн., 1965, № 4, с. 34—38.
43. Volmer M.— «Z. f. Elektrochemie», 35, 555, 1929.
44. Перминов А. А. Влияние окислов ванадия на адгезию расплавленных силикатов и твердой стали.— В сб.: Эмаль и эмалирование металлов. Л., 1967.
45. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.
46. Рогожин Ю. В. и др. Повышение прочности системы металл—эмаль путем структурных превращений.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 2. Новочеркасск, 1974, с. 66.
47. Бакалин Ю. И. Применение теории подобия к анализу процессов газообразования в силикатных покрытиях.— «Тез. докл. конференции «Перспективные направления в развитии науки и технологии производства цемента, огнеупоров, стекла и эмалей». Днепропетровск, 1975, с. 109.
48. Ламб Г. Гидродинамика. М., 1947.
49. Anderson O.— «Svensk Papperstidning», 59, 540, 1956.
50. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М., 1976, с. 105—107, 428—446.
51. Smoluchowski M.— «Bull. Inter. acad. Polomaise sci. lett», 1(A), 28, 1911.
52. Lorentz H. A.— «Abhandl. theoret. Phys.», 1, 23, 1906.
53. Brenner H.— «Chem. Eng. sci.», 16, 242, 1961.
54. Аппен А. А. и др. Применение электронного зонда для исследования взаимодействия железа с силикатными расплавами, содержащими окись кобальта.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 2. Новочеркасск, 1974, с. 3—8.
55. Лурье А. И. Теория упругости. М., 1970, с. 714.
56. Соколовский В. В. Теория пластичности. М., 1964.
57. Соколов А. А., Шейнкоп И. М., Пчеляков К. А. Моделирование процессов гидродинамики вязких расплавов. М., 1972.
58. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. М., 1957.
59. Кирпичев М. В., Михеев М. А. Моделирование тепловых устройств. М., 1936.
60. Быховский А. И., Проливская А. Ю. О кинетике растекания капли жидкости по твердой поверхности в условиях постоянного градиента температуры.— В сб.: Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М., 1972, с. 301—306.
61. Гухман А. А. Физические основы теплопередачи. М., 1934.
62. Кирпичев М. В., Конаков П. К. Математические основы теории подобия. М., 1949.
63. Азаров К. П., Гречанинов С. Б. Влияние окиси железа на вязкость борных и безборных эмалей.— «Докл. АН СССР», 118, 1958, № 2, с. 348—350.
64. Баринюв Ю. Д., Беляев Г. И., Пономарчук С. М. Влияние некоторых окислов на вспучивание грунтовых покрытий для химической аппаратуры.— В сб.: Эмалирование металлов. Киев, 1962, с. 98—106.
65. Бакалин Ю. И. Некоторые вопросы теории газовыделений

при эмалировании металлов.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов». Челябинск, 1976.

66. Симхович З. И. Модуль упругости эмалевых покрытий для химической аппаратуры.— В сб.: Эмаль и эмалирование металлов. Л., 1963, с. 153—157.

67. Ковальский Б. С. Определение модуля упругости эмалевого покрытия.— В сб.: Аннотации конструкторских работ в области эмалирования металлов. М., 1961.

68. Симхович З. И. и др. Влияние режима обжига на структуру и термическую стойкость эмалевого покрытия.— В сб.: Эмалевые защитные покрытия. Материалы по обмену опытом. Киев, 1966.

69. Schultes B., Trögel G.— «Glass-Email-Keramo-Techn.», № 4, 22, 1971.

70. Корсевин А. А. и др. Использование хроматографа ХЛ-69 для газов в пузырях стекол.— «Стекло и керамика», 1976, № 1, с. 15.

71. Бакалин Ю. И. Некоторые вопросы теории определения активности поверхности под эмалирование.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания «Новые разработки в области силикатного эмалирования и перспективы их внедрения на предприятиях Минлегпишемаша». Кишинев, 1975, с. 39.

72. Бакалин Ю. И. и др. Экспериментальный метод оценки активности поверхности под эмалирование.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания «Новые разработки в области силикатного эмалирования и перспективы их внедрения на предприятиях Минлегпишемаша». Кишинев, 1975, с. 39—40.

73. Савин Л. С. Изучение закономерностей изменения микро-рельефа поверхности эмалированной стали в зависимости от природы травильного раствора.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания «Новые разработки в области силикатного эмалирования и перспективы их внедрения на предприятиях Минлегпишемаша». Кишинев, 1975, с. 40.

74. Bersticker A. C. a.e.— «Bull. Amer. Ceram. Soc.», 45, № 11, 33, 1966.

75. Бакалин Ю. И. Строительные изделия из эмалированной стали.— «Сельское строительство Белоруссии», 1976, № 1.

76. Городчанин С. В. и др. Макроструктура и эксплуатационные свойства эмалевых покрытий.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов». Челябинск, 1976.

77. Пивинский О. Е., Попильский Р. Я. О седиментационной устойчивости керамических шликеров.— «Стекло и керамика», 1969, № 4.

78. Бакалин Ю. И. и др. Камерный способ нанесения эмали на детали небольшого размера.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания «Новые разработки в области силикатного эмалирования и перспективы их внедрения на предприятиях Минлегпишемаша». Кишинев, 1975, с. 39—40.

79. Бакалин Ю. И. и др. О влиянии реологических свойств жидкости на спектр распределения.— «Материалы XI Всесоюзной конференции по актуальным вопросам горения и газовой динамики дисперсных систем». Одесса, 1972.

80. Бакалин Ю. И. Массоперенос при распыле струи жидкости с неньютоновскими свойствами.— «Материалы III Всесоюзного совещания по тепло- и массообмену», т. 3. Минск, 1972.

81. Бакалин Ю. И., Блоцук А. А. Экспериментальное исследование диспергирования потока неньютоновской жидкости.— «Ма-

- териалы X Всесоюзной конференции по актуальным вопросам горения и газовой динамики дисперсных систем». Одесса, 1970.
82. Андреева Н. Г. и др. Исследование влияния продуктов сгорания природного газа на качество эмалевого покрытия.— «Стекло и керамика», 1969, № 3.
83. Бакалин Ю. И., Нестеренко В. Б., Кременный А. И. Стенд для исследования теплообмена диссоциирующего газа на низком давлении.— «Вестн АН БССР», сер. физ.-техн., 1966, № 3.
84. Degimont V.— «Glass, Email, Silikate», 16, № 20, 511, 1965.
85. Рыбьев И. А., Бакалин Ю. И. Декоративное силикатное покрытие для кирпичных ограждающих конструкций.— «Строительство и архитектура БССР», 1973, № 1.
86. Бут А. И. Основы электронной технологии строительных материалов. М., 1968.
87. Варгин В. В. и др. Технология эмали и эмалирования металлов. М., 1965.
88. Ковнер М. И. и др. Электрофоретическое осаждение силикатных эмалей.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 1. Новочеркасск, 1974, с. 89.
89. Мороз И. И. Технология строительной керамики. Киев, 1972.
90. Смольский Б. М., Шульман З. П., Гориславец В. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. Минск, 1970.
91. Куприянов В. П. Технология производства силикатных изделий. М., 1969.
92. Бакалин Ю. И., Павлусенко Н. Н. К исследованию распыла шликера силикатной эмали.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Киев—Одесса, 1976, с. 62.
93. Рыбьев И. А. и др. Исследование движения частиц шликера в завихренном потоке.— «Тез. докл. XII Всесоюзной конференции по вопросам исстарения, горения и газовой динамики дисперсных систем». Одесса, 1976.
94. Нестеренко В. Б. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М., 1971.
95. Renz W., Marschall W.— «Chemical Engineering Progress», March, 1952.
96. Мельник М. Т. и др. Влияние степени измельчения эмали на некоторые свойства покрытий.— «Докл. АН БССР», 15, 1971, № 7, с. 621.
97. Stuchert L.— «Emailwarem. Jud.», 18, 88, 1941.
98. Белогорцев И. Д., Рыбьев И. А., Бакалин Ю. И. Современное применение эмалей для отделки архитектурных и строительных изделий.— «Изв. вузов СССР. Строительство и архитектура», 1976, № 2.
99. Чентимиров М. Г. Основные направления научно-технического прогресса в строительстве.— «Промышленное строительство», 1970, № 4, с. 6.
100. Фанталов А. М. Строительные конструкции в целях меделектролитного производства.— «Промышленное строительство», 1971, № 11, с. 23.
101. Серебрякова И. Б., Тарасова А. А. Преимущества оцинкованных стальных конструкций.— «Промышленное строительство», 1970, № 10, с. 17.
102. Белогорцев И. Д., Бакалин Ю. И., Захаркина Г. И. Применение эмалированной стали в строительстве.— «Строительство и архитектура БССР», 1972, № 2.

103. Бакалин Ю. И. Исследование трехслойных панелей с эмалированными стенками.— В сб.: Повышение эффективности жилищно-гражданского строительства. Минск, 1971, с. 7—10.

104. Лысенко Н. И. Эффективность применения эмалированных труб в судостроении и судоремонте.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов». Челябинск, 1976, с. 117.

105. Алексеенко И. А. Перспективы применения стеклоэмалевых покрытий в судостроении.— В сб.: Стеклоэмаль и эмалирование металлов, вып. 1. Новочеркасск, 1974.

106. Матвиенко В. М. и др. О перспективах применения эмалированных металлов в судостроении.— «Тез. докл. Всесоюзного совещания по эмалям и эмалированию металлов». Челябинск, 1976, с. 110.

107. Можеева А. А. Метод исправления местных повреждений сплошности эмалевого покрова кислотостойкими и термостойкими замазками.— В сб.: Эмалирование металлов. Киев, 1962, с. 164—171.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Обозначения	8
Глава I. Макроструктура как результат фазовых явлений в расплаве	9
Основные причины появления газовой фазы в расплаве эмали	9
Динамические и кинетические условия газонасыщения слоя расплава	12
Механизм газонасыщения вязких сред	18
Особенности образования макроструктуры силикатных расплавов	23
Глава II. Теоретические основы получения оптимальной макроструктуры	29
Термодинамика фазовых переходов	29
Физико-химическая гидродинамика расплава с газовыми включениями	36
Макроструктура и прочность покрытий	48
Макроструктура системы покрытие—бетон	51
Глава III. Моделирование процессов газовыделения в вязких расплавах	54
Основные положения теории подобия	54
Методы исследования макроструктуры силикатных покрытий и техника эксперимента	60
Подбор моделирующих жидкостей	66
Моделирование газовыделений	70
Глава IV. Влияние технологических процессов на образование макроструктуры покрытий	77
Технологические особенности газообразования в слое покрытия	77
Зависимость макроструктуры покрытий от технологических операций до стадии обжига	79
Влияние работы узлов нанесения шликера на качество покрытий	82
Устранение нежелательных газовых включений в покрытии	93
Глава V. Новые области применения эмалированных изделий в народном хозяйстве	97
Эмалирование строительных изделий	97
Эмалирование оборудования в энергетике	108
Эмалирование деталей и узлов в судостроении	113
Заключение	118
Литература	120

Бакалин Ю. И.

Б 19 Макроструктура стеклоэмалевых покрытий. Мн.:
Изд-во БГУ, 1978.— 128 с., ил.

В монографии анализируются процессы и явления, способствующие образованию определенного вида макроструктуры. Даны рекомендации по методам воздействия на макроструктуру покрытия с целью повышения эффективности производства и повышения общего качества продукции. Указаны новые области применения эмалированной стали в народном хозяйстве.

Книга рассчитана на научных работников, инженеров и студентов, специализирующихся в области физикохимии и технологии силикатных и тугоплавких неметаллических материалов и в смежных областях.
— Библ. с. 120—125.

20503-021
Б _____ **резерв-78**
М 317-78

6П7.7

Юрий Иванович Бакалин

**Макроструктура
стеклоэмалевых
покрытий**

Редактор *Л. Ф. Верниковская*
Младший редактор *С. О. Татрышвили*
Обложка *И. Л. Ейдельмана*
Художественный редактор *И. Х. Беленькая*
Технический редактор *В. П. Безбородова*
Корректор *Н. Н. Курчатова*

ИБ № 257

Сдано в набор 19.12.77. Подписано в печать 28.03.78. АТ 09085.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Гарнитура литера-
турная. Печать высокая. Усл. печ. л. 6,72. Уч.-изд. л. 6,88. Тираж
1000 экз. Заказ 2311. Цена 1 руб. 10 коп. Издательство Белорус-
ского государственного университета им. В. И. Ленина. Минск,
Парковая магистраль, 11. Дом книги. Типография им. Франциска
(Геоργия) Скорины издательства «Наука и техника» АН БССР и
Госкомитета СМ БССР по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли, Минск, Ленинский проспект, 68.