

666
К78

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

На правах рукописи

КРАСЬКО КОНСТАНТИН ФЕДОРОВИЧ

УДК 666.189.3:620.179.17

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ
ПЕНОСТЕКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ
КОНТРОЛЯ

Специальность 05.17.11 - Технология силикатных
и тугоплавких неметаллических материалов

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Минск 1987

Работа выполнена в Минском научно-исследовательском институте строительных материалов НИИСМ

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ДЕМЦОВИЧ Б.К.

Научный консультант - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
САДЧЕНКО Н.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
АНДРИХИНА Т.Д.
кандидат технических наук,
доцент СИЛИЧ Л.М.

Ведущая организация - Гомельский ордена Ленина
стекольный завод им. М.В.
Ломоносова

Защита состоится 17 декабря 1987 г. в 14 часов на заседании специализированного Совета К.056.01.04. по присуждению ученой степени кандидата технических наук Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института имени С.М.Кирова по адресу: 220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БТИ им. С.М.Кирова.

Автореферат разослан "13" ноября 1987 г.

Ученый секретарь Специализированного
Совета, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

С.А.Гайлевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В двенадцатой пятилетке приоритет технического перевооружения и реконструкции действующих предприятий над строительством новых требует разработки и внедрения на существующих производствах рациональных технологических процессов, методов оперативного контроля, способствующих повышению качества продукции и увеличению объемов выпуска. Особое значение приобретает расширение производства одного из наиболее прогрессивных теплоизоляционных материалов – пеностекла, которое по своим качественным показателям приближается к лучшим мировым образцам, но при этом технико-экономические показатели его производства остаются низкими. Это обусловлено неполным отжигом блоков пеностекла, а также отсутствием оперативных методов контроля его качественных показателей. Существующие методы контроля пеностекла, как и методы исследования процессов его структурообразования, малоинформативны и не позволяют установить прямой связи "режим-свойство". В производстве пеностекла до сих пор отсутствует надежный контроль структуры и прочностных свойств, а также качества отжига, что не позволяет разработать и внедрить в производство рациональные режимы термообработки пеностекла.

Объектом исследований являлись режимы термообработки пенообразующей смеси и пеностекла, методы контроля отжига, структурных, прочностных свойств и напряженного состояния пеностекла.

Цель работы. Разработка рациональных режимов получения пеностекла на основе неразрушающих методов контроля структуры и свойств.

В задачу исследования входило: разработка оперативных неразрушающих методов контроля структурных и прочностных свойств, напряженно-деформированного состояния пеностекла, исследование с привлечением разработанных методов контроля механизма формирования структуры и напряженного состояния, разработка эффективных и экономичных режимов термообработки.

Научная новизна. Показана возможность применения неразрушающих методов – импульсного ультразвукового (УЗК) и акустической эмиссии (АЭ) – для контроля прочностных и

структурных свойств пеностекла.

Установлено, что уровень напряженно-деформированного состояния пеностекла в процессе отжига определяют амплитуда (A) и интенсивность (N) сигналов акустической эмиссии, характеризующие релаксацию напряжений (A/N) и энергию деструктивных процессов (A^2N). Уровень напряженного состояния блоков пеностекла после отжига характеризуют промежутки времени, в течение которых интенсивность сигналов АЭ превышает фоновый уровень, при этом степень разрушения структуры оценивается величиной интеграла приращения сигналов АЭ по времени соответствующего приращения интенсивности.

Установлено проявление анизотропии физико-механических свойств пеностекла в двух взаимноперпендикулярных направлениях и показана ее взаимосвязь с температурно-временными факторами, определяющими кинетику газообразования и возрастания вязкости пеномассы.

Изучено влияние верхней температуры и основных параметров температурного режима отжига на формирование напряженного состояния пеностекла с использованием метода акустической эмиссии. Установлено, что основное действие механизма релаксации в пеностекле проявляется на $35-55^{\circ}\text{C}$ ниже температуры стеклования. Показано, что интенсивное охлаждение предварительно стабилизированного при 600°C пеностекла и последующая выдержка при температурах ниже нижней границы отжига позволяет получить высокопрочную структуру пеностекла.

Практическая ценность работы. Определена область температурно-временных параметров, обеспечивающих получение строительного пеностекла с пониженным проявлением анизотропии свойств и повышенными физико-механическими показателями. Разработаны два режима отжига пеностекла, предусматривающие предварительное интенсивное охлаждение поверхностных слоев пеностекла до или ниже нижней границы отжига и регулируемое охлаждение в зоне собственно отжига со скоростью $0,2 - 0,3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Разработаны методы неразрушающего контроля предела прочности при сжатии пеностекла с помощью ультразвука и отжига - методом акустической эмиссии. Способы получения пеноматериалов, пеностекла, способы отжига и контроля качественных показателей защищены 12 изобретениями, из них 5 внедрены

в производство (Гомельский стеклозавод им. М. В. Ломоносова - 3, Домановский комбинат строительных материалов - 2).

Внедрение на технологических линиях цеха пеностекла Гомельского стеклозавода новых температурно-временных режимов вспенивания и отжига строительного пеностекла позволило в течение 1984-1986 г. г. повысить качество, снизить себестоимость блоков и получить годовой экономический эффект за счет снижения расходов топлива и сырья 287,8 тыс. руб. Экономический эффект от внедрения изобретений на Гомельском стеклозаводе в 1985 г. составил 39,9 тыс. руб., в 1986 г. - 93,3 тыс. руб.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на VI комсомольско-молодежной научно-технической конференции "Повышение качества проектов за счет прогрессивных технических решений и использования передовых методов проектирования" (Минск, 1978), на конференции "Проблемы химической технологии, структурообразования и свойств современных строительных материалов" (Киев, 1981), на X, XI, XII конференциях по проблемам строительных материалов и конструкций (Таллин, 1979; Вильнюс, 1981; Рига, 1984).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах и 12 изобретениях, выданных Госкомитетом по делам изобретений и открытий.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, анализа литературы, методики исследования, экспериментальной части, основных выводов и приложений.

Диссертация содержит 148 страниц текста, 32 рисунка, 23 таблицы. Список использованной литературы содержит 149 источников.

На защиту выносятся:

метод перазрушающего контроля прочностных и структурных свойств пеностекла;

способы определения верхней и нижней границ отжига, напряженно-деформированного состояния в процессе отжига, уровня напряженного состояния отожженных блоков пеностекла с применением метода акустической эмиссии;

температурно-временные режимы вспенивания пенообразующей смеси, обеспечивающие получение строительного пеносте-

кла с пониженным проявлением анизотропии свойств и повышенными физико-механическими показателями;

способы отжига пеностекла, предусматривающие предотжиговое интенсивное охлаждение, в процессе которого создается вязкостной и температурный градиент по блоку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и в первой главе рассмотрено состояние вопроса в области производства пеностекла.

Рассмотрены методы определения напряжений в непрозрачных материалах. Для изучения напряженно-деформированного состояния, качества отжига пеностекла приняты методы, базирующиеся на акустической эмиссии. Проведен анализ известных режимов термообработки пенообразующих смесей и выявлено влияние параметров термообработки (вспенивания и отжига) на качественные показатели пеностекла.

На основании анализа литературных данных обоснованы цель и задачи исследования.

Во второй главе разработана блок-схема исследования, описаны методы исследования, использованные при проведении экспериментальных работ. Исследование стекла, пенообразующих смесей, пеностекла были проведены с использованием химического, рентгенографического, электронномикроскопического, оптического, термогравиметрического, дилатометрического, стандартных методов испытания физико-механических и эксплуатационных свойств, методов математического анализа. Динамический модуль упругости рассчитывали на основе определяемой на измерителе частоты механических колебаний типа ИЧМК-3 собственной частоты изгибных колебаний образцов пеностекла, а также по экспериментальным данным скорости распространения продольных ультразвуковых волн в стержне. Для измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности пеностекла при положительной температуре использовали методы стационарного, а также регулярного теплового режима.

Разработан метод контроля деструктивных процессов, про-

исходящих в интервале температур отжига. В качестве основного источника информации о процессах деструкции пеностекла принята акустическая эмиссия – процесс излучения материалом механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала. Оценка кинетики разрушения и деструктивных процессов проводилась по количеству возникаемых и развивающихся дефектов, характеризуемых интенсивностью N импульсов АЭ в деформируемом объеме за промежуток времени и по усредненной величине дефектов, характеризуемой амплитудой A импульсов. Информация при проведении исследований фиксировалась в виде диаграмм: температура–время, интенсивность АЭ – время и амплитуда импульсов АЭ – время. Анализ проводился сопоставлением экспериментальных данных (τ, N) и расчетных ($A/N, A^2N$) для характерных точек и участков диаграмм. Выбраны оптимальные условия (уровень дискриминации, частотный диапазон, тип преобразователя), обеспечивающие надежную работу аппаратуры для регистрации и обработки сигналов. С целью повышения чувствительности преобразования механических колебаний в электрические и эксплуатации преобразователя при высоких температурах разработано новое устройство (а.с. №1185229).

Для контроля уровня напряжений отожженных блоков разработаны способ и устройство для его осуществления (решение о выдаче а.с. по заявке №4132949/28 от 30.06.87), основанные на выделении промежутков времени, в течение которых интенсивность сигналов АЭ превышает фоновый уровень, и площадь образовавшейся макротрещины оценивается по величине интеграла приращения сигналов АЭ по времени соответствующего приращения интенсивности.

В третьей главе исследовано структурное состояние и свойства пеностекла без его разрушения методом, основанным на распространении в образцах механических колебаний ультразвукового диапазона частот. Установлено, что скорость ультразвука может служить критерием оценки прочности пеностекла, при этом полученные нами коэффициенты корреляции зависимости типа $v = a + b \cdot \sigma$ для четырех групп пеностекла с плотностью 140–149 кг/м³ (1), 150–159 кг/м³ (2), 160–169 кг/м³ (3), 170–179 кг/м³ (4) составили 0,77 (1); 0,86 (2); 0,60 (3,4).

$$R_{сжк} = 0,003798 C - 1,51 \quad (I)$$

$$R_{сжк} = 0,009975 C - 12,60 \quad (2)$$

$$R_{сжк} = 0,006490 C - 4,93 \quad (3)$$

$$R_{сжк} = 0,006580 C - 4,17 \quad (4)$$

где $R_{сжк}$ - предел прочности при сжатии, МПа;
 C - скорость УЗК, м/с.

Показано, что скорость УЗК увеличивается с возрастанием плотности пеностекла, причем прослеживается зависимость роста скорости УЗК у пеностекла равнозначной плотности с уменьшением диаметра пор. Однако эта зависимость не такая четкая, как в случае изменения скорости ультразвука от формы пор.

Проведенными исследованиями установлена неоднородность свойств пеностекла - динамического модуля упругости, пределов прочности при сжатии и изгибе, скорости УЗК - при их измерении в двух взаимноперпендикулярных направлениях.

Зависимости прочности сжатия и модуля упругости от плотности (γ , кг/м³) пеностекла, измеренные в направлении вспенивания (R_z, E_z , МПа) и перпендикулярном ему (R_x, E_x , МПа) представлены с некоторым приближением в виде линейных функций (5-10)

для строительного пеностекла:

$$R_z = 0,040 \gamma - 1,14 \quad (5)$$

$$R_x = 0,026 \gamma - 3,04 \quad (6)$$

$$E_z = 8,56 \gamma - 249 \quad (7)$$

$$E_x = 9,43 \gamma - 317 \quad (8)$$

для технического пеностекла:

$$R_z = 0,0124 \gamma - 1,14 \quad (9)$$

$$R_x = 0,0193 \gamma - 1,74 \quad (10)$$

Для характеристики неоднородности показателей свойств использованы коэффициенты анизотропии предела прочности при сжатии и изгибе ($K_R = R_x/R_z$), модуля упругости ($K_E = E_x/E_z$) и скорости ультразвука ($K_C = C_x/C_z$) строительного и технического пеностекла. Установлено, что влияние анизотропии на прочность при сжатии ($K_R = 1,57-1,93$) и скорость УЗК ($K_C =$

=1,41-1,50) выше, чем на прочность при изгибе ($K_R=1,02 - 1,12$) и динамический модуль упругости ($K_E=1,04-1,07$). Коэффициенты анизотропии увеличиваются с ростом плотности, эта тенденция наиболее ярко выражена для прочности сжатия и объясняется, по-видимому, тем, что при низких значениях плотности гетерогенность структурного строения материала маскирует анизотропию, а с увеличением плотности однородность ячеистой структуры возрастает и анизотропия проявляется в полной мере.

Проявление анизотропии свойств в пеностекле обусловлено формированием структуры с эллипсоидными ячейками, вытянутыми в направлении, перпендикулярном вспениванию, и при этом наибольшее влияние оказывают температурно-временные факторы, определяющие кинетику газообразования и нарастания вязкости пеномассы. Получение пеностекла по ранее известным режимам не позволило снизить уровень анизотропии, поскольку предложенные скорости охлаждения создают высокие вязкостные градиенты в блоке ($\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,9$) и вызывают усадку пеномассы, полученной из углеродистой пенообразующей смеси с дисперсностью 500-520 м²/кг.

Проведение этапа спекания пенообразующей смеси с более высокими скоростями ($\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,16$ в интервале вязкости $\lg \eta = 11,36-5,83$), чем в известных режимах, а этапа предварительного вспенивания с низкой скоростью ($\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,041$ в интервале вязкости $\lg \eta = 5,83-5,30$) позволило сократить потери газообразователя на этапе спекания пенообразующей смеси, снизить температурные и вязкостные градиенты на этапе предварительного вспенивания, а также на этапе собственно вспенивания (продолжительность 14 мин при вязкости $\lg \eta = 5,30 - 5,45$) и обеспечить формирование однородной ячеистой структуры заданной плотности (150-170 кг/м³). Процесс пенообразования проходит неодинаково во времени по массе изделия, начинаясь в более разогретых поверхностных частях и постепенно переходя вглубь изделия. В этой связи проведение охлаждения изделия в два этапа, в т.ч. на первом этапе с низкой скоростью ($\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,061$ в интервале вязкости $\lg \eta = 5,36 - 6,72$) позволяет, при уже прекратившемся пенообразовании поверхностных слоев продолжать вспенивание внутренней части блока, при этом ячейки средней части блока достигают раз-

меров ячеек поверхностных слоев и ячеистая структура формируется равномерной по всей массе изделия. Это исключает необходимость поддержания высоких температур газовой среды на участке вспенивания, поскольку процесс пенообразования продолжается на участке охлаждения за счет внутреннего тепла в изделии, полученного им в процессе спекания и начала вспенивания. Установленная на первом этапе скорость обеспечивает схлаждение блока по всей массе до вязкости $\lg \eta = 5,38-6,72$ и на втором этапе позволяет проводить резкое охлаждение с целью фиксации структуры с высокой скоростью ($\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,56$ в интервале вязкости $\lg \eta = 6,72-15,57$) без усадки и появления трещин, поскольку температурный градиент и напряжения при этом невелики по всей массе блока. Образовавшаяся структура с равновеликими ячейками шарообразной формы стабилизируется при вязкости стекла $\lg \eta = 7,66-6,62$ в течение 27 мин.

Апробация разработанных режимов в заводских условиях подтвердила возможность снижения структурной анизотропии с одновременным повышением прочности и замкнутости структуры пеностекла.

Установлено, что прочностные и упругие свойства пеностекла возрастают с увеличением плотности и при этом их показатели, измеренные в двух взаимноперпендикулярных направлениях, различаются не так значительно, как у пеностекла, полученного по известным режимам. Причем коэффициент анизотропии предела прочности при сжатии строительного пеностекла с 1,93 снижается до 1,35. Также весомо снижается и коэффициент анизотропии скорости УЗК до 1,26. В меньшей мере наблюдается влияние температурно-временных параметров разработанного режима на коэффициенты анизотропии предела прочности при изгибе и модуль упругости, их величины остаются на прежнем уровне.

В четвертой главе исследована взаимосвязь теплофизических и структурных свойств пеностекла. Установлено, что температуропроводность карбонатного пеностекла ($0,26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C) значительно ниже, чем углеродистого строительного ($0,43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C). Выявлена основная причина подобного различия: значительная поризация разделительных стенок ячеек пеностекла карбонатного типа. Причем подобное пено-

стекло может отжигаться с более высокими скоростями, чем строительное, при этом функциональная зависимость прочности от плотности и структурной однородности блоков не изменится. Это обусловлено необходимостью создания более высокого градиента температур для разрушения высокопористой незамкнутой структуры (карбонатное пеностекло), чем замкнутой (строительное углеродистое).

Установлено, что структурные процессы, протекающие при отжиге, его граничные температуры и уровень напряженного состояния пеностекла с достаточной информативностью описываются параметрами $A\Delta$ — отношением амплитуды импульсов к их интенсивности A/N , характеризующим релаксацию напряжений, и произведением квадрата амплитуды на интенсивность A^2N , являющимся энергетической оценкой этих процессов.

Разработана блок-схема установки и метод определения верхней и нижней границ отжига. Установленные в режимах равномерного охлаждения границы отжига ($T_{в.о.} - \lg \eta = 12,51$; $T_{н.о.} - \lg \eta = 14,96$) свидетельствуют о том, что интервал отжига пеностекла с замкнутой ячеистой структурой располагается в области более низких температур и увеличивается по отношению к стеклу аналогичного состава.

В процессе исследования установлено, что режимы отжига с предварительным резким охлаждением и последующим отжигом от $520-460^\circ\text{C}$, а также ступенчатые режимы с изменяющимися скоростями и изотермическими выдержками обеспечивают стабильность ячеистой структуры, сформировавшейся при вспенивании. Причем прочность и замкнутость структуры пеностекла, а, следовательно, качество его отжига определяются продолжительностью и температурой изотермических выдержек, расположенных в зоне собственно отжига, начальной температурой охлаждения и скоростями охлаждения до и после изотермических выдержек. Установлено, что увеличение на первом этапе скорости (до $5^\circ\text{C}/\text{мин}$) и начальной температуры охлаждения (до $\lg \eta = 9,65$) обеспечивает целостность структуры ($R_{сж} = 0,94-1,22$ МПа), при этом изотермическая выдержка продолжительностью 30-60 мин или начало охлаждения с минимальными скоростями (0,11-0,33 $^\circ\text{C}/\text{мин}$) должны проводиться в интервале, соответствующем вязкости $\lg \eta = 12,82-14,49$.

Показано, что интенсивное охлаждение на воздухе в те-

чение 30 с предварительно стабилизированных при 600°C образцов и последующая выдержка при температуре, значительно ниже граничной (ниже 442°C) позволяют получить высокопрочную структуру пеностекла ($R_{изг} = 0,96 - 1,12$ МПа).

Изучено формирование напряженного состояния методом АЭ в режимах отжига, которым предшествует интенсивное охлаждение непосредственно вспененных блоков и затем охлаждаемых от температур, близких нижней границе отжига, а также режимы, в процессе которых блок доводится до температуры выше T_g , а затем резко охлаждается до температуры, близкой нижней $T_{но}$, и отжигается с минимальной скоростью.

Снижение уровня напряженного состояния и, соответственно, увеличение выхода пеностекла, улучшение его качества, установленные в режимах отжига с регулируемым охлаждением от температуры на 35-55°C ниже температуры стеклования T_g , свидетельствуют о проявлении основного механизма релаксации в пеностекле, что согласуется с предыдущими исследованиями о технико-экономических преимуществах отжига от температуры на 20-50°C ниже T_g .

Результаты исследований показывают, что сохранение целостности структуры и упрочнение блоков пеностекла возможно и должно основываться на использовании предотжиговой термообработки в интервале стеклования. Интенсивная термообработка в начальные моменты времени позволяет довести температуру поверхностных слоев пеностекла до или ниже нижней границы отжига, в то время как температура центральной части блока из-за низких теплопроводности и теплопрозрачности остается выше верхней границы отжига (690-582°C), что было установлено в процессе теллотехнических испытаний печей отжига. При переходе на низкую скорость охлаждения 0,11-0,33°C/мин происходит релаксация напряжений растяжения во внутренних слоях блока пеностекла и частичное сохранение напряжений сжатия в его поверхностных слоях. В зависимости от величины напряжений сжатия и растяжения, обусловленных температурой и температурными градиентами, в пеностекле действуют напряжения с эпюрой большего или меньшего порядка.

На основе выполненного эксперимента определены следующие технологические требования к процессу отжига:

температура в зоне стабилизации должна быть согласова-

на с продолжительностью пребывания блока вне печи и обеспечить вязкость внутренних слоев перед его установкой в печь отжига $\lg \eta = 9,65 - II, 0$;

продолжительности интенсивного охлаждения блоков пеностекла непосредственно перед этапом собственно отжига должна обеспечивать охлаждение поверхностных слоев до или ниже нижней границы отжига, в то время как температура внутренних слоев остается выше верхней границы отжига;

охлаждение при отжиге должно проводиться от температуры, соответствующей вязкости $\lg \eta = 12,82 - I4, 49$, с минимально возможной скоростью охлаждения (0, II-0, 33°C/мин) в зоне собственно отжига.

В процессе исследования отоженных блоков пеностекла с применением разработанных устройства и методики установлено, что параметр, обозначенный нами как приведенная поверхность разрушения $\frac{S_c \cdot 1000}{t_{изм} \cdot \gamma}$ (где S_c - интеграл приращенных сигналов АЭ, усл. ед.; $t_{изм}$ - продолжительность измерения, мин; $1000/\gamma$ - приведенный коэффициент плотности) при испытании блоков под статической нагрузкой характеризует степень отжига пеностекла. Она определяется уровнем остаточных напряжений и трещинами-дефектами, заложенными непосредственно в процессе отжига временными температурными напряжениями.

В пятой главе изложены результаты практической реализации исследований. Апробированы и внедрены разработанные на уровне изобретений (а.с.№№ I206243, I246980, I276642) в цехе пеностекла Гомельского стеклозавода режим вспенивания пенообразующей смеси, включающий двухступенчатое охлаждение, и два режима отжига, предусматривающие интенсивное охлаждение поверхностных слоев пеностекла до температуры, близкой нижней границе отжига. Внедренный комплекс мероприятий позволил снизить себестоимость блоков пеностекла с 66,8 руб. (1983 г.) до 51-50 руб. (1985-1986 г.г.). Затраты сырья и материалов в себестоимости 1 м³ блоков снизились в 1986 г. по сравнению с базовым периодом (1983 г.) на 3,1 руб., топлива на технологические нужды за этот же период - на 2,5 руб, что позволило получить годовую экономию только за счет этих статей - 287,8 тыс.руб. Экономический эффект, полученный от внедрения изобретений автора, составил

39,9 тыс.руб. в 1965 г. и 93,3 тыс.руб. в 1986 г.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследованы физико-механические свойства пеностекла и показана возможность применения неразрушающих методов - импульсного ультразвукового и акустической эмиссии - для контроля его прочностных и структурных свойств.

2. Установлена неоднородность свойств пеностекла - динамического модуля упругости; пределов прочности при сжатии и изгибе, скорости УЗК - при их измерении в двух взаимноперпендикулярных направлениях, при этом влияние проявления анизотропии на прочность при сжатии ($K_R = 1,57-1,93$) и скорость УЗК ($K_C = 1,41-1,50$) выше, чем на прочность при изгибе ($= 1,02-1,12$) и динамический модуль упругости ($= 1,04-1,07$). Проявление анизотропии свойств обусловлено формированием структуры с эллипсоидными, вытянутыми перпендикулярно вспениванию ячейками. Наибольшее влияние на величины анизотропии оказывают температурно-временные факторы, определяющие кинетику газообразования и вязкость пеномассы.

3. Изучено влияние температурно-временных параметров термообработки углеродистых пенообразующих смесей на формирование структуры пеномассы. Показано, что проведение этапа спекания пенообразующей смеси в интервале вязкости $\lg \eta = 11,36-5,83$ со скоростью $\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,16$, предварительного вспенивания в интервале вязкости $\lg \eta = 5,83-5,30$ со скоростью $\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,041$ позволило сократить потери газообразователя на этапе спекания пенообразующей смеси, снизить температурные и вязкостные градиенты на этапах предварительного и собственно вспенивания и обеспечить формирование ячеистой структуры заданной плотности ($150-170 \text{ кг/м}^3$) в интервале $\lg \eta = 5,30-5,45$. Установлены параметры двухстадийного резкого охлаждения, обеспечивающие стабилизацию структуры пеномассы с минимальными температурными и вязкостными градиентами: на первом этапе в интервале вязкости $\lg \eta = 5,38-6,72$ со скоростью $\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,061$ и далее до вязкости $\lg \eta = 15,57$ со скоростью $\Delta \lg \eta / \Delta t = 0,56$.

4. Исследованы структурные процессы, протекающие при отжиге пеностекла, и установлено, что граничные температуры отжига и уровень напряженного состояния пеностекла с доста-

точной информативностью описываются параметрами акустической эмиссии — отношением амплитуды импульсов к их интенсивности A/N , характеризующим релаксацию напряжений, и произведением квадрата амплитуды на интенсивность A^2N , являющимся энергетической оценкой этих процессов.

Разработаны блок-схемы и методы определения верхней и нижней границ отжига, фиксации деструктивных процессов при термообработке от температуры 600°C и ниже.

Для определения уровня напряженного состояния отожженных блоков пеностекла разработаны методика и устройство, основанные на выделении промежутков времени, в течение которых интенсивность сигналов АЭ превышает фоновый уровень, а площадь образовавшейся макротрещины оценивается по величине интеграла приращения сигналов АЭ по времени соответствующего приращения интенсивности.

5. Определены верхняя ($\lg \tau = 12,51$) и нижняя ($\lg \tau = 14,96$) границы отжига пеностекла в режимах равномерного охлаждения и показано, что интервал отжига пеностекла с замкнутой ячеистой структурой располагается в области более низких температур и расширяется по отношению к стеклу аналогичного состава.

6. Установлено, что в процессе интенсивного охлаждения блока пеностекла в его поверхностных слоях фиксируется высокотемпературная структура. Структурно-физическое состояние поверхностных и внутренних слоев блока вместе с градиентом действительных температур, достигающих 190°C при установке блока в печь отжига, определяют предотжиговой уровень напряженного состояния пеностекла.

Показано, что интенсивное охлаждение предварительно стабилизированного при 600°C пеностекла и последующая выдержка при температурах ниже нижней границы отжига позволяют получить высокопрочную структуру пеностекла.

7. Определены основные технологические требования к процессу отжига:

температура в зоне стабилизации должна быть согласована с продолжительностью пребывания блока вне печи и обеспечить вязкость внутренних слоев перед его установкой в печь отжига $\lg \tau = 9,5 - 11,0$;

продолжительность интенсивного охлаждения блоков пено-

стекла непосредственно перед этапом собственно отжига должна обеспечивать охлаждение поверхностных слоев до или ниже нижней границы отжига, в то время как температура внутренних слоев остается выше верхней границы отжига;

охлаждение при отжиге должно проводиться от температуры, соответствующей вязкости $\eta = 12,8-14,5$, со скоростью охлаждения $0,11-0,33^\circ\text{C}/\text{мин}$ в зоне собственно отжига.

8. Снижение уровня напряженного состояния пеностекла, увеличение его выхода и увеличение качества установлено в режимах, предусматривающих предотжигающее интенсивное охлаждение, в процессе которого поверхностные слои блока охлаждаются с понижением вязкости от $\eta = 6,5-11,0$ до $\eta = 13,4-14,9$, а внутренние - до вязкости не более $\eta = 12,3$. Блоки пеностекла с полученным вязкостным градиентом затем отжигаются в регулируемом режиме, при этом скорость охлаждения в зоне собственно отжига составляет $0,11-0,33^\circ\text{C}/\text{мин}$.

9. Внедрение разработанных режимов вспенивания и отжига пеностекла на Гомельском стекольном заводе им. М. В. Ломоносова позволило получить в 1985-1986 г.г. годовой экономический эффект от снижения расходов сырья и топлива 287,8 тыс. руб. Экономия от внедрения изобретений (а.с. №1206243, 1248980, 1276642) в 1985-1986 г.г. составила 133,2 тыс. руб.

По теме диссертации опубликовано 26 научных трудов, основные из которых следующие:

1. Пилецкий В.И., Гарнашевич Г.С., Волохов Г.М., Гигевич А.С., Красько К.Ф., Давыдулина Л.П. Некоторые особенности температуропроводности пеностекла // Стекло, ситаллы и силикаты. - Минск: Высшая школа, 1981. - Вып. 10. - С. 56-58.

2. Красько К.Ф., Пилецкий В.И., Садченко Н.П. К вопросу об упруго-механических свойствах пеностекла // Стекло, ситаллы и силикаты. - Минск: Высшая школа, 1982. - Вып. 11. - С. 70-73.

3. Демидович Б.К., Садченко Н.П., Любарский В.И., Красько К.Ф., Ванштейн Д.Я. Исследование температурного режима отжига пеностекла // Стекло, ситаллы и силикаты. - Минск: Высшая школа, 1982. - Вып. 11. - С. 73-77.

4. А.с. №9114512 МКИ С03В 19/08; С03С 11/00 Способ изготовления пеноматериалов / Демидович Б.К., Пилецкий В.И.,

Новиков Е.С., Хайновская Т.С., Красько К.Ф.; Заявка №2922369/29-33; Оpubл. в Б.И. 1982, №11.-3 с.

5. Красько К.Ф., Садченко Н.П., Пилецкий В.И. Анизотропия свойств пеностекла//Стекло, ситаллы и силикаты.-Минск: Высшая школа, 1983.-Илл. 12.-С.54-57.

6. Новиков Е.С., Красько К.Ф., Тригубович А.И. Получение декоративно-облицовочного пеностекла непрерывным способом//Строительные материалы.-1983.-№10.-С.16-17.

7. Шипук П.В., Демидович Б.К., Садченко Н.П., Красько К.Ф., Киселева Л.А., Бавтрук Л.В. Повышение качества пеностекла на Гомельском ордена Ленина стекольном заводе им. М.В.Ломоносова//Экспресс-информация ВНИИЭСМ.-Сер.9.-Вып.10.-М.-1985.-С.4-7.

8. Красько К.Ф., Демидович Б.К., Садченко Н.П. Неразрушающие методы контроля в производстве пеностекла//Экспресс-информация ВНИИЭСМ.-Сер.9.-Вып.12.-1985.-С.8-10.

9. А.с. №1185229 МКИ G 01 N 29/04 Преобразователь для приема сигналов акустической эмиссии/Садченко Н.П., Красько К.Ф., Бородин А.К., Кулеш А.П., Гайкович Э.Ч.; Заявка №3635221/25-28; Оpubл. в Б.И. 1985, №38.- 2 с.

10. А.с. №1206243 МКИ С02С 11/00 Способ получения пеностекла/ Демидович Б.К., Садченко Н.П., Пилецкий В.И., Шипук П.В., Красько К.Ф.; Заявка №3790198/29-33; Оpubл. в Б.И. 1986, №3.- 3 с.

11. А.с. №1248980 МКИ С02С 11/00 Способ получения пеностекла/ Демидович Б.К., Садченко Н.П., Пилецкий В.И., Шипук П.В., Красько К.Ф.; Заявка №3824008/29-33; Оpubл. в Б.И. 1986, №29.- 3 с.

12. А.с. №1276642 МКИ С02С 11/00 Способ отжига пеностекла/Демидович Б.К., Шипук П.В., Поляков В.В., Пилецкий В.И., Садченко Н.П., Красько К.Ф.; Заявка №3918053/29-33; Оpubл. в Б.И. 1986, №46.- 2 с.

13. А.с. №1275014 МКИ С02С 11/00 Способ изготовления блоков пеностекла/Демидович Б.К., Шипук П.В., Поляков В.В., Пилецкий В.И., Садченко Н.П., Красько К.Ф.; Заявка 3918472/29-33; Оpubл. в Б.И. 1986, №45.- 3 с.

14. А.с. №1278319 МКИ С02С 11/00 Способ получения пеностекла/Демидович Б.К., Шипук П.В., Садченко Н.П., Красько К.Ф., Стаховская Н.Э., Тригубович А.И.; Заявка №3871299/

29-33; Оpubл. в Б.И. 1986, №47.- 2 с.

15. А.с. №1291564 МКИ СОЗС II/00 Способ изготовления пеноматериалов/Демидович Б.К., Хайновская Т.С., Парахов - ник М.А., Красько К.Ф.; Заявка №3941828/29-33; Оpubл. в Б.И. 1987, №7.- 3 с.

16. А.с. №1291565 МКИ СОЗС II/00 Способ изготовления пеноматериалов /Демидович Б.К., Хайновская Т.С., Парахов - ник М.А., Красько К.Ф.; Заявка №3942739/29-33; Оpubл. в Б.И. 1987, №7.- 3 с.

17. А.с. №1337357 МКИ СОЗС II/00 Способ отжига пено - стекла/ Демидович Б.К., Садченко Н.П., Титова С.С., Крась - ко К.Ф.; Заявка №4053203/29-33; Оpubл. в Б.И. 1987, № 34.- 3 с.

18. Красько К.Ф., Демидович Б.К., Садченко Н.П., Ку - леш А.П. Исследование неразрушающими методами контроля тех - нологических параметров производства пеностекла // Химия и химическая технология.- Минск: Университетское, 1987.-Вып. I. - С.149-152.

48

Красько Константин Федорович

**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ПЕНОСТЕКЛА
С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

Подписано в печать 04.II.87. АТ 18360 . Формат 60x84 I/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. I, O. Усл. кр. отт. I, O Уч.-изд. л. O, 9.

Тираж 100 экз. Заказ 815. Бесплатно.

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
технологический институт имени С.М.Кирова
220630, Минск, Свердлова, 13а.

Отпечатано на ротaпpинте Белорусского ордена Трудового
Красного Знамени технологического института им.С.М.Кирова
220630, Минск, Свердлова, 13.