

Д. т. н. **В. Н. Соков**¹ (✉), д. т. н. **А. А. Кулибаев**²

¹ ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

² Инженерная академия Республики Казахстан, Алматы, Республика Казахстан

УДК 666.3-127:621.3.014

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЕНОТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОГИДРОТЕПЛОСИЛОВОГО ПОЛЯ. Часть 2. Закономерности оптимизации структуры пенолегковесного материала под воздействием ЭГТСП*

Формирование структуры пенолегковесного материала определяется протеканием сложных процессов трехфазной гетерогенной системы. Изучен управляющий фактор — электропрогрев, обеспечивающий принудительное снижение влагосодержания пеномассы с ускорением процессов структуризации. Предложена модель газовой поры с векторами сил. Проанализированы внутренние и внешние факторы, влияющие на воздушную пору в ходе электропрогрева. Рассмотрены термодинамические изменения в пеносистеме и явления тепло- и массопереноса в ней. Состояние пеносистемы определяется переменными: температурой, избыточным давлением и электрическим напряжением. За счет комплексного воздействия на пеномассу ЭГТСП исключаются каверны, расслоения и достигается однородность макроструктуры. Обоснован выбор пенообразователя по pH и электропроводности раствора ПАВ.

Ключевые слова: электропрогрев, электрогидротеплосиловое поле (ЭГТСП), модель газовой поры, векторы сил, межпоровые перегородки, коалесценция, поверхностно-активные вещества, стерический эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование структуры пенолегковесного материала определяется протеканием сложных физико-химических процессов создания трехфазной гетерогенной системы взаимодействующих континуумов (газового, жидкого и твердого). При этом важными факторами основных показателей структуры являются: согласованность устойчивости пенной структуры и изменение реологических и структурных характеристик формовочной массы.

В части 2 статьи изучается эффективный управляющий фактор — электропрогрев в замкнутой перфорированной форме, обеспечивающий принудительное снижение влагосодержания формируемой массы с ускорением процессов структуризации, снижая тем самым влияние фактора стойкости пены. Проанализированы

внутренние и внешние факторы, влияющие на воздушную пору в ходе электропрогрева. Соотношение растягивающих и сжимающих воздействий на межпоровую перегородку, а также факторов, влияющих на них при электрообработке, изменяется во времени. При электрообработке пеномассы в ней протекают термодинамические изменения и явления тепло- и массопереноса, влияющие на ее температуру и объем газовой составляющей. По окончании обработки изменение газовой компоненты и увеличение ее объема будет фиксировано сформированными межпоровыми перегородками. Иными словами, степень поризации пеномассы до набора структурной прочности мембраны — функция температуры смеси и давления внутри газовых пузырьков.

Все описанные ниже явления применимы для раннего этапа формирования структуры, когда межпоровые перегородки еще не набрали структурной прочности.

Для анализа влияния электрообработки на пеносистему предложена модель газовой поры с векторами сил (рис. 1). Природа факторов роста поры как функции давления рассмотрена в части 1 статьи, но необходимо рассмотреть и причины, сдерживающие рост поры.

Исходя из термодинамических постулатов, пеномасса является неустойчивой и относитель-

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 5 за 2020 г.



В. Н. Соков
E-mail: sersok_07@mail.ru

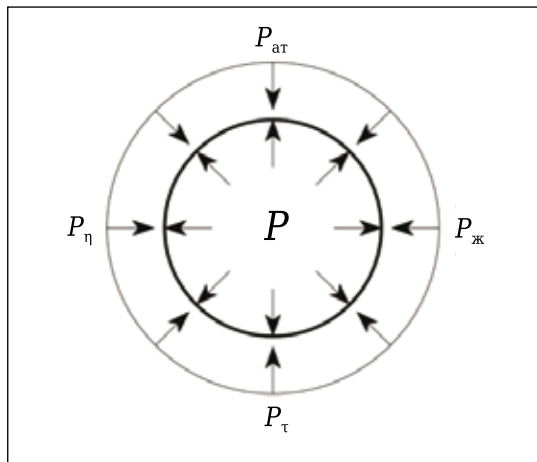


Рис. 1. Схема сил, влияющих на единичную пору: P_t — давление, обусловленное упруго-вязкими свойствами уплотняемого материала; P_p — сопротивление среды при взаимном движении ее частей; P_{at} — атмосферное давление; P_j — давление жидкости; P — избыточное давление в поре пузыря

но легко переводится в новые организованные состояния путем увеличения энтропии. Состояние сложной системы определяется переменными: температурой, давлением и внешним фактором — электрическим напряжением. Еще один фактор сопротивления росту поры — механическая прочность матрицы, характеризующая

предельным напряжением сдвига: $P_t = 4\pi\tau_0$, где P_t — давление, обусловленное упруго-вязкими свойствами уплотняемого материала; τ_0 — предельное напряжение сдвига.

Таким образом, можно утверждать, что $\lim_{i \rightarrow \infty} P_{n(t)} = P_{max}$. Причем $P_{max} = f(d, \alpha, K, \sigma, \delta, \nabla t, \varphi_{cp}, U)$, а $\lim_{d \rightarrow 0} P_{max} = 0$, где d — размер ячейки в поперечнике; α — коэффициент использования пенообразователя; K — выход пор (отношение объема пены к массе пенообразователя); σ — поверхностное натяжение жидкой фазы; δ — толщина межпоровой перегородки; ∇t — градиент подводимой температуры; U — величина подводимого вольтажа.

Согласно теории Лапласа давление в поре тем больше, чем больше ее радиус. И если двум расположенным рядом порам разных диаметров одинаково сообщать тепло, газ под действием перепада давления между ними диффундирует через перегородку из меньшей в большую, пока она совсем не исчезнет. То есть микропоры (до $d = 0,2$ мм) разрушаются при меньшем давлении, чем поры больших размеров. Разрушаясь, они коалесцируют и объединяются в более крупные. Их размер в поперечнике близок к размеру большинства пор всего образца. Вместе с тем соседние поры аналогично модифицируются таким образом, что встречное давление соседних ячеек (рис. 2), воздействуя на сольват-

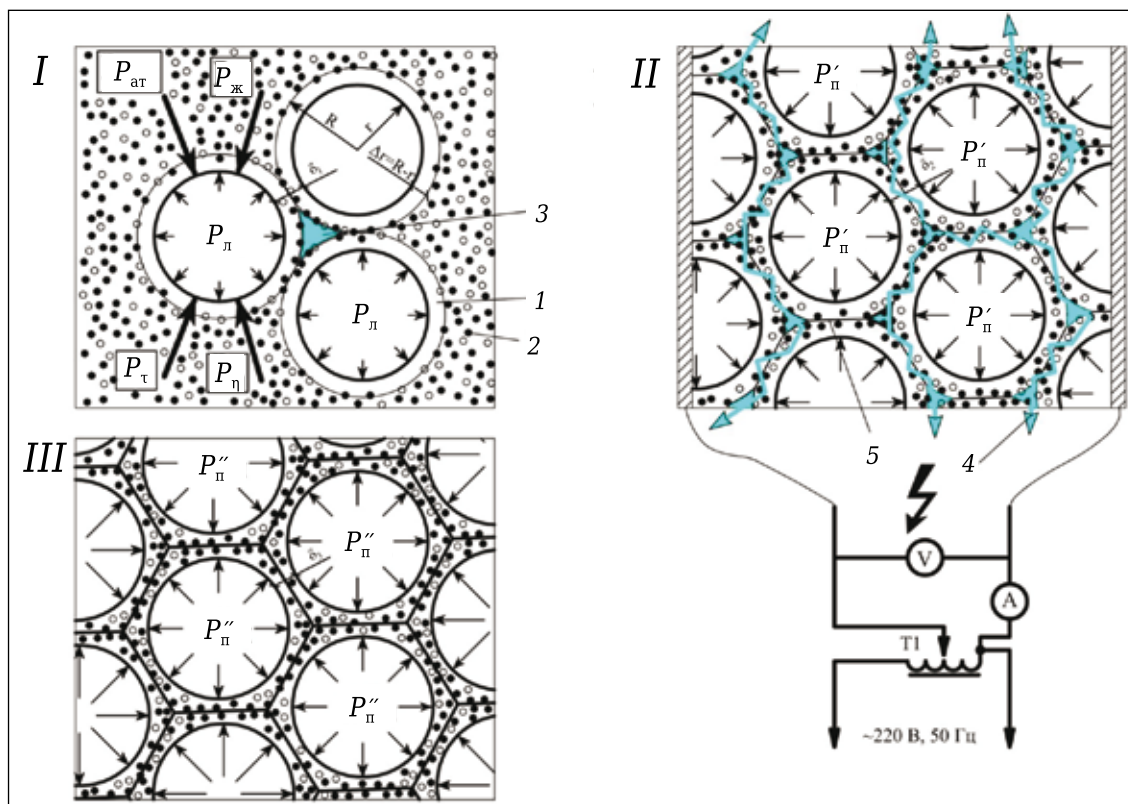


Рис. 2. Модель процесса самоуплотнения пеномассы в ЭГТСП: I — равновесное состояние формовочной массы; II — при воздействии ЭГТСП; III — после отключения электрического напряжения; P_l — давление Лапласа; P'_n и P''_n — давление внутри поры в момент времени t_1 и t_2 соответственно; $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$ — толщина межпоровых перегородок; остальные обозначения — в тексте

ную оболочку 1, сближает между собой минеральные частицы 2 в ней, вынуждая двигаться физически связанную жидкость 3 по каналам Плато в зону пониженного давления макрообъема 4 (за пределы формы через перфорацию). Ячейки подвергаются деформации 5.

В результате комплекса перечисленных явлений достигается однородность макро-

структуры и исключаются дефекты (каверны и расслоение), а из-за повышения сплошности минерального компонента возрастает прочность изделий. Положение о частотном распределении пор подтверждается результатами исследований образцов, обработанных электрическим током на стадии формования до температур 30, 40, 50 и 60 °С, при сравнении их с контрольным образцом, отформованным при 22 °С без самоуплотнения.

Исследования проводили путем линейного замера 200 пор на микроскопе. Максимальный размер пор принят равным 1,5 мм, так как более крупные носят единичный характер. Результаты эксперимента приведены в таблице и показаны на рис. 3, 4.

По результатам сравнения микро- и макропористости видно, что основной объем пор пенолегковесного материала по разработанному методу приходится на поры в интервале от 0,6 до 1,1 мм. Таким образом, можно утверждать,



Рис. 3. Фото образцов, изготовленных по классической технологии (а) и в ЭГТСП (б)

Зависимость макропористости пенолегковесного материала от температуры электропрогрева пеномассы в замкнутой форме

Показатели	Содержание пор, %, при максимальной температуре прогрева, °С				
	22	30	40	50	60
Размер пор, мм:					
0,2	8	0	0	0	0
0,3	21	2	1,5	0	0
0,4	24	26	11	8	9
0,5	19	29	26	21	18
0,6	10	17	23	18	19
0,7	7	11	17	16	18
0,8	4,5	7	8	16	22
0,9	3	3	5	9	4,5
1,0	1,5	2	4	6	6
1,1	1	1	2	1,5	2
1,2	0,5	1	1	4	1
>1,5	0,5	1	1,5	0,5	0,5
d_{cp} , мм	0,48	0,58	0,64	0,70	0,69
Дисперсия	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Среднеквадратичное отклонение	0,21	0,20	0,21	0,21	0,19
Коэффициент вариации, %	44,10	34,10	32,43	29,90	27,87

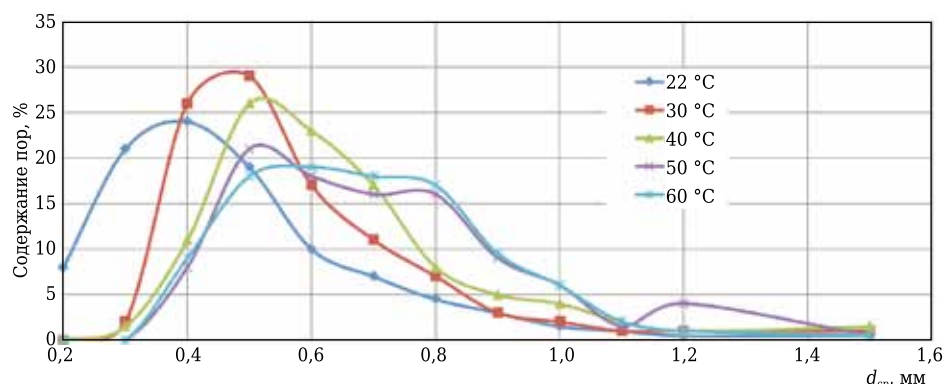


Рис. 4. Влияние температуры электропрогрева на частотное распределение макропористости при самоуплотнении пеномасс; d_{cp} — средний размер пор

что уплотненная в ЭГТСП пеномасса более однородна и содержит минимальные отклонения от сплошности пористой системы.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ПЕНОМАСС В ЭГТСП

В качестве пенообразователей выступают поверхностно-активные вещества (ПАВ), оказывающие двойственное влияние на пеносистему: при малых концентрациях невозможно создать необходимый объем пены, при высоких — молекулы ПАВ, адсорбируясь на частицах глины, сдерживают их коагуляцию.

Одним из основных требований к пенам является ее стойкость, которая характеризуется высотой разрушения столба пены за единицу времени. Устойчивость пены напрямую зависит от прочности пленок. Несущая способность пены характеризуется тем, что при введении в нее частиц огнеупорного компонента они должны оставаться на поверхности адсорбционного слоя, сохраняя ее целостность. При недостаточной ее прочности и устойчивости пленки разрываются, вызывая осаждение пеномассы, рост ее плотности и разрушение строения.

Устойчивость пены обуславливает кинетический фактор, характеризующий способность реагировать на локальное изменение толщины и сплошности восстановлением ослабленного участка. Это объясняется поверхностным течением жидкости из области низких поверхностных натяжений в область высоких. Понижение поверхностного натяжения наблюдается при утончении пленки (эффект Марангони). Пена с ячейками многогранной формы близка к равновесному состоянию, поэтому она более устойчива. Однако при росте температур стойкость пены снижается, а кратность принимает максимальные значения при 20 °С.

Соотношение вода : пена влияет не только на плотность пеномассы, но и на ее реологические свойства. Каждой величине поризации пеномассы соответствует оптимальная влажность. При ее превышении пеномасса начинает вытекать из формы, при недоборе необходимого значения влажности теряется подвижность пеномассы и в ходе укладки образуются дефекты. Интервал оптимального влагосодержания расширяется с повышением степени поризации. Для упрощения и обеспечения технологических процессов желательна получение пены, сохраняющей форму при действии собственного веса и обладающей высокодисперсной структурой.

Для определения пенообразователя с наименьшим разрушающим воздействием на пеномассу проведены предварительные исследования наиболее популярных пенообразователей.

Выбор по pH. При значительной разнице pH растворной смеси глины и водного раствора ПАВ влияние стерического эффекта возрастает, что обуславливает разрушение пеномассы, поэтому pH должен быть близок к фоновому.

Не менее важным фактором, влияющим на выбор пенообразователя, является *электропроводность получаемого раствора ПАВ*. Выявлено, что скорость роста электропроводности снижается при достижении критической концентрации мицеллообразования. Увеличение концентрации ПАВ выше данного показателя нецелесообразно, поскольку это сопровождается снижением прочности и плотности сырца.

Повышенная устойчивость пеномассы на белковых пенообразователях обуславливается тем, что длинные разветвленные молекулы ПАВ образуют на поверхности воздушных пор высоковязкие растворы, препятствующие их взаимному сближению (структурно-механический барьер). Синтетические пенообразователи образуют на границе раздела фаз газ-жидкость мономолекулярные адсорбционные слои, а часть молекул находится в равновесном состоянии в межпленочной жидкости. Вместе с тем вязкость низкомолекулярных синтетических ПАВ значительно ниже, чем у высокомолекулярных белковых.

Из результатов исследований поверхностного натяжения пенообразователей разной природы следует, что пеномассы на природных ПАВ характеризуются большей устойчивостью к внешним факторам, к которым можно отнести также воздействие ЭГТСП. При использовании низкомолекулярных синтетических ПАВ вследствие меньшей работы по образованию поверхностей раздела фаз и снижения избыточного давления (Лапласа) внутри пор устойчивость пеномассы ниже.

Таким образом, результаты анализа литературы по данной тематике, а также предварительные эксперименты показали, что наиболее оптимальными пенообразователями для применения в технологии самоуплотнения в ЭГТСП являются природные высокомолекулярные ПАВ. ■

Получено 26.04.20

© В. Н. Соков,

А. А. Кулибаев, 2020 г.