

УДК 666.3-127:621.3.014

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЕНОТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОГИДРОТЕПЛОСИЛОВОГО ПОЛЯ.

## Часть 1. Анализ особенностей генерирования внутреннего давления в пеномассе при внесении в нее энергии электрического тока

Выдвинута концепция о потенциальной энергии, заложенной природой пеносистемы самоуплотняться при комплексном воздействии на нее электрогидротеплосиловым полем. Генерирование избыточного внутреннего давления в пеносистеме изучали аналитически и экспериментально. Экспериментальные данные по отслеживанию динамики температуры и давления получали с применением ЭВМ и современной электронно-компонентной базы. Метод, заложенный в технологию, позволяет совместить в одной операции ряд процессов: уплотнение огнеупорных компонентов смеси, удаление усадочной влаги, выштамповывание любого профиля легковесного изделия, обеспечение четких граней, не требующих шлифования и обрезки изделий.

**Ключевые слова:** самоуплотнение, потенциальная энергия, электрогидротеплосиловое поле (ЭГТСП), энергия переменного тока, коэффициент объемного расширения, генерирование давления.

**П**еноспособ технологически определяется повышенным количеством воды затворения, необходимой для получения однородной массы. Традиционное теоретическое воззрение на сушку пеномасс как на процесс удаления воды затворения только испарением привело к весьма продолжительному циклу сушки. Выдвинута концепция о потенциальной энергии, заложенной природой пеносистемы, самоуплотняться в замкнутых перфорированных объемах и удалять механически связанную влагу при комплексном воздействии на нее электрогидротеплосилового поля (ЭГТСП).

Суть способа заключается в следующем. Пеномасса заливается на полный объем в замкнутую перфорированную форму и подвергается электропрогреву пластинчатыми электродами, расположенными на противоположных гранях. Происходит ее быстрый и равномерный прогрев по всему объему. Это наиболее мобильный и регулируемый способ обогрева масс. Метод, заложенный в технологию, позволяет совместить в

одной операции ряд процессов: уплотнение огнеупорных компонентов смеси, удаление усадочной влаги, выштамповывание любого профиля легковесного изделия, обеспечение четких граней, не требующих шлифования и обрезки изделия.

Пеномасса является структурированной дисперсной системой, проявляющей упругие, пластические и вязкие свойства. На стадии ее получения важнейшими факторами являются структурно-механические свойства пенной пленки и характеристики минерального компонента в межпоровых перегородках. Именно они определяют характер границ и закономерностей (или закономерности, без характера) деформирования мембран под действием внутренних усилий. Частицы огнеупорного порошка, окаймленные пленкой воды, обладают силами межмолекулярного сцепления. Это создает пространственную структуру огнеупорного теста, придавая ему пластические свойства и обеспечивая изменение формы при приложении силовых воздействий.

Подводить тепловую энергию к расширяющимся массам можно разными способами. Всесторонний конвективный прогрев в форме горячим теплоносителем энергоемок и продолжителен. Вызывает «зашемление» влаги внутри формуемой массы, а градиент температур и давлений направлен от периферии к центру, тормозя движение влаги. Односторонний контактный нагрев тепловыми нагревателями (частный случай всестороннего прогрева) устраняет про-



В. Н. Соков  
E-mail: sersok\_07@mail.ru

блему «защемления» влаги, но также энергоёмок и затратен.

Изучали электропрогрев системы через пластинчатые сплошные электроды, расположенные на двух противоположных сторонах замкнутой формы. Через пеномассу пропускали переменный ток частотой 50 Гц. По сравнению с контактным обогревом электропрогрев имеет ряд преимуществ:

- равномерный прогрев пеномассы по всему сечению (поверхностные слои изделия отдают часть тепла на нагрев формы, создается наблюдающийся в начальный период незначительный перепад температур (6–8 °С);

- возможности ускоренного разогрева формовочных масс по всему объёму до требуемой температуры, а также автоматизации и даже компьютеризации процесса;

- необходимые условия для удаления излишней влаги из формовочной системы через перфорированные грани из-за совпадения направления движения влаги и градиента температур, влагосодержания и давления.

Высокую эффективность электропрогрева можно достичь форсированными темпами, однако эксперимент показал, что скорость разогрева не может быть неограниченно высокой и должна увязываться с процессами, происходящими внутри пеномассы. Исследовали также ступенчатую тактику прогрева с кратковременными выдержками на отдельных этапах; при этом общая продолжительность прогрева составляла от 10 до 40 мин.

Процесс самоуплотнения пеномасс под воздействием токов промышленной частоты можно охарактеризовать следующим образом. Начальная структура пенокерамической смеси представляет собой ячейки, окруженные сольватными оболочками огнеупорного компонента, связанного с водой и содержащего дополнительные поры, образованные в результате воздуховлечения. Включенная в электрическую цепь формуемая масса оказывает активное сопротивление прохождению переменного тока и трансформируется в тепловую, разогревая в первую очередь жидкую токопроводящую фазу. Минеральный компонент, соприкасаясь с жидкой фазой, отбирает тепло до тех пор, пока температура минерального компонента и жидкой фазы не выровняется. Каждый компонент обладает своим коэффициентом объёмного расширения. Коэффициенты объёмного расширения компонентов пеномассы в интервале 20–70 °С приведены ниже:

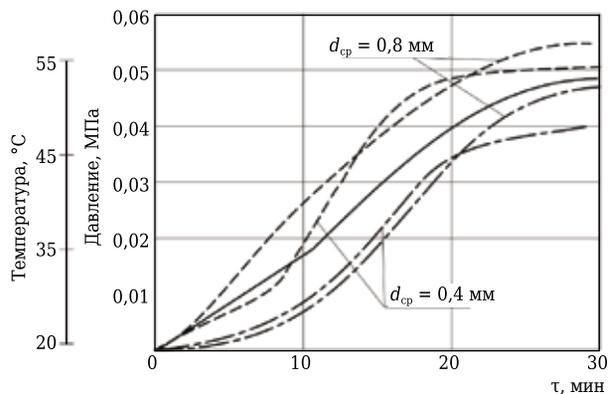
| Компонент пеномассы.....  | Вода   | Влажный воздух | Минеральный компонент |
|---|--------|----------------|-----------------------|
| Коэффициент объёмного расширения, $10^{-6} \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$ ..... | 52–640 | 5000–9000      | 40–60                 |

Твёрдая фаза имеет наименьший коэффициент объёмного расширения и увеличивается в объёме незначительно (всего примерно на

0,13–0,2 %), обладая достаточной степенью свободы, поэтому воздействием давления на формуемую массу от её температурного расширения можно пренебречь и в расчетах не учитывать. В свою очередь, вода, заключенная главным образом в межпоровых перегородках (мембранах) и между частицами минеральных компонентов, увеличивается в объёме на 2,5–3,0 % от первоначального объёма. Расширение воды не вызывает значительных деформаций межпоровых перегородок, так как абсолютный прирост объёма менее 1 % и эта избыточная влага может мигрировать в материале.

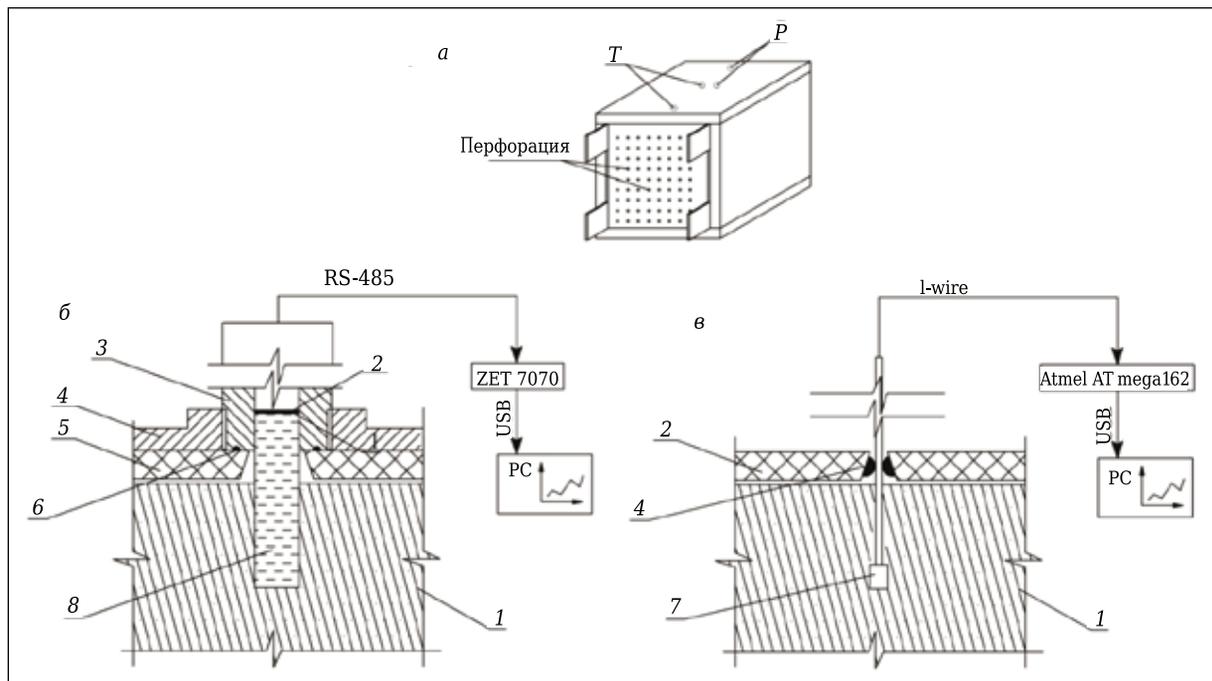
Кондуктивное тепло передается на третью составляющую формуемой массы — воздух. Давление расширяющегося в порах воздуха при 40–70 °С и влажности пеномассы 30–40 % около 0,05 МПа. Дальнейшее сообщение тепла пеномассе вызовет переход воды в пар, что, как известно, сопровождается увеличением объёма в 1600–2000 раз от первоначального. Важно не допустить массового перехода воды в пар, происходящего в небольших объёмах при 65–70 °С. Причём на скорость этого процесса значительно влияют теплоёмкость и теплопроводность воздуха, зависящие от относительной влажности среды и размера пор (рис. 1).

С ростом температуры газовой составляющей от границы раздела фаз интенсифицируется испарение влаги в сторону наименьшего сопротивления — внутрь замкнутого пространства. На этом этапе большая часть генерируемого тепла идет на преодоление сил межмолекулярного взаимодействия, обуславливая работу, идущую на изменение внутренней энергии при испарении (работа дисгрегации). Воздух, заключенный в ячейке, будет ассимилировать эту влагу, пока при этих усло-



**Рис. 1.** Изменения температуры в центре образца (—) и избыточного давления в уплотняемом объёме во времени  $t$  при разном среднем диаметре пор  $d_{cp}$  пеномассы (указан на кривых) и кратности пены 10 (— · — · —) и 15 (— · — · —)\*

\* Кратность пены — отношение объёма пены к исходному объёму раствора пенообразователя, пошедшего на её образование [Тихомиров, В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. К. Тихомиров ; 2-е изд. — М. : Химия, 1983. — 264 с.]



**Рис. 2.** Схемы размещения датчиков: общая (а), давления (б) и температуры (в): 1 — материал; 2 — ниобатово-литиевая мембрана; 3 — датчик давления zet7070i; 4 — уплотнительное кольцо; 5 — крышка (стенка) формы; 6 — соединительный фланец; 7 — заполненный жидкостью капилляр; 8 — температурный датчик Dallas DS18b20

виях не достигнет 100 %-ной относительной влажности, ускоряя прогрев. При этом давление в нем паров воды возрастет, а давление разогретого воздуха станет больше атмосферного. При нагревании в поре растет парциальное давление сухого воздуха и уменьшается относительная влажность. В этом случае воздух вновь приобретает способность к дальнейшей ассимиляции влаги и в поре может максимально увеличиться в объеме на 22–25 % при росте температуры от 20 до 90 °С.

С ростом давления теплота парообразования уменьшается, а интенсивность прогрева растет, поэтому процесс давления в поре ускоряется в геометрической прогрессии, приводя к стихийной коалесценции пор (депоризации) и оседанию пенomассы, вынуждая ограничить разогрев температурой 60 °С. Электропрогрев проводится в то время, когда масса находится в вязко-пластичном состоянии. Структурная прочность межпоровых перегородок мала, и можно полагать, что воздушная ячейка будет подчиняться газовым законам при воздействии на нее температуры и давления.

Генерирование избыточного внутреннего давления в пеносистеме изучали аналитически и экспериментально. Экспериментальные данные по отслеживанию динамики температуры и давления получали с применением ЭВМ и современной электронно-компонентной базы. Схема установки датчиков показана рис. 2.

Датчик давления вкручивали через соединительный фланец в крышку формы. Ниобатово-литиевая мембрана интеллектуального датчика давления zet7070i воспринимала нагрузку по капилляру, заполненному несжимаемой жидко-

стью (водой), после чего преобразовывала динамику изменения ее сопротивления в электронный сигнал, который прописывался в памяти измерителя. Преобразованный, передавался по каналу RS-485 в цифровом виде. Модуль преобразования ZET 7070 изменял сигнал для передачи данных по универсальному каналу USB, после чего на ПЭВМ с помощью программного обеспечения ZET lab визуализировался сигнал в графическом и табличном виде.

Температуру замеряли зондовым способом. Температурный датчик Dallas DS18b20, изолированный термоусадочной трубкой, помещали на выбранную глубину образца. Информация о температуре, преобразованная в цифровой сигнал, подавалась по каналу I-wire на макетную плату Atmel AT mega162 для логического преобразования и передачи по каналу USB на ПЭВМ. Полученный сигнал визуализировали в цифровом и графическом виде с помощью программного обеспечения оригинальной разработки.

Как установлено ранее, степень поризации неразрывно связана с температурой пенomассы и давлением внутри ее ячеек, которым можно управлять в процессе электрообработки. Этот факт обуславливает разработку методики, позволяющую регулировать степень поризации пенomассы путем направленного ее нагрева в заданных условиях. Для этого необходимо рассмотреть изменение параметров смеси на различных этапах ее обработки в ЭГТСП. ■

Получено 26.04.20  
© В. Н. Соков, 2020 г.