

ШГ-1. Пористость покрытий оценивали электрохимическим методом. Коррозионные испытания плазменных покрытий проводили в 10 %-ном растворе HCl и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 %-ном растворе NaOH и 5 %-ном растворе NaCl.

В результате исследований установлено, что ввод полиуретана (ПУ) в эпоксидную смолу (ЭС) активизирует процесс отверждения системы. Выход гель-фракции достигает 93 %. Содержание гель-фракции в зависимости от концентрации ПУ имеет экстремальный характер. Повышение концентрации ПУ более 15 % отрицательно сказывается на структурированности системы.

Анализ ИК-спектров композиции ЭС-ПУ показал, что интенсивность полос поглощения гидроксильных и изоциантных групп, проявляющихся при 3450 и 2280 см<sup>-1</sup>, с увеличением продолжительности осаждения уменьшилась. Одновременно появились полосы, соответствующие уретановым группам при 1730 и 3300 см<sup>-1</sup>. Данные изменения в ИК-спектрах свидетельствуют о химическом взаимодействии при плазменном осаждении эпоксидной и изоциантной групп с образованием циклических структур замещенных оксазолидонов.

Гибкость эпоксидно-полиуретановых покрытий выше эпоксидных, что обусловлено полиблочным строением, а также высокой концентрацией уретановых и других полярных групп, образующих в системе прочные физические связи, способные к перестройке под воздействием внешних факторов.

Пористость покрытий с добавлением ПУ до определенной концентрации (15 %) уменьшается, что положительно сказывается на защитных свойствах покрытия. Экстремальный характер пористости плазменных покрытий является следствием различия реологических характеристик компонентов.

Анализ результатов испытаний плазменных эпоксидно-полиуретановых покрытий в жидких агрессивных средах через 30 суток испытаний свидетельствует о высокой химической стойкости покрытий.

УДК 539.3

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОУСАДКИ ПОЛИМЕРОВ

Д. А. ЧЕРНОУС

*Белорусский государственный университет транспорта*

Явление термоусадки полимерных материалов широко используется в различных отраслях техники для соединения, изоляции и уплотнения различных элементов конструкций. Данное явление заключается в полном или частичном восстановлении формы предварительно деформированного и охлажденного полимерного изделия при его нагревании. Явление термоусадки, называемое также "эффектом памяти" полимеров, может быть реализовано в пять этапов: 1) изотермическое деформирование (вытяжка); 2) изометрическое охлаждение (замораживание); 3) изотермическое снятие нагрузки; 4) нагревание; 5) охлаждение до температуры окружающей среды.

Первые три этапа представляют собой процесс получения термоусаживающегося изделия. Последующие этапы (непосредственная реализация эффекта «памяти») могут осуществляться в свободном состоянии (без нагрузки) или в условиях, близких к изометрическим. При свободном нагревании происходит восстановление изделием своих первоначальных размеров. При изометрическом нагревании возникают терморелаксационные сжимающие напряжения  $\sigma_{тр}$ . Сжимающие напряжения, возникающие при последующем изометрическом охлаждении, называют усадочными  $\sigma_{ус}$ . Значения напряжений  $\sigma_{тр}$  и  $\sigma_{ус}$  определяют эксплуатационные показатели полимерного используемого изделия.

Несмотря на широкое использование термоусаживающихся изделий, в настоящее время отсутствует достаточно подробная математическая модель процесса реализации "эффекта памяти" полимеров, позволяющая прогнозировать и оптимизировать основные параметры термоусадки и деформационно-прочностные характеристики используемых материалов. Реализация "эффекта памяти" обусловлена процессами инициирования внутренних напряжений в полимерном материале при кристаллизации и релаксации напряжений при рекристаллизации. В связи с этим для анализа процесса термоусадки предлагается использовать феноменологическую модель "замороженной" деформации

шии. Данная модель позволяет описать напряженно-деформированное состояние полимерного материала с учетом зависимости его фазового состава от температуры. При этом связь осевого напряжения  $\sigma$  с продольной деформацией  $\epsilon$  в случае одноосного напряженного состояния можно представить в виде

$$\sigma(t) = E_1(T)\epsilon(t) + [E_2(T) - E_1(T)] \int_0^t [\epsilon(t) - \epsilon^*(\tau)] dN(\tau) - [E_1(T) + N(t)(E_2(T) - E_1(T))] \epsilon_T(t) + [E_2(T) - E_1(T)] \int_0^t \epsilon_T(\tau) dN(\tau).$$

Здесь  $t$  – время;  $T$  – абсолютная температура, зависимость которой от времени считается известной;  $E_1(T)$ ,  $E_2(T)$  – модули упругости полимера в высокоэластичном и кристаллическом состояниях соответственно;  $N(t)$  – доля содержания кристаллической фазы, зависящая от температуры;  $\epsilon^*(\tau)$  – деформация, соответствующая доле  $N(\tau)$  при охлаждении материала, т. е. «замороженная» деформация;  $\epsilon_T$  – температурная деформация. Величина  $N$  принимает следующие значения:  $N = 0$  при  $T > T_{g1}$  и  $N = 1$  при  $T < T_{g2}$ . Здесь  $T_{g1}$ ,  $T_{g2}$  – температуры начала и завершения процесса кристаллизации. Функция  $N(T)$  в диапазоне  $T_{g2} \leq T \leq T_{g1}$  определяется экспериментально.

Используя предложенную математическую модель, можно определить зависимости  $\sigma(t)$  и  $\epsilon(t)$  в процессе реализации явления термоусадки полимера, т. е. описать приведенные ранее этапы реализации "эффекта памяти" полимеров. Для реализации эффекта памяти необходимо, чтобы температура на третьем этапе была ниже  $T_{g2}$ , а в конце четвертого – выше  $T_{g1}$ . Наибольший интерес для оптимизации явления термоусадки и обеспечения надежности используемого изделия представляет зависимость напряжения на четвертом этапе  $\sigma_4$  от температуры и значение  $\sigma_{тр}$ , достигаемое по завершении этого этапа. В качестве примера рассмотрим процесс реализации эффекта памяти образца из радиационно-модифицированного полиэтилена высокой плотности. Характер полученных зависимостей  $\sigma_4(T)$  соответствует известным экспериментальным данным.

Таким образом, предложена математическая модель описания процесса термоусадки кристаллизующихся полимеров, позволяющая прогнозировать напряженно-деформированное состояние используемого изделия и оптимизировать основные параметры процессов его создания и эксплуатации.

УДК 625.08

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ И ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ТОРМОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

А. С. ШИБЕКО

*Могилевский государственный технический университет*

Анализ процесса торможения современных гидрофицированных машин показывает, что энергия вращательно и поступательно движущихся элементов превращается в тепловую, рассеивается в окружающей среде и полезно не используется. Автором предложена система, позволяющая накапливать энергию торможения и полезно ее использовать в моменты наибольшей загрузки двигателя.

Накопление энергии осуществляется посредством регулируемого реверсивного аксиально-поршневого гидронасоса, кинематически связанного с двигателем и закачивающего гидравлическую жидкость в гидропневмоаккумулятор. Величина подачи гидронасоса пропорциональна ходу педали тормоза и обратно пропорциональна величине давления зарядки гидропневмоаккумулятора. Во время движения машины без торможения гидронасос работает при минимальной подаче на слив. Зарядка гидропневмоаккумулятора осуществляется до момента достижения давления настройки предохранительного клапана.

Полезное использование энергии торможения осуществляется посредством схемы, обеспечивающей торможение. При условии наличия жидкости в гидропневмоаккумуляторе и воздействии оператора на педаль акселератора жидкость из гидропневмоаккумулятора поступает под давлением на вход гидронасоса, создавая дополнительную полезную мощность, передаваемую через трансмиссию на двигатель.