

УДК 69:691.17

**ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА**

**Д.В. Иванов, В.П. Ярцев**

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; DV\_Ivanov@list.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** армирование; долговечность; клеевой шов; пенополистрол; термофлуктуационная концепция прочности твердых тел; утепление зданий и сооружений.

**Аннотация:** Рассмотрена долговечность пенополистирола с позиций термофлуктуационной концепции прочности твердых тел. Приведены данные о возможности повышения прочностных характеристик при помощи армирования пенополистирола. Представлены соответствующие экспериментальные зависимости.

---

Для обеспечения требований нормативных документов [1] и снижения расхода тепловой энергии необходимо осуществлять дополнительную теплоизоляцию наружных стен реконструируемых зданий и применение многослойных ограждающих конструкций с использованием эффективных утеплителей для вновь строящихся.

В странах Европы большое внимание уделяется проблеме энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве, которая является одной из приоритетных, и решение ее возведено в ранг государственной политики. Возникла даже специальная подотрасль, занимающаяся утеплением зданий. В итоге за последние 20 лет расходы на отопление за рубежом сократились на 40...50 % и составляют около 45...50 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год. В России этот показатель равен 80...120 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год. Поэтому сегодня в России ежегодно, в целях уменьшения теплопотерь, утепляется приблизительно 200 тыс. м<sup>2</sup> поверхности. Для сравнения: в Германии эта цифра превышает 30 млн м<sup>2</sup> в год [2].

В целом технические решения теплозащиты можно классифицировать по трем основным признакам: по месту расположения теплоизоляции (снаружи, внутри или комбинированный метод), по виду материала утеплителя и по виду материала защитного слоя (мокрая отделка – штукатурные растворы или сухая – облицовочные плиты и панели).

Расчет толщины утеплителя в таких конструкциях производится согласно [1]. В данном расчете учитываются, в первую очередь, теплофизические свойства утеплителя (его теплопроводность и термическое сопротивление), а затем его прочностные и деформационные свойства. Согласно [2, 3] по теплофизическим показателям лидирующие позиции занимает пенополистирол: при одинаковом термическом сопротивлении он имеет наименьшую толщину (рис. 1).



**Рис. 1. Соотношение толщин различных материалов при одинаковом термическом сопротивлении**

В общем случае, пенополистирол представляет собой дисперсную полимерную систему, в которой относительно равномерно распределены в пространстве полимер и газовая фаза [3]. Сочетание твердой и газообразной фаз определяет специфичность физико-механических и теплофизических свойств материала. Прочностные и теплофизические свойства пенополистирола на сегодняшний день довольно хорошо изучены. Однако в связи с тем, что постоянно появляются новые конструкции утепления, возникают вопросы, связанные с долговечностью (работоспособностью) пенополистирола в таких конструкциях утепления. Проведенные в работе [4] исследования показали что долговечность (работоспособность) пенополистирола можно рассматривать с позиций термоактивационной концепции прочности твердых тел, предложенной в работе [5]. По итогам исследований в табл. 1 представлены результаты расчета долговечности пенополистирола в различных конструкциях утепления в заданном диапазоне температурно-силовых воздействий, возникающих в процессе эксплуатации.

Однако в реальных конструкциях материал работает в условиях знакопеременных напряжений и температур, соответственно эксплуатационная долговечность будет меньше значений, приведенных в табл. 1. В связи с этим в работе [6] были проведены исследования, направленные на повышение прочностных характеристик и долговечности пенополистирола. В качестве основного способа повышения эксплуатационных характеристик было выбрано армирование. Данные кратковременных испытаний армированного пенополистирола представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Долговечность пенополистирола в конструкции несъемной опалубки [4], с**

Материал	Вид нагрузки	Вид несъемной опалубки		
		Velox	Thermodom	Plastbau-3
ПСБ-С М15	Поперечный изгиб	–	–	$10^{4,7}$
	Сжатие при деформации 10 %	$10^{4,8}$	–	–
ПСБ-С М35	Поперечный изгиб	–	$10^{3,7}$	$10^{10,1}$
	Сжатие при деформации 10 %	$10^{11,6}$	–	–

Примечание. Velox:  $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{сж} = 0,033$  (М35) и  $0,03$  (М15) МПа;  $\sigma_{изг} = 5,7$  МПа; Thermodom:  $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{изг} = 0,225$  МПа – М35; Plastbau-3:  $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{изг(1)} = 0,067$  МПа,  $[\sigma_{изг(2)} = 0,096$  МПа] – М15 и М35.

Таблица 2

**Влияние зоны клевого шва и армирующей сетки на прочность при изгибе, МПа, ПСБ-С М35 [6]**

Наличие сетки	Образец без клея и сетки	Клей				
		ПВА			Перлфикс	
		Чистый	Сетка	Древесная мука и сетка	Чистый	Сетка
Отсутствует	0,343	–	–	–	–	–
Сверху	–	–	0,480	–	–	–
Снизу*	–	–	0,760	–	–	–
С двух сторон*	–	–	1,400	–	–	–
По толщине образца						
1:3	–	0,348	0,426	0,459	0,377	0,572
1:1	–	0,353	–	0,486	0,360	–
3:1	–	0,328	–	0,892	0,361	–

\* Разделение образца не происходит.

Как видно из табл. 2 при армировании материала сеткой прочность на изгиб значительно возросла (1,4 МПа). Исследование долговечности армированного пенополистирола проводили с позиций кинетической концепции разрушения твердых тел.

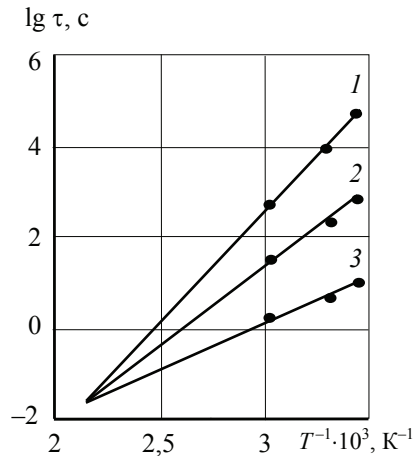
Экспериментальная зависимость, представленная на рис. 2, описывается обобщенным уравнением Журкова

$$\tau = \tau_m \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right) \right],$$

где  $\tau$  – время до разрушения (долговечность), с;  $\tau_m$  – период колебания кинетических единиц, с;  $U_0$  – начальная энергия активации, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механическая константа, кДж·(моль·МПа·с)<sup>-1</sup>;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж·(моль·К)<sup>-1</sup>;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К,  $T_m$  – предельная температура существования твердого тела, К.

Из полученных экспериментальных зависимостей графоаналитическим способом [5] рассчитали величины вышеописанных констант (табл. 3).

Анализ данных таблицы показывает, что наличие клеевой прослойки приводит к существенному изменению физических констант материала. Понижение  $T_m$  при приклеивании пенополистирола ПВА говорит о понижении теплостойкости материала; меняется и  $\gamma$  – при применении ПВА



**Рис. 2. Зависимости времени до разрушения образцов пенополистирола марки ПСБ-С М15, соединенных по толщине 1:1 клеем ПВА, от температуры при поперечном изгибе, МПа: 1 – 0,07; 2 – 0,08; 3 – 0,09**

Значения физических констант пенополистирола при поперечном изгибе

Марка пенополистирола	Вид клея	Соотношение толщин соединяемых элементов образца	Константы			
			$\tau_m, c$	$U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж}/(\text{моль}\cdot\text{МПа})$	$T_m, \text{К}$
ПСБ-С М15	–	1:0	$10^{-4,5}$	186	1160	556
ПСБ-С М15	ПВА	1/2:1/2	$10^{-1,5}$	312	3050	444
ПСБ-С М35	–	1:0	$10^{-2,9}$	200	515	526
ПСБ-С М35	ПВА	1/2:1/2	$10^{-1,5}$	390	1030	393
ПСБ-С М35	Перлфикс	1/4:3/4	$10^{-2,7}$	200	314	667

она возрастает практически в 2 раза, приблизительно в 2 раза возрастает  $U_0$ . Со всем другое поведение констант наблюдается при применении клея Перлфикс: теплостойкость материала возрастает, прочность материала увеличивается за счет понижения структурно-механической константы. Предельная прочность материала [5]

$$\sigma_m = U_0/\gamma$$

незначительно падает для образцов, изготовленных с применением ПВА, и возрастает в 1,6 раза для образцов, полученных с использованием клея Перлфикс при соотношении толщин соединяемых элементов образца 1/4:3/4. Таким образом, при приклеивании пенополистирола использование клея Перлфикс более предпочтительнее, так как он обеспечивает наибольшую долговечность материала.

Было также оценено влияние количества слоев на сопротивление пенополистирола сжимающим нагрузкам [6]. Известно, что при деформировании сжатием у пенополистирола уже при малых величинах полной деформации наблюдается остаточная. В [4] установлено, что деформация 5 % является упругой, а поскольку при сжатии в процессе эксплуатации не происходит разрушения образцов, то основной характеристикой длительного сопротивления сжимающим нагрузкам пенопластов является величина критической (необратимой) деформации. Для определения ее величины проведены испытания пенополистирола с различным количеством слоев (рис. 3).

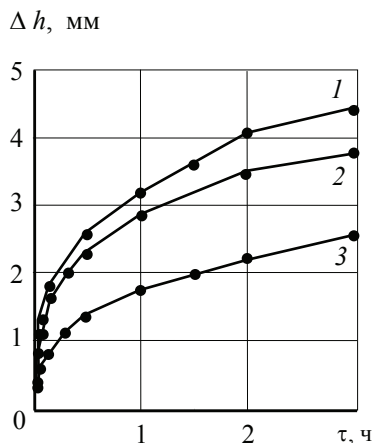


Рис. 3. Кинетические кривые сжатия образцов пенополистирола без клеевого шва (1), склеенного по толщине 1:1 (2), 1:1:1 (3)

Из рис. 3 видно, что при заданной толщине образца деформируемость падает симбатно количеству слоев, что необходимо учитывать при проектировании утепляющих конструкций.

В связи с тем, что наилучшее значение прочности и, соответственно, долговечности, дает армирование пенополистирола различными материалами, в работе [6] было также изучено влияние адгезии пенополистирола к различным материалам, используемым для армирования. Установлено, что наилучшими показателями обладают эпоксидная смола и клеящий состав на основе поливинилацетат-

ной эмульсии: разрушение происходило по пенополистиролу. При соединении пенополистирола клеем ПВА-М с различными облицовочными материалами более высокой прочностью обладают соединения с ДСП и ЦСП.

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- 1) местоположение клеевого шва по толщине плит пенополистирола и марка клея оказывают существенное влияние на долговечность утеплителя;
- 2) количество слоев в конструкции влияет на деформационные характеристики пенополистирола: чем больше количество слоев утеплителя, тем меньше его деформация;
- 3) для повышения долговечности утеплителя рекомендуется приклеивать сетку к нижнему слою плиты утеплителя. Облицовку или уплотнение поверхности плиты рекомендуется выполнять с двух сторон.

### *Список литературы*

1. Тепловая защита зданий : СНиП 23-02-2003 : утв. Госстроем России, 26.06.03: введ. в действие с. 01.10.03. – М. : ДЕАН, 2004. – 64 с. – (Безопасность труда России).
2. Пенопласт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.propenoplast.ru](http://www.propenoplast.ru). – Загл. с экрана.
3. Ярцев, В.П. Физико-механические и технологические основы применения пенополистирола при дополнительном утеплении зданий и сооружений / В.П. Ярцев, К.А. Андрианов, Д.В. Иванов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – 120 с.
4. Андрианов, К.А. Прогнозирование долговечности (работоспособности) пенополистирола в ограждающих конструкциях зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / К.А. Андрианов. – Пенза, 2002. – 24 с.
5. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М. : Химия, 1992. – 320 с.
6. Оводков, И.В. Влияние покрытия и армирования на прочность и долговечность пенополистиролов ограждающих конструкций : автореф. дис. ... магистра : 05.23.05 / И.В. Оводков. – Тамбов, 2005. – 91 с.

---

## **Improvement of Physical-Mechanical Characteristics and Longevity of Cellular Polystyrene**

**D.V. Ivanov, V.P. Yartsev**

*Department «Construction of Buildings and Structures», TSTU;  
DV\_Ivanov@list.ru*

**Key words and phrases:** adhesive joint; durability; insulation of buildings; polystyrene; reinforcement; thermo-fluctuation concept of strength of solids.

**Abstract:** The durability of polystyrene from the standpoint of thermal fluctuation of the concept of strength of solids. The data on the possibility of increasing the strength characteristics by means of polystyrene reinforcement are presented. The corresponding experimental curves are shown.

## **Erhöhung der physikalisch-mechanischen Charakteristiken und der Nutzungsdauer des Schaumpolyesterols**

**Zusammenfassung:** Es ist die Nutzungsdauer des Schaumpolyesterols vom Standpunkt der Thermofluktationalen Konzeption der Haltbarkeit der Hartkörper betrachtet. Es sind die Angaben über die Möglichkeit der Erhöhung der Haltbarkeitcharakteristiken mit Hilfe der Armierung des Schaumpolystirols angeführt. Es sind die entsprechenden experimentellen Anhängigkeiten dargelegt.

---

## **Augmentation des caractéristiques physiques et mécaniques et la longévité du polystyrène expansé**

**Résumé:** Est examinée la longévité du polystyrène expansé des positions de la conception thermofluctuationnelle de la dureté des corps solides. Sont citées les données sur la possibilité de l'augmentation des caractéristiques de dureté à l'aide du ferrailage du polystyrène expansé. Sont présentées les dépendances expérimentales correspondantes.

---

**Авторы:** *Иванов Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкции зданий и сооружений», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Леднев Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги», ГОУ ВПО «ТГТУ».

---