

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 678.5.06-405.8: 699.86

## Прочностные свойства жестких заливочных пенопластов типа ППУ-3Ф

**В. Г. Агузумцян, И. И. Крюков, О. О. Карапетян, В. П. Гнубкин,  
А. В. Горский**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт им. Ленсовета,  
Россия

*Рассмотрены прочностные и деформационные свойства жестких заливочных закрытопористых пенопластовых блоков типа пенополиуретанов ППУ-3Ф и установлены зависимости между физико-механическими параметрами и плотностью материала при испытаниях на сжатие и кручение.*

Среди жестких пенопластов наибольшее распространение получили заливочные закрытопористые пенополиуретаны (ППУ). Они широко используются в различных отраслях строительной индустрии, ракетной и авиакосмической техники в качестве теплоизоляционного и изоляционно-конструкционного среднего слоя ответственных трехслойных конструкций [1].

В связи с этим приобретает актуальность задача разработки методики сплошного неразрушающего контроля качества пенопластов, причем кроме определения непосредственно дефектов (таких, как “газовая полость”, усадочные трещины и т.д.) возникает необходимость в установлении физико-механических характеристик, существенно влияющих на качество изделий.

В данной работе приведены результаты исследований физико-механических характеристик (модуля упругости и предела прочности при сжатии, модуля сдвига и предела прочности при сдвиге) пенопласта ППУ-3Ф разрушающими методами с целью дальнейшего нахождения корреляционных зависимостей между определяемыми параметрами и параметрами ультразвуковых колебаний (скорость и амплитуда проходящей волны).

Структура пенопластов состоит из газовых ячеек, разделенных каркасом твердого полимера. Размер ячеек в зависимости от плотности ( $50 \dots 250 \text{ кг/м}^3$ ) изменяется от  $2,5 \cdot 10^{-3}$  до  $0,1 \cdot 10^{-3}$  [2]. На рис. 1 показана структура пенопластов высокой, средней и низкой плотности [3]. Непрерывная деформация плотноупакованных сферических газовых ячеек вспенивающегося пенопласта трансформирует их в правильные двенадцатигранники – додекаэдры (рис. 1, в). Однако в реальности из-за сложной технологии процесса вспенивания структура пенопласта неоднородна, причем вариации размеров газовых ячеек могут достигать 50% [3].

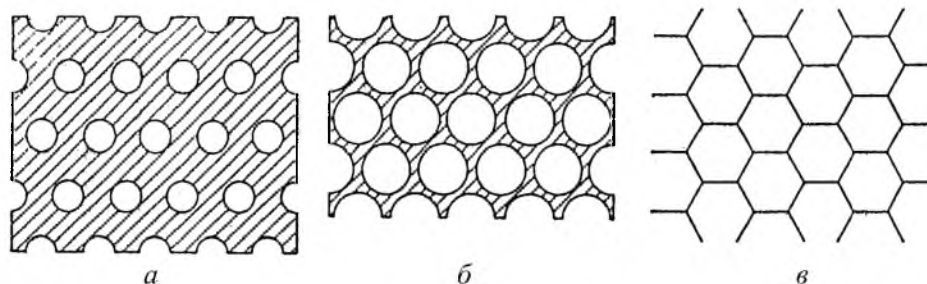


Рис. 1. Ячеистая структура пенопластов высокой (а), средней (б) и низкой (в) плотности.

Для заливочных ППУ характерно изменение плотности по толщине пеноблока. При заливке в закрытую форму под давлением кажущаяся плотность ППУ имеет максимальные значения у основания и у поверхности, минимальные – в средней части блока [1–3]. Жесткие ППУ обладают анизотропией прочностных свойств, которая обусловлена вытягиванием ячеек в направлении вспенивания. Ориентация ячеек, их форма и размеры определяются направлением движения пенообразующей массы (последняя состоит из полиэфира, изоционата, воды, фреона и специальных добавок), которые в значительной степени зависят от способа вспенивания, размеров изделия, температуры, давления и других параметров. Ориентация ячеек, как правило, вертикальная, но в ряде случаев в силу турбулентных явлений может отклоняться на тот или иной угол вплоть до горизонтального положения [1].

При производстве ППУ-блоков, используемых в ответственных изделиях, важно знать их физико-механические характеристики, такие как интегральная плотность  $\rho$ , предел прочности при сжатии  $\sigma_{10}$  (условный предел прочности пенопласта при деформации 10% – общепринятая характеристика прочности пенопластов данного типа), предел прочности при сдвиге  $\tau_{пр}$ , а также модуль упругости  $E$  и модуль сдвига  $G$ .

В настоящей работе испытывали пеноблоки размером  $6 \times 0,25 \times 0,056$  м с радиусом кривизны 1 м из жестких пенополиуретанов марки ППУ-3Ф, получаемых в соответствии с ТУ 3198–77 методом заливки. По плотности, называемой кажущейся [1], или относительной [2], такие ППУ делятся на VI типов: 50...80; 80...110; 110...130; 130...150; 150...200; 200...250 кг/м<sup>3</sup>.

Испытания на сжатие (определение модуля упругости и предела прочности) проводили на цилиндрических образцах высотой 0,05 м и диаметром 0,03 м, которые вырезали из блока стальным заточенным цилиндром. Это позволило обеспечить практически одинаковый диаметр всех образцов и отсутствие механических повреждений на их поверхности. После вырезки образцы подвергали торцовке в стаканах такого же диаметра, но имеющих переменную глубину. Перед испытанием образцы взвешивали с точностью до  $1 \cdot 10^{-5}$  кг и обмеряли с точностью до  $1 \cdot 10^{-5}$  м с целью последующего определения их плотности.

Механические испытания осуществляли на универсальной испытательной машине ЦМГ-500 (Германия) со шкалами 1000, 2500, 5000 Н (в зависимости от плотности пенопласта были задействованы все три шкалы).

Образцы нагружали непрерывно с помощью ручного привода. Средняя скорость нагружения составляла  $5 \cdot 10^{-5} \dots 8 \cdot 10^{-5}$  м/с. Испытуемые образцы устанавливали в специальное приспособление, обеспечивающее соосность прикладываемой нагрузки и равномерность ее приложения по торцам. Указанное приспособление имеет, кроме того, консольную пластинку с наклеенными на нее тензодатчиками для измерения продольных деформаций и тензометрическую скобу для записи поперечных деформаций [4–6].

На рис. 2 приведена типичная диаграмма  $\sigma - \varepsilon$ , полученная при испытаниях ППУ на сжатие. В начальный момент нагружения рост деформаций является нестабильным (зона “обмятия”). Начиная с деформации  $\varepsilon_1 = 0,1 \dots 0,5\%$  (этот предел тем выше, чем больше плотность пенопласта), указанная диаграмма стабилизируется, сохраняя относительную линейность до значения  $\varepsilon_y = 2,5 \dots 3,5\%$ . Нелинейность диаграммы на этом участке может быть охарактеризована изменением тангенса угла наклона  $\alpha$  ( $\alpha_0 \rightarrow \alpha$ ) касательной в каждой точке, т.е. изменением модуля упругости  $E$ . При деформации  $\varepsilon > \varepsilon_y$  начинается бурный, лавинообразный рост деформаций (зависимость  $\sigma - \varepsilon$  приобретает экспоненциальный характер). Интересно отметить, что процесс загрузки образцов сопровождается явлением акустической эмиссии – с увеличением нагрузки отчетливо прослушивается треск, интенсивность которого нарастает параллельно с ростом деформаций и постепенно также приобретает лавинообразный характер. Подобный эффект легко объяснить накоплением повреждений в образце, связанных с потерей устойчивости стенок отдельных ячеек пенопласта.

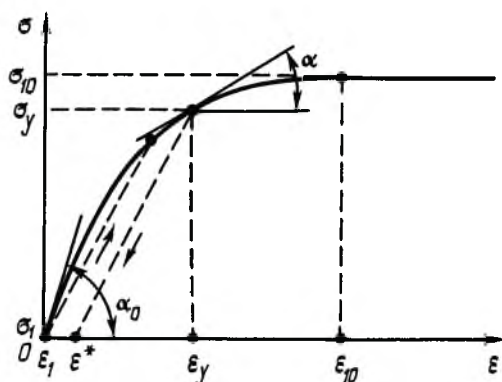


Рис. 2. Диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ , полученные при испытании пенопласта на сжатие.

При деформациях  $\varepsilon > 25\%$  происходит постепенный процесс “упрочнения” материала: нагрузка, которая при деформациях  $8\% < \varepsilon < 25\%$  изменялась незначительно в сторону увеличения, начинает плавно расти. Это явление связано с уплотнением структуры пенопласта. Для оценки физико-механических характеристик исследуемого материала использованы следующие параметры, определяемые на основании анализа диаграмм  $\sigma - \varepsilon$ , построенных для каждого образца:

$E$  – модуль упругости пенопласта, определяемый как тангенс угла наклона  $\alpha$  аппроксимирующей прямой на участке  $\varepsilon_1 - \varepsilon_y$ :

$$E = \frac{\sigma_y - \sigma_1}{\varepsilon_y - \varepsilon_1},$$

где  $\sigma_1, \varepsilon_1$  – напряжения и деформации в конце начального участка диаграммы (зоны “обмятия”);  $\sigma_y, \varepsilon_y$  – напряжения и деформации в конце квазиупругого участка;  $E_{\text{ср}}$  – средний модуль упругости пенопласта, определяемый как среднее арифметическое модулей упругости на каждой из ступеней загрузки;

$\sigma_y$  – условный предел упругости (пропорциональности) пенопласта, определяемый как значение напряжения в конце квазилинейного участка, т.е. такого участка, где рост напряжений в зависимости от деформаций может быть аппроксимирован линейной зависимостью. Необходимо отметить, что  $\sigma_y$  – характеристика весьма условная, поскольку количественный критерий для выбора соответствующей точки на диаграмме  $\sigma - \varepsilon$  отсутствует.

На основании накопленного опыта нами предложен количественный критерий для выбора точки  $\sigma_y$  на диаграмме  $\sigma - \varepsilon$ . По нормативной “остаточной” деформации при разгрузке выбирается некоторое значение деформации  $\varepsilon^*$  и проводится прямая, параллельная аппроксимирующей прямой  $\sigma - \varepsilon$  на квазилинейном участке, до ее пересечения с реальной диаграммой  $\sigma - \varepsilon$ . Эта точка пересечения и будет принята за условное значение  $\sigma_y$ . Выбор данного критерия осложняется тем, что на начальном участке, как уже отмечалось, существует зона “обмятия”, которая может существенно исказить положение выбираемой точки. В рассматриваемых экспериментах в качестве величины  $\varepsilon^*$  можно рекомендовать значение деформации 0,3...0,5%.

После статистической обработки результатов испытаний получены средние значения прочностных и упругих характеристик, на основании которых были построены диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  для каждого образца различного типа плотности. На рис. 3 представлены кривые для пенопластов ППУ-3Ф разной плотности. При этом среднеквадратическое отклонение напряжения  $\sigma$  при одной и той же деформации составляло  $\pm 10...12\%$  средних значений, среднеквадратическое отклонение плотности  $\rho$  равнялось примерно  $\pm 2,5\%$  среднего значения.

Испытания на сдвиг кручением проводили по известной методике [6], основанной на том, что напряженное состояние при кручении эквивалентно напряженному состоянию чистого сдвига. Согласно этой методике, цилиндрический образец подвергается действию крутящего момента. Для создания более “чистого” состояния сдвига цилиндрический образец выполняется пустотелым (трубчатым) с наружным диаметром  $D = 0,03$  м, внутренним диаметром  $d = 0,01$  м и длиной  $L = 0,05$  м. Кроме соответствия размеров образца толщине панели имеется еще одно преимущество – образец таких размеров унифицирован с образцом, используемым при испытаниях на сжатие. На данном этапе были проведены испытания образцов, вырезанных по оси  $Z$  в направлении вспенивания. При этом возникающие в образце напряжения действуют в плоскости  $XY$  перпендикулярно направлению вспенивания.

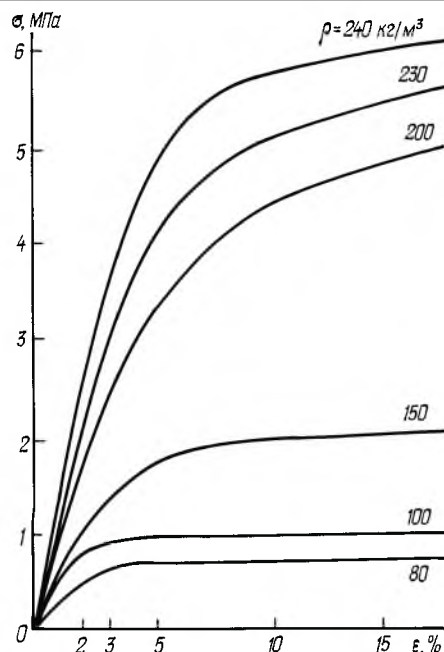


Рис. 3. Диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ , полученные при испытании на сжатие образцов пенопласта ППУ-3Ф разной плотности.

Испытания осуществляли на специальной испытательной машине на кручение рычажного типа. Образец закрепляли в машине посредством дисков диаметром 0,1 м, которые приклеивались эпоксидным клеем по торцам образца.

Крутящий момент измерялся и регистрировался по силоизмерительной шкале, которая была протарирована с помощью подвески фиксированных грузов (10...50 Н) с заданным плечом. Одновременно с замером крутящего момента по этой же шкале фиксировался угол закручивания одного из торцов образца  $\varphi_1$ . Угол закручивания другого торца образца  $\varphi_2$  измерялся прогибомером часового типа через тягу, закрепляемую к диску на торце образца. Абсолютный угол закручивания определялся как разница углов на обоих торцах:  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ .

Угол сдвига на поверхности образца ( $\rho = R$ )

$$\gamma = \varphi \frac{R}{L},$$

где  $R$  – радиус образца;  $L$  – его длина.

В результате испытаний для каждого образца были получены диаграммы  $\tau - \gamma$  (рис. 4). При этом среднеквадратическое отклонение напряжения  $\tau$  составляло  $\pm 10...12\%$  средних значений. Особенностью диаграмм является то, что в начальной стадии имеется “площадка обмятия”. Разрушение во всех случаях носило квазихрупкий характер – образцы разрушались от отрыва по винтовой линии, перпендикулярной направлениям главных напряжений.

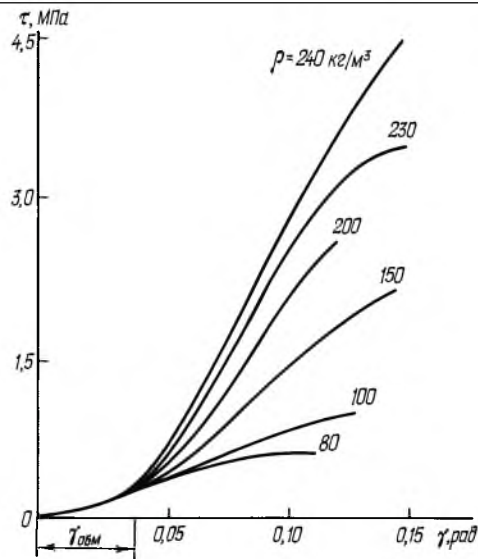


Рис. 4. Диаграммы  $\tau$ – $\gamma$ , полученные при испытании на кручение образцов пенопласта ППУ-3Ф разной плотности.

В результате анализа численных данных, полученных при испытаниях, а также диаграмм  $\tau$ – $\gamma$  в качестве величин, характеризующих физико-механические свойства пенопласта, приняты:  $\tau_{пр}$  – предельные касательные напряжения при разрушении;  $G_{ср}$  – средний модуль сдвига, определяемый как среднее арифметическое модулей сдвига на каждом шаге загрузки (без учета начального участка) в пределах  $\tau_y$ .

На основании полученных данных на рис. 5 и 6 для ППУ-3Ф приведены зависимости от кажущейся плотности  $\rho$  предела прочности  $\sigma_{10}$ , модуля упругости  $E$  при испытаниях на сжатие и соответственно предела прочности при сдвиге  $\tau_{пр}$ , модуля сдвига  $G$  при испытаниях на кручение.

Как видно, зависимости, проведенные через точки, соответствующие средним значениям, подобны друг другу, отличаются они лишь масштабом.

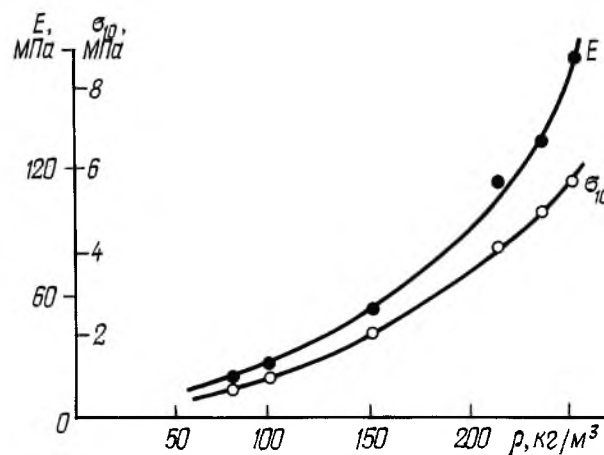


Рис. 5. Зависимость предела прочности  $\sigma_{10}$  и модуля упругости  $E$  при сжатии от плотности  $\rho$  пенопласта ППУ-3Ф.

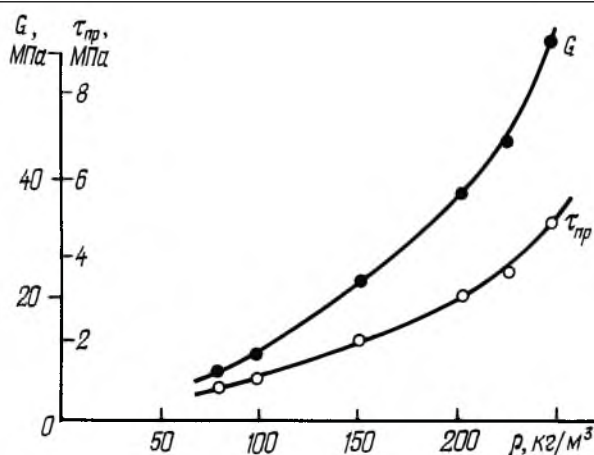


Рис. 6. Зависимость предела прочности  $\tau_{пр}$  при сдвиге и модуля сдвига  $G$  от плотности  $\rho$  пенопласта ППУ-3Ф.

Все указанные испытания были осуществлены для пенопластов марки ППУ-3Ф, имеющих разную плотность и соответственно различные параметры ячеистой структуры при неизменном химическом составе материала – основы. Это позволило получить зависимость предельных напряжений и модулей упругости от плотности. Выявленные при испытаниях особенности, с одной стороны, подтверждают существующий в настоящее время подход к расчету прочностных и упругих характеристик вспененных материалов с позиций моделирования их структуры, а с другой – показывают, что ни простые стержневые модели, ни подходы теории упругости микро-неоднородных сред не являются исчерпывающими. Их применение ограничено всегда узким диапазоном плотности каждого конкретного типа пенопласта. Для более объективной оценки использован комплексный подход, включающий экспериментальные данные [4].

На основании физико-механических зависимостей, полученных для образцов из бездефектного жесткого пенопласта ППУ-3Ф разной плотности, возможно оценить качества и прочностные параметры вновь получаемых пенопластовых блоков непосредственно путем измерения интегральной плотности материала. Кроме того, проведенные параллельно ультразвуковые измерения по определению скорости и амплитуды прошедших через исследуемые образцы ультразвуковых волн позволили установить корреляционные зависимости между ультразвуковыми и физико-механическими параметрами, что дало возможность разработать методику сплошного неразрушающего контроля качества пенопластов ППУ-3Ф.

В соответствии с ТУ 3198–77, пенопласт пригоден для использования в качестве среднего слоя ответственных трехслойных конструкций, если его прочностные параметры выше предельно допустимых для соответствующих типов ППУ-3Ф. Кроме того, материал ППУ бракуется, если в нем несплошности типа “газовая полость” превышают по линии 0,03...0,05 м. Эти дефекты резко снижают как прочностные, так и теплофизические свойства пенопласта и подлежат выявлению ультразвуковыми и другими неразрушающими методами контроля [1, 7].

## Резюме

Розглянуто міцнісні й деформаційні властивості жорстких заливальних закритопористих пінопластових блоків типу поліуретанів ППУ-3Ф. Встановлено залежності між фізико-механічними параметрами та щільністю матеріалу при випробуваннях на стиск і крутіння.

1. *Карпетян О. О., Гнубкин В. П., Дронов Ю. В.* Контроль качества конструкций с заполнителем из пенопласта. – Л.: Стройиздат, 1995. – 199 с.
2. *Горлов Ю. П.* Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
3. *Тараканов О. Г., Шамов И. В., Альперн В. Д.* Наполненные пенопласты. – М.: Химия, 1989. – 216 с.
4. *Гнубкин В. П., Карпетян О. О.* Особенности поведения вспененных полимерных материалов при механических испытаниях // Тез. докл. Всесоюз. конф. “Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии”. – Белгород, 1991. – Т. 3. – С. 125 – 126.
5. *Методы физико-механических испытаний пенопластов: Сб. трудов.* – М.: НИИТЭХИМ, 1976. – 80 с.
6. *Руководство по физико-механическим испытаниям строительных пенопластов.* – М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1973. – 86 с.
7. *Крюков И. И., Карпетян О. О., Гнубкин В. П.* Диагностика прочностных свойств пенопластов по двум ультразвуковым параметрам // Механика композитных материалов. – 1993. – № 2. – С. 274 – 281.

Поступила 11. 05. 99