

УДК 541.64:546.18

ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НА АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

© 1996 г. Н. А. Бордюк, Б. С. Колупаев, В. В. Левчук, В. Г. Касаткин

Ровенский педагогический институт
266000 Ровно, ул. Остафова, 31
Поступила в редакцию 12.06.95 г.

Приведены результаты исследований влияния высокодисперсного фосфогипса как наполнителя ПВХ на изменение скорости распространения продольных и сдвиговых ультразвуковых волн, коэффициентов их поглощения в ПВХ-композициях. Измерения выполняли в широком диапазоне температур. Для объяснения акустических свойств ПВХ-систем использовали кластерную модель, а также метод самосогласованного поля. Комплексное исследование объемных, теплофизических и акустических свойств гетерогенных систем позволило определить частотный диапазон перехода от адиабатной к изотермической волне. Теоретические оценки поглощения ультразвуковых волн (с учетом потерь на рассеяние) проведены в рамках модели изотропных диэлектриков. По температурной и концентрационной зависимостям акустических свойств исследованных систем оценена динамическая вязкость, время релаксации и длина сегмента как характеристики композиций. Полученные результаты могут использоваться при расчете акустических параметров гетерогенных сред, в частности демпферов – излучателей ультразвуковых дефектоскопов.

Важную информацию о структуре и свойствах твердых гетерогенных сред на основе аморфных полимеров дают динамические методы исследования [1–3]. С учетом того, что в аморфных полимерах изучение структурных образований прямыми методами затруднено, использовали циклическое деформирование системы в области ультразвуковых частот (0.4 МГц), при которых проявляется сопротивление как быстро, так и достаточно медленно релаксирующих элементов структуры [4–8]. В наполненных высокодисперсным наполнителем аморфных полимерных системах распределение структурных элементов в пространстве носит случайный характер, что влечет случайность полей напряжений и деформаций. В связи с этим представляет известный интерес определение макроскопических постоянных по соответствующим микроскопическим характеристикам композиций, подвергнутым воздействию механических и тепловых полей. В качестве таких композиций исследован ПВХ, содержащий различные концентрации высокодисперсного фосфогипса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовали ПВХ с $M = 1.4 \times 10^5$ и константой Фикентчера 65, полученный сuspензионной полимеризацией и очищенный переосаждением из раствора, а также композиции на его основе, содержащие в качестве наполнителей фосфогипс промышленного производства [6].

Образцы ПВХ-композиций готовили методом механического смешения, с последующим прессованием в $T-p$ режиме при давлении 10^7 Па и температуре 403 К [7]. Концентрационную и температурную зависимость плотности ρ , удельной теплоемкости C_p и теплопроводности λ определяли согласно работам [8, 9]. Акустические свойства композиций исследовали на частоте 0.4 МГц импульсным методом с проходящим сигналом совместно с методом вращающейся пластины при продольной и сдвиговой деформации ($v_l, \alpha_l, v_t, \alpha_t$) в широкой области температур [10]. Относительная погрешность измерения $\rho, C_p, \lambda, v_l, v_t, \alpha_l, \alpha_t$ составляет 0.03, 1.0, 5.0, 0.5, 1.0, 2.0 и 6.0% соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование вязкоупругих свойств исходного и наполненного ПВХ показало, что в области стеклообразного состояния уже при содержании наполнителя ϕ порядка 0.1–1.0 об. % наблюдается изменение скорости продольной волны v_l по сравнению с исходным полимером (рис. 1). Так, в области концентраций наполнителя 0.5–1.0 об. % значение v_l максимально, а при $\phi = 3$ –10 об. % v_l изменяется незначительно. При $\phi \geq 15$ об. % наблюдается рост скорости продольной волны. Несколько иной характер имеет зависимость v_t от ϕ . Так, в области концентраций наполнителя 0–3 об. % величина v_t немонотонно возрастает, а при $\phi = 5$ об. % – уменьшается. При дальнейшем повышении содержания наполнителя ($\phi \geq 6$ об. %) на-

блюдается тенденция к монотонному возрастанию v_l . Такая зависимость v_l и v_t от ϕ указывает на наличие структурных изменений в системе внутри- и межмолекулярных взаимодействий. В результате введения небольших количеств наполнителя (до 5 об. %) меняется жесткость структурных элементов и снижается их подвижность. При этом за счет наличия граничных слоев, которые образуются вследствие взаимодействия полимера с поверхностью наполнителя, происходит изменение плотности упаковки и упорядоченности расположения элементов структуры [11].

Характерно, что макромолекулы ПВХ, содержащие полярные группы хлора, обладают донорными свойствами, а ионы Ca, P, F, Si, входящие в химический состав фосфогипса – акцепторными свойствами, и между ними возможно образование прочных координационных связей по типу донорно-акцепторного взаимодействия. Ионы металлов, обладая акцепторными свойствами, могут принять неподеленные пары электронов атома Cl и образовать устойчивую связь [12]. В предположении, что акцепторные центры достаточно плотно расположены на поверхности фосфогипса, так что электрон донорного центра переходит в ближайший акцепторный центр, расположенный напротив донорного, из условия минимума свободной энергии по отношению к числу прореагировавших донорно-акцепторных пар $(\partial F/\partial n)_T = 0$ имеем

$$\frac{n}{N_D - n} = \exp\left(\frac{W_0(d_1, d_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) - eV(n)}{kT}\right), \quad (1)$$

где

$$V(n) = 4\pi en\left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}\right)$$

Если сделать следующие предположения относительно параметров [13] $W_0(d_1, d_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) = 0.5\text{--}1.0$ эВ; $d_1 + d_2 = 6\text{--}10$ Å; $N_D = 10^{17}\text{--}10^{18}$ м⁻²; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 3\text{--}7$, то $n = 10^{11}\text{--}10^{13}$, что может обеспечить силы адгезии на границе раздела фаз ПВХ–фосфогипс порядка 10⁶ Па. При увеличении концентрации наполнителя 15 об. % наблюдается возрастание v_l и v_t , вследствие дальнейшего усиления взаимодействия ПВХ с поверхностью наполнителя.

С учетом того, что частицы фосфогипса равномерно распределены по объему основной среды, а их размеры существенно меньше длины УЗ-волны, определим эффективные значения плотности, модулей упругости и акустического сопротивления ПВХ-композиций. На рис. 2 представлены концентрационные и температурные зависимости расчетных значений ρ_T , полученные согласно соотношению

$$\rho_T = \rho_1 + \phi(\rho_2 - \rho_1), \quad (2)$$

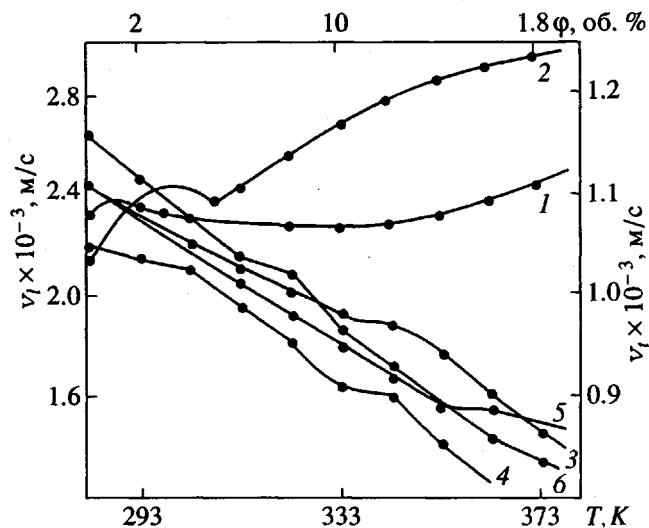


Рис. 1. Концентрационная при 293 К (1, 2) и температурная (3–6) зависимости v_l (1, 3, 5) и v_t (2, 4, 6) для композиций ПВХ + фосфогипс (1, 2), чистого ПВХ (3, 4) и ПВХ + 3 об. % фосфогипса (5, 6).

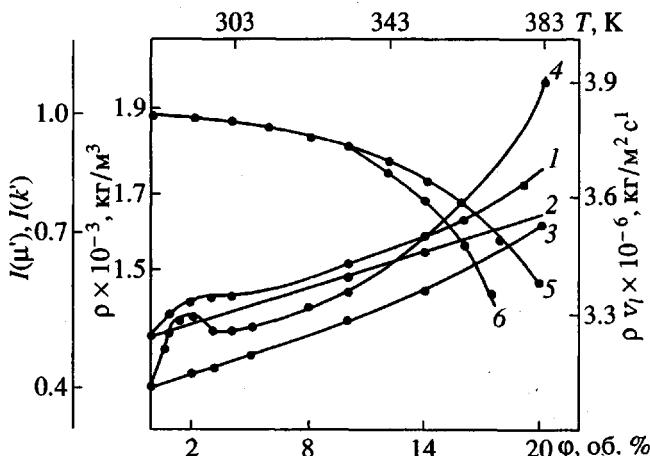


Рис. 2. Концентрационная при 293 К (1–4) и температурная (5, 6) зависимости ρ (1, 2), ρv_l (3, 4) для систем ПВХ + фосфогипс. Представлены также функции $I(\mu')$ (5) и $I(k')$ (6) для системы ПВХ + 3 об. % фосфогипса. Кривые 2 и 4 отвечают результатам теоретических расчетов.

где ρ_1, ρ_2 – соответственно плотность ПВХ и фосфогипса. Полученные результаты показывают, что в области рассмотренных концентраций фосфогипса имеет место уплотнение ПВХ-композиций, обусловленное более плотной упаковкой структурных элементов макромолекул под ориентирующим действием поверхности высокодисперсной добавки.

На основании измеренных значений v_l , v_t и плотности ρ рассчитываем эффективный модуль

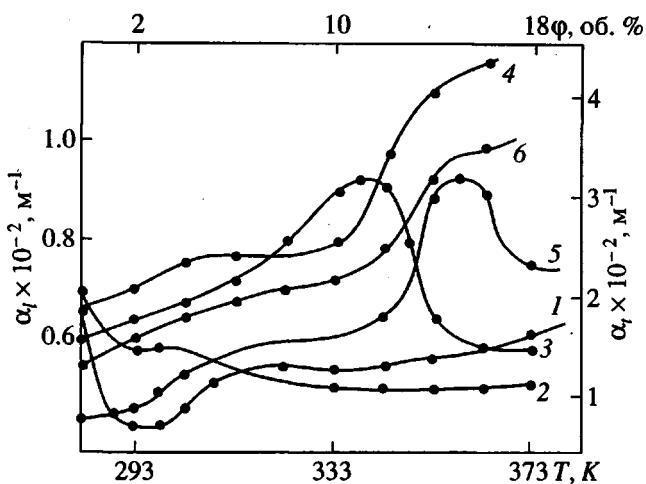


Рис. 3. Концентрационная при 293 К (1, 2) и температурная (3–6) зависимости α_l (1, 3, 5) и α_t (2, 4, 6) для композиций ПВХ + фосфогипс (1, 2), чистого ПВХ (3, 4) и ПВХ + 3 об. % фосфогипса (5, 6).

упругости $E_{\text{зф}}$, соответствующий различным концентрациям фосфогипса

$$\lambda + 2\mu = \rho v_l^2 = E_{\text{зф}} \quad (3)$$

Представляет интерес сопоставить значения $E_{\text{зф}}$ с рассчитанными теоретически E_t . Согласно методу самосогласованного поля [14] имеем

$$E_t = \lambda_t + 2\mu_t = \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{1 - \varphi A}, \quad (4)$$

где

$$A = \frac{\lambda_2 + \frac{2}{3}\mu_2 - \lambda_1 - \frac{2}{3}\mu_1}{\frac{4}{3}\mu_1 + \lambda_2 + \frac{2}{3}\mu_2} + \frac{20(\mu_2 - \mu_1)}{2\mu_1(3\lambda_1 + 8\mu_1) + (9\lambda_1 + 14\mu_1)},$$

$\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2$ – упругие постоянные Лямэ ПВХ и фосфогипса соответственно. Соотношение (4) можно привести к виду

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E - E_t}{E} = \varphi A \quad (5)$$

Как показывают результаты изменения эффективного упругого модуля для систем с $\varphi \leq 6$ об. % теоретические значения A и экспериментальная величина составляют соответственно 1.18 и 1.20. Следует заметить, что при $6 \leq \varphi \leq 20$ об. % наблюдается возрастание расхождения между этими значениями, поскольку относительный объем, занятый частицами наполнителя, здесь уже не

может считаться малым, и применение использованной теории неправомерно.

Представляло известный интерес [15] определить акустическое сопротивление ПВХ-композиций как поглотителя при конструировании демпферов для пьезоэлектрических излучателей УЗ-дефектоскопов. На основании формул (2), (4) имеем

$$\rho v_l = \frac{\rho_1 v_1}{(1 - \varphi[1 - \rho_1/\rho_2(1 - A)])^{1/2}} \quad (6)$$

На рис. 2 приведено сопоставление экспериментальных и расчетных значений акустического сопротивления.

Как показали исследования вязкоупругих свойств ПВХ-композиций в широкой области температур (рис. 1), с повышением температуры величина v_l уменьшается. Наиболее существенные изменения наблюдаются в области стеклования. При этом ширина переходной области для исходного ПВХ составляет ~ 15 К, а для системы ПВХ + 3 об. % фосфогипса ~ 10 К. На температурной зависимости v_l можно выделить две переходные области. Так, для исходного ПВХ изменения характера зависимости v_l от T наблюдаются в области 293–303 и 343–353 К, а для системы ПВХ + 3 об. % фосфогипса соответственно 313–323 и 355–365 К. Такой характер зависимости $v_l(T)$ можно объяснить, исходя из представлений о релаксационных β - и α -переходах. Изменения v_l для ПВХ и ПВХ-систем в области 293–323 К связаны с увеличением интенсивности колебательного движения полярных боковых групп ПВХ и участием в этом процессе некоторых фрагментов основной цепи [16]. Изменения характера зависимостей v_l и v_t в области 343–365 К представляется возможным объяснить, исходя из результатов, полученных на основании кластерной модели [17–19]. Можно полагать, что наблюдаемые зависимости обусловлены размораживанием сегментальной подвижности макромолекул, находящихся в конформации статистического клубка, т. е. в неупорядоченных областях. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению интенсивности сегментального движения не только на границе раздела областей беспорядок–локальный порядок, но и в областях локального порядка, играющих роль физической сетки макромолекулярных зацеплений. Рост температуры стеклования для наполненного ПВХ вызвано увеличением концентрации областей локального порядка вследствие взаимодействия макромолекул полимера с наполнителем, особенно в гравийных шарах.

Сделанные выводы находят свое подтверждение при исследовании и рассмотрении концентрационной и температурной зависимости α_l и α_t (рис. 3) ПВХ-композиций. Так, в области концен-

таций наполнителя 0–3 об. % наблюдается уменьшение α_l , а в области $\phi = 6–15$ об. % величина коэффициента поглощения изменяется мало и лишь при $\phi \geq 18$ об. % имеет место ее рост. Следует особо отметить, что во всем рассматриваемом диапазоне концентраций наполнителя $0 \leq \phi \leq 20$ об. % величина α_l композиций меньше α_l исходного ПВХ. Такое же соотношение характерно для α_t . Наиболее интенсивные изменения величины α_t наблюдаются в области концентраций наполнителя 0–3 об. %.

С учетом того, что измеряемая на опыте величина α_l слагается из потерь на рассеяние от границ частиц фосфогипса (α_l^*) и собственных диссипативных потерь в самом ПВХ и вблизи границ с наполнителем, проведем теоретический расчет потерь на рассеяние для ПВХ-композиций в рэлеевском приближении, считая $k\bar{D}$ и $q\bar{D}$ равными единице (k, q – волновые числа соответственно продольных и сдвиговых волн, \bar{D} – диаметр частицы фосфогипса). В таком приближении в случае падающей продольной волны имеем [14]

$$\alpha_l^* = \frac{\pi^4}{3} q_l \frac{f^4}{v_l^4} \bar{D}^3 \phi, \quad (7)$$

где $q_l = 18.4$, f – частота. Расчет по формуле (7) значений α_l^* показывает, что потери в системе ПВХ + фосфогипс при $\phi \leq 20$ об. % не играют определяющей роли. Доминирующее значение в процессе диссипации энергии принадлежит полимерному связующему.

Анализ температурной зависимости α_l , α_t ПВХ-композиций показывает, что максимум диссипативных потерь энергии элементами структуры ПВХ-композиций наблюдается в области температурного α -перехода.

Для подтверждения локального замедления релаксационных процессов в наполненных системах по сравнению с исходным ПВХ, определяли время релаксации τ , используя схему Максвелла для деформаций сдвига. Согласно ей [10],

$$\tau = \frac{\omega^2 - \alpha_l^2 v_l^2}{2 v_l \alpha_l \omega^2} \quad (8)$$

Как следует из результатов расчетов, значение τ максимально для композиции, содержащей 1–2 об. % фосфогипса. В области концентраций наполнителя $\phi \geq 10$ об. % наблюдается рост τ , что, по-видимому, связано с упрочнением поперечных связей не только из-за межмолекулярного взаимодействия структурных элементов макромолекул ПВХ, но и их взаимодействия с поверхностью наполнителя. Анализ температурной зависимости τ для исходного ПВХ и ПВХ + 3 об. % фосфогипса показывает, что во всем рассматриваемом

диапазоне температур время релаксации уменьшается.

При этом необходимо определить значение граничной частоты ω_{rp} , при которой в ПВХ-композициях происходит переход от адиабатной к изотермической волне. Согласно работе [2], имеем

$$\omega_{rp} = \frac{\rho \bar{v}^2 C_v}{\kappa}, \quad (9)$$

где \bar{v} – средневзвешенное значение скорости распространения ультразвуковой волны, C_v – удельная теплоемкость, κ – теплопроводность, ρ – плотность среды. Результаты расчетов показывают, что как для исходного ПВХ, так и композиций частота перехода от адиабатного распространения ультразвука к изотермическому лежит в области гиперзвукка. Сравнение величины ω_{rp} с ограничивающими частотами Дебая для данных систем [20] и результатами эксперимента по ИК-спектроскопии [21] показывает, что они соизмеримы.

Поскольку в продольной волне деформация представляет собой комбинацию изотропного сжатия и сдвига, а в поперечной состоит только из чистого сдвига, оценим величину поглощения энергии, обусловленную вязкостью и теплопроводностью. Согласно термодинамическому подходу [22], получаем, что

$$\alpha_l = \frac{\omega^2}{2\rho v_l^3} \left[\left(\frac{4}{3} \eta + \eta' \right) + \kappa \frac{C_p - C_v}{C_p C_v} \right], \quad (10)$$

где величина $\alpha_{tp} = \frac{\omega^2 \kappa (C_p - C_v)}{2\rho v_l^3 C_p C_v}$ – представляет собой вклад теплопроводности в процесс поглощения ультразвуковой волны.

Результаты эксперимента показывают, что α_{tp} зависит от температуры и от концентрации наполнителя. При увеличении температуры α_{tp} возрастает. Наиболее интенсивные изменения $(d\alpha_{tp}/dT)$ для ПВХ соответствуют интервалу 333–353 К, а для системы ПВХ + 3 об. % фосфогипса – диапазону 343–353 К. Следует, однако, отметить, что теплопроводность не вносит существенного вклада в поглощение звуковой волны в ПВХ-композициях.

Для определения сдвиговой вязкости η будем считать, что полная средняя энергия волны равна удвоенной средней кинетической энергии. Отнеся это значение к единице объема с учетом статистического распределения структуры системы, рассчитаем η как

$$\eta = \frac{\rho v_l^2 \tilde{\tau}}{6}, \quad (11)$$

а объемную вязкость определим, согласно работе [23], как

$$\eta' = \frac{1}{3} \rho \tau (\bar{v}_\infty - \bar{v}_0), \quad (12)$$

где \bar{v}_∞ – скорость звука при $\omega \rightarrow \infty$, \bar{v}_0 – скорость звука при частоте исследования. Согласно кинетической теории звука в твердых телах, $\bar{v}_\infty = 1.18 \bar{v}_0$.

Анализ рассчитанных величин η и η' показывает, что для ПВХ-композиций они соизмеримы ($\eta = \eta'$). При этом значительный рост сдвиговой и объемной вязкости наблюдается в области $\phi > 5$ об. %. Это указывает на увеличение объемной доли граничного слоя, наличие которого существенно влияет на характер движения структурных элементов ПВХ не только на границе раздела фаз полимер–наполнитель, но и на большом удалении от поверхности наполнителя. Расчеты показывают, что при введении 5 об. % фосфогипса в состояние граничного слоя переходит 43.5 об. % полимерной матрицы, а при $\phi = 20$ об. % соответственно 51.1 об. % ПВХ. По мере роста температуры η и η' имеют тенденцию к уменьшению с явно выраженным минимумом в области T_c . Однако следует заметить, что увеличение температуры более существенно влияет на изменение сдвиговой, нежели объемной вязкости. Так, в области T_c $d\eta/dT$ для исходного ПВХ составляет 1.0 Па с/К, для ПВХ + 3 об. % – 1.3 Па с/К, в то же время температурный коэффициент $d\eta'/dT$ равен соответственно 0.8 и 1.0 Па с/К.

По величинам η , η' , α_{tp} согласно соотношению (10), определяли значение α_t , а α_t вычисляли по формуле

$$\alpha_t = \frac{\eta \omega^2}{2 \rho v_t^3} \quad (13)$$

Оказалось, что теоретически найденные величины α_t , α_t несколько выше их экспериментальных значений, но они адекватно отражают качественный ход концентрационных зависимостей.

Учитывая практическую значимость исследования вязкоупругих свойств гетерогенных сред в зависимости от температуры и содержания наполнителя, а также то, что скорость звука в общем менее чувствительна к изменениям этих факторов, чем динамическая вязкость, определим ее величину для ПВХ-композиций согласно соотношению [10]

$$\eta'' = \frac{2\rho\alpha_t v_t^3 \omega^2}{(\omega^2 + \alpha_t^2 v_t^2)^2} \quad (14)$$

Наиболее существенные изменения динамической вязкости характерны для $\phi \geq 5$ об. %. При

этом температурная зависимость η'' носит немонотонный характер. Так, для исходного ПВХ наблюдаются наиболее существенные изменения η'' при $T_1 = 303$ К и $T_2 = 343$ К, для системы ПВХ + 3 об. % фосфогипса при 313 и 343 К. Это свидетельствует о том, что при частоте 0.4 МГц наибольший вклад в динамическую вязкость вносит релаксационный механизм с самым большим временем релаксации из всего спектра, для которого $\tau_i < \frac{1}{\omega}$. Как было показано ранее, $\tau_i = f(T, \phi)$.

Особый интерес представляет относительное положение максимумов потерь для объемного и сдвигового модулей в зависимости от температуры. Как показал эксперимент [6], макроскопическая деформация исходного ПВХ и его композиций с фосфогипсом в исследованной области концентраций связана с одним и тем же типом микроскопического движения структурных элементов макромолекул ПВХ. Полученные значения модулей показывают, что для наполненного ПВХ, как и для исходного полимера, величина мнимой части объемного модуля сравнима по величине с мнимой частью модуля сдвига. Кроме того, процесс диссипации энергии, связанный с объемной деформацией, имеет место во всей области рассмотренных содержаний фосфогипса в системе.

С целью более глубокого исследования механизма деформации систем ПВХ – фосфогипс было рассчитано распределение времен релаксации для сдвигового и объемного релаксационных процессов по формулам [24]

$$I(\mu') = \frac{\mu'}{\mu_\infty} = \int_0^\infty \frac{\omega^2 \tau^2 q(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad (15)$$

$$I(\mu'') = \frac{\mu''}{\mu_\infty} = \int_0^\infty \frac{\omega \tau q(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad (16)$$

$$I(k') = \frac{k' - k'_0}{k'_\infty - k'_0} = \int_0^\infty \frac{\omega^2 \tau^2 k(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad (17)$$

$$I(k'') = \frac{k'' - k''_0}{k''_\infty - k''_0} = \int_0^\infty \frac{\omega \tau k(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau, \quad (18)$$

где μ'_∞ и k'_∞ – соответствующие модули в стеклообразном состоянии, $q(\tau)$ и $k(\tau)$ – функции распределения времен релаксации при сдвиге и объемных деформациях.

Как видно из приведенных данных (рис. 2), полученные параметры для объемной и сдвиговой деформации близки между собой по величине для

наполненного ПВХ. Это указывает на то, что механизм объемной деформации композиций ПВХ близок с механизмом сдвиговой деформации, что связано с широким распределением времен релаксации.

Исходя из значений времени релаксации τ и динамической вязкости для рассмотренной области концентраций наполнителя, рассчитаем длину сегмента l согласно соотношению

$$l = \sqrt[3]{\frac{4kT\tau}{\pi\eta}}, \quad (19)$$

где k – постоянная Больцмана. Полученные расчеты показывают, что эффективное значение l составляет величину порядка 4–6 Å. Это равно 2–4 связям С–С вдоль цепи главных валентностей макромолекул. Это значение l удовлетворительно согласуется с результатами, полученными методами длинноволновой ИК-спектроскопии [25, 26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973.
2. Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука, 1964.
3. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Иностранная литература, 1963.
4. Перепечко И.И. Свойства полимеров при низких температурах. М.: Химия, 1977.
5. Григорьев С.Б., Михайлов И.Г., Хауптман Г. // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 3. С. 373.
6. Липатов Ю.С., Бордюк Н.А., Волошин О.М., Колупаев Б.С. // Пласт. массы. 1988. № 8. С. 30.
7. Колупаев Б.С., Демьянюк Б.П., Кит В.Я. // Высокомолек. соед. Б. 1978. Т. 20. № 2. С. 90.
8. Колупаев Б.С. Физикохимия полимеров. Практикум. Львов: Вища школа, 1978.
9. Колупаев Б.С., Бордюк Н.А., Липатов Ю.С. // Композиционные полимерные материалы. 1993. № 19. С. 3.
10. Колупаев Б.С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем. Львов: Вища школа, 1980.
11. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991.
12. Уэллс А. Структурная неорганическая химия. Т. 2. М.: Мир, 1987.
13. Смилга В.П. Исследование в области поверхности сил. М.: Наука, 1961.
14. Чабан И.А. // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 3. С. 351.
15. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.
16. Бартенев Г.М., Акопян Л.А., Зобина М.В., Синицына Г.М., Данилов А.В. // Высокомолек. соед. А. 1993. Т. 35. № 12. С. 1971.
17. Липатов Ю.С. Коллоидная химия полимеров. Киев: Наукова думка, 1984.
18. Аржаков С.А., Бакеев Н.Ф., Кабанов В.А. // Высокомолек. соед. А. 1973. Т. 15. № 5. С. 1154.
19. Белоусов В.Н., Козлов Г.В., Михитаев А.К., Липатов Ю.С. Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 3. С. 630.
20. Бордюк Н.А., Волошин О.М., Демьянюк Б.П., Липатов Ю.С., Колупаев Б.С. // Высокомолек. соед. А. 1990. Т. 32. № 6. С. 1232.
21. Пейтнер П., Коулмен М., Кениг Дж. Теория колебательной спектроскопии. Приложение к полимерным материалам. М.: Мир, 1986.
22. Ландау Л.Д., Либшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987.
23. Ландау Л.Д., Либшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
24. Физическая акустика / Под ред. Мэзона У. Т. 2. М.: Мир, 1969.
25. Берштейн В.А., Рыжков В.А. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 4. С. 890.
26. Рыжков В.А., Берштейн В.А. // Высокомолек. соед. А. 1989. Т. 31. № 3. С. 458.

The Effect of Phosphogypsum on the Acoustic Properties of PVC-Based Composites

N. A. Bordyuk, B. S. Kolupaev, V. V. Levchuk, and V. G. Kasatkin

*Pedagogical Institute
ul. Ostafova 31, Rovno, 266000 Ukraine*

Abstract—The effect of highly disperse phosphogypsum, which is used as a filler in PVC, on the velocity of longitudinal and shear ultrasonic waves and their absorption coefficients in PVC-based composites was studied in a wide temperature interval. The acoustic properties of PVC-based composites were explained using a cluster model and a self-consistent field approach. Complex investigation of the bulk, thermophysical, and acoustic properties of heterogeneous systems allowed the frequency region of transition from adiabatic to isothermal wave to be determined. The absorption of ultrasonic waves was theoretically estimated within the model of isotropic insulators. The temperature and concentration dependence of the acoustic properties of the systems studied were used to assess the dynamic viscosity, relaxation time, and segment length characterizing the PVC-based composites. The results can be employed for calculations of the acoustic parameters of heterogeneous media, in particular, dampers for emitters in ultrasonic flaw detectors.