

PACS numbers: 81.16.Dn, 82.30.Rs, 82.35.Rs, 82.45.Tv, 82.70.Uv, 83.50.-v, 83.80.-k

Влияние водных растворов электролитов на механические свойства гидрофильных материалов

В. Ю. Траскин, З. Н. Скворцова, А. В. Перцов, И. М. Охапкин,
Б. Ш. Кенжеев

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы,
119899 Москва, Россия*

Величина снижения прочности гидрофильных материалов (щелочно-галогидных кристаллов и полимеров) под влиянием растворов разного электролитического состава сопоставлялась со структурными и термодинамическими характеристиками водно-солевых систем, отражающими величину энергии взаимодействия этих солей с водой. Установлено, что, чем слабее ионы электролита связывают воду (чем больше коэффициент активности воды), тем сильнее проявляется эффект адсорбционного понижения прочности. Определяющим в реализации эффекта разупрочнения материала является подвижность молекул воды или интенсивность их трансляционного движения в непосредственной близости от гидратированных ионов.

Величина зниження міцності гідрофільних матеріалів (лужно-галогідних кристалів і полімерів) під впливом розчинів різного електролітичного складу порівнювалася зі структурними та термодинамічними характеристиками водно-солевих систем, які відображали величину енергії взаємодії цих солей з водою. Встановлено, що, чим слабше йони електроліту зв'язують воду (чим більше коефіцієнт активності води), тим сильніше проявляється ефект адсорбційного зниження міцності. Визначаючим у реалізації ефекту зменшення міцності матеріалу є рухомість молекул води або інтенсивність їх трансляційного руху в безпосередній близькості від гідратованих йонів.

The value of decrease in the strength of hydrophilic materials (alkaline-halide crystals and polymers) under the influence of solutions of different electrolytic composition is compared with the structural and thermodynamical characteristics of water-salt systems reflecting the energy of interaction between these salts and water. As revealed, the weaker ions of electrolyte bond water (the greater coefficient of water activity) the stronger effect of the adsorption decrease of the strength manifests itself.

The mobility of water molecules or the intensity of their translational movement in the immediate vicinity of hydrated ions is determining factor in the realization of the effect of material softening.

Ключевые слова: межфазная энергия, сольватные комплексы, подвижность ионов, гидрофильные материалы.

(Получено 21 сентября 2006 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Изменение механических свойств твердых тел в результате обратимого физико-химического взаимодействия с жидкой средой (эффект Ребиндера) — одна из главных проблем, изучаемых в современной физико-химической механике. Общее термодинамическое условие эффекта состоит в снижении межфазной энергии твердых тел на границе со средой, что приводит к облегчению образования новых поверхностей в процессах деформирования и разрушения. Снижение межфазной энергии обусловливается достаточной интенсивностью взаимодействия граничащих фаз [1, 2]. В то же время в системах, характеризующихся большой энергией взаимодействия разнородных молекул (например, галогениды натрия — вода в температурных областях существования кристаллогидратов), обратимое физико-химическое влияние среды на механические свойства твердых тел наблюдается обычно в очень малой степени или не наблюдается вовсе. По-видимому, во многих случаях это можно объяснить кинетическими затруднениями, связанными с недостаточной подвижностью молекул среды.

Немногочисленные работы, посвященные роли молекулярной подвижности воды в понижении прочности, проводились в основном на стеклах и полимерах и касались, как правило, ограничения подвижности молекул активной среды при их взаимодействии с твердым телом. Так, например, изучение зависимости прочности силикатных стекол от температуры во влажной среде показало, что в той области температур, где наблюдается резкое ограничение подвижности сорбированной воды (170–200 К), происходит резкий скачок прочности стекол [3]. Аналогичная корреляция между подвижностью сорбированной воды и прочностью наблюдалась и для гидратцеллюлозы [4]: прочность увлажненных нитей становится равной прочности обезвоженных образцов при температурах, когда значительно увеличивается относительное содержание связанной воды, определенное по спектру ЯМР. Обычно это связывается с затруднением распространения активной среды непосредственно вблизи разрываемых связей. Вместе с тем, значительное влияние на подвижность молекул воды может оказать также их связывание в жидкой фазе, например в результате образования сольватных комплексов.

Как известно, интенсивность взаимодействия молекул воды с различными ионами изменяется в весьма широких пределах. В соответствии с представлениями, развитыми в классических работах О. Я. Самойлова [5] и убедительно подтвержденными в дальнейшем (см., например, [6, 7]), «положительно гидратированные» ионы (Na^+ , Li^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , CO_3^{2-}) уменьшают подвижность молекул воды, в то время как в присутствии «отрицательно гидратированных» ионов (K^+ , Cs^+) наблюдается обратный эффект. Количественным критерием подвижности служит величина ΔE — изменение под действием ионов потенциального барьера, разделяющего соседние положения равновесия молекул воды в растворе.

Повышение активационного барьера самодиффузии влечет за собой изменение макроскопических свойств жидкости. В присутствии положительно гидратированных ионов уменьшается коэффициент самодиффузии воды и ее термодинамическая активность. Следует отметить, что основные положения рассмотренной концепции были сформулированы Самойловым для разбавленных растворов электролитов, в которых сохраняется, хотя и искаженная, структура воды. В концентрированных растворах электролитов эта теория не совсем применима, поскольку для них характерна, в смысле ближней упорядоченности, структура соответствующих кристаллогидратов. Однако те положения теории, которые касаются разделения ионов на положительно и отрицательно гидратируемые, остаются в силе и для концентрированных растворов [8].

В данной работе величина снижения прочности гидрофильных материалов различной природы (щелочно-галоидных кристаллов и полимеров) сопоставлялась со структурными и термодинамическими характеристиками водно-солевых систем, отражающими величину энергии взаимодействия этих солей с водой.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Щелочно-галоидные кристаллы

Влияние среды на прочность кристаллов щелочных галогенидов изучали на моно- и поликристаллических образцах.

В первом случае был использован метод маятниковой царапающей склерометрии, — один из методов локального разрушения, весьма часто применяемых при изучении влияния сред на прочность твердых тел. Этот метод обеспечивает непосредственную близость среды к зоне разрушения и сложнапряженные состояния с высокими концентрациями сдвиговых и растягивающих напряжений, что создает условия, благоприятствующие проявлению эффекта Ребиндера [9]. Маятниковый склерометр, специально сконструированный для данной работы, представляет собой маятник и соединенный с ним инден-

тор – твердосплавный брусок сечением 1×1 мм, заточенный в виде конуса с углом при вершине 90° . Индентор касается образца, укрепленного в ванночке со средой, и царапает образец при качании маятника. Объектами исследования служили монокристаллические образцы хлорида натрия размером $25 \times 6 \times 3$ мм, выколотые по спайности из больших монокристаллов. Царапание проводилось на плоскости (100) в направлении $\langle 100 \rangle$. При разных нагрузках (в диапазоне от 7,2 до 5,2 г) определялась сначала сила трения F , а на другом образце при той же массе груза определялась ширина царапины (d_{10}), полученной в результате принудительных колебаний маятника после 10 циклов колебаний. Склерометрическая прочность определялась как F/d_{10}^2 , где сила трения F рассчитывалась по времени затухания t по формуле $F = m(gH/2)^{1/2}/t$, (m — масса груза, подвешенного к маятнику, H — максимальная высота поднятия груза). В среднем проводилось 30 измерений силы трения и ширины царапины по всему диапазону нагрузок, при этом ошибка измерений не превышала 2%.

Поликристаллы щелочных галогенидов (NaCl, NaBr, KCl, KBr, KI) получали экструзией монокристаллов при температуре, равной $\sim 0,8T_{пл}$ соответствующей соли с последующим рекристаллизационным отжигом. Размер зерна приготовленных таким образом кристаллов составлял 200–300 мкм. Цилиндрические образцы диаметром $d = 1,5$ мм испытывались на изгиб по трехточечной схеме с постоянной скоростью нагружения 10^{-1} Н/с. Предельное разрывное напряжение рассчитывали по формуле $P_c = 8Fl/\pi d^3$, где F — разрывное усилие; l — длина рабочей части ($= 15$ мм). Определялась прочность на воздухе или в присутствии активной среды. В последнем случае раствор наносился в виде капли на поверхность образца непосредственно перед нагружением. Коэффициент вариации при испытаниях 20 образцов составлял $\approx 7\%$.

2.2. Гидрофильные полимеры на основе целлюлозы

В качестве объектов исследований использовался целлофан (неориентированная гидратцеллюлозная пленка промышленного производства — целлюлоза вискозная) толщиной 25 мкм, а также обеззолненные фильтры с содержанием целлюлозы более 99,9% толщиной 150 мкм. Испытывались стандартные образцы размерами 5×35 и 10×60 мм² соответственно. Образцы испытывали при комнатной температуре с постоянной скоростью растяжения на динамометрической установке 2038P-005 и на испытательной машине «Автограф-1S-10T» фирмы Шимадзу, а также с постоянной скоростью нагружения 1 Н/с на разрывной машине ДШ-3М1. В этих условиях на воздухе образцы, в соответствии с [10], разрушаются без заметной пластической деформации, прочность P_0 во всем диапазоне скоростей составляет для целлюлозы 13 МПа, для бумаги — 12 МПа. Коэффициент вариации при измерениях прочности бумаги и цел-

лофана, как на воздухе, так и в присутствии растворов, рассчитанный по результатам измерений 30 образцов, равен 4%.

При исследовании влияния жидких сред на прочность целлофана образцы предварительно выдерживались в воде или в растворе в течение 20 минут до достижения постоянного веса. В присутствии воды относительная прочность целлофана снижается до ~ 30% от P_0 , при этом сохраняется хрупкий характер разрушения. При испытаниях бумаги жидкость наносилась непосредственно перед нагружением на среднюю часть образца, разрушение всегда происходило по смоченной части. Прочность образцов в присутствии воды падала до 5–10% от P_0 , деформация увлажненных образцов не превышала 5%.

Для испытаний фильтровальной бумаги и целлофана на долговечность использовались образцы гантелеобразной формы с рабочей частью шириной 0,5 см и длиной около 4 см. Концы образцов (шириной 1 см) гидрофобизовались водостойким клеем и закреплялись в зажимах. Образцы испытывались в специально сконструированной камере, обеспечивающей постоянство температуры и влажности; градиент температуры в камере не превышал $0,5^\circ$. Эксперименты проводили в парах раствора, который использовался для смачивания образцов. Для этого перед герметизацией прибора в него помещалась чашка Петри с испытуемым раствором, время насыщения камеры парами раствора составляло 40 мин. За это время внутри прибора устанавливалась постоянная влажность, которая регистрировалась с помощью психрометра. Полученные значения влажности над различными растворами совпадали с табличными [11]. В случае воды стопроцентная влажность не достигалась, поэтому эксперименты с образцами бумаги в присутствии воды проводились не в условиях смачивания образцов, а при их погружении в среду. После установления необходимой температуры и равновесия пар–жидкость образцы нагружались, и одновременно на них помещалась капля раствора. Определялось время τ от нанесения раствора до разрушения образца (долговечность).

В качестве сред при различных методах испытаний использовались вода и водные растворы NaCl, NaBr, KCl, KBr, KI, LiCl, CsI, MgCl₂, CaCl₂, K₂CO₃ различных концентраций, а также растворы смешанного состава. При работе со щелочными галогенидами растворы смешанного состава всегда готовились на основе раствора, насыщенного по отношению к соответствующей соли. Для каждого раствора рассчитывался молярный коэффициент активности $y_{\text{mol}} = a_w/c_w$, где c_w — количество молей воды в одном литре раствора, а a_w — активность воды в той же шкале. Активность воды в смешанных растворах рассчитывалась по правилу Здановского [12].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений прочности на изгиб поликристаллов щелоч-

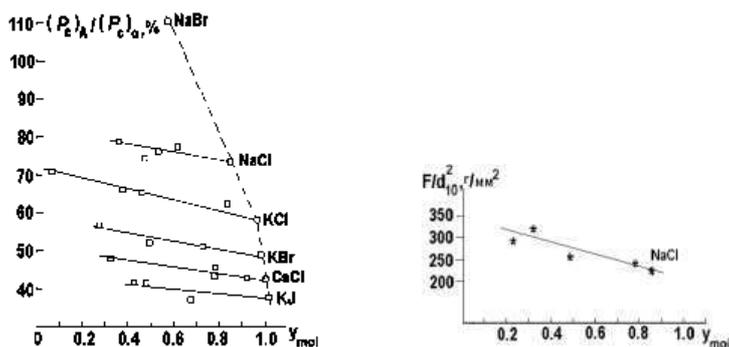


Рис. 1. Относительная прочность поликристаллов щелочных галогенидов при испытаниях на изгиб $(P_c)_A/(P_c)_0$ (а) и склерометрическая прочность монокристаллов NaCl (F/d_{10}^2) (б) в присутствии водных растворов различного состава в зависимости от коэффициента активности y_{mol} .

ных галогенидов и склерометрической прочности монокристалла NaCl в присутствии водных растворов различного состава в зависимости от величины y_{mol} представлены на рис. 1. Оказалось, что чем слабее ионы электролита связывают воду (чем больше коэффициент активности воды), тем сильнее проявляется эффект адсорбционного понижения прочности. Сплошные кривые описывают изменение прочности одной и той же соли в условиях различной подвижности воды в жидкой фазе. Пунктирная кривая показывает, что существует определенная корреляция между значениями прочности различных солей в контакте с их насыщенными водными растворами и коэффициентами активности воды в этих растворах.

Тот факт, что существует строгая корреляция между величиной эффекта и коэффициентом активности, а не активностью воды в растворе, указывает, по-видимому, на то, что важно не количество «свободных» молекул воды в растворе, а интенсивность их трансляционного движения в непосредственной близости от иона.

Большая чувствительность склерометрического метода позволила определить зависимость прочности от концентрации хлорида магния, введенного в раствор. Было обнаружено, что при определенных концентрациях $MgCl_2$ значение прочности имеет резко выраженные максимумы. При этом повышение склерометрической прочности соответствует перегибам на кривой измеренной нами концентрационной зависимости электросопротивления раствора. Изменение электросопротивления раствора является прямым следствием изменения интенсивности трансляционного движения ионов под действием электрического поля (т.е. частотой их активированных скачков из одного положения равновесия в соседнее).

На рисунке 2 представлены изменения склерометрической прочности монокристаллов NaCl и величины $\Delta R = R - R_{лин}$, наглядно

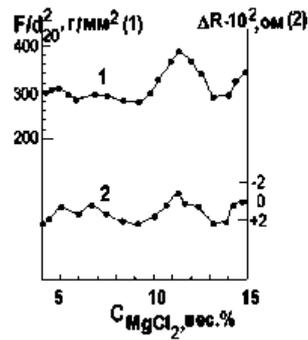


Рис. 2. Склерометрическая прочность монокристаллов NaCl в присутствии смешанных растворов NaCl–MgCl₂ (1) и величина ΔR этих растворов (2) в зависимости от концентрации хлорида магния.

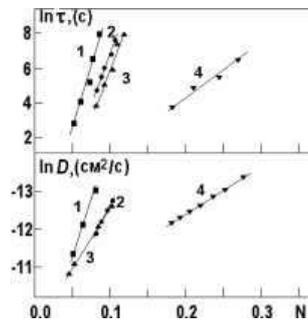


Рис. 3. Сопоставление зависимостей долговечности фильтровальной бумаги (τ) и коэффициента самодиффузии воды (D) (по данным [13]) от мольной доли электролитов в растворах MgCl₂ (1), CaCl₂ (2), K₂CO₃ (3), LiCl (4).

представляющей скачки на кривой электросопротивления (R — измеренные значения электросопротивления; $R_{\text{лин}}$ — значения, получающиеся в результате линейной аппроксимации зависимости $R(c)$). Таким образом, изменения склерометрической прочности кристаллов в контакте с водными растворами можно объяснить изменениями подвижности молекул воды в растворах, вызванными перестройками их структуры, с которой обычно связывают перегибы на кривой электросопротивления.

В более широком диапазоне электролитного состава и концентраций, начиная с чистой воды, можно проследить действие растворов при измерении прочности гидрофильных, но не растворимых в воде полимеров. Определяющая роль подвижности молекул воды в разупрочняющем действии растворов наглядно демонстрируется следующими результатами — изменение долговечности фильтровальной бумаги при изменении состава раствора коррели-

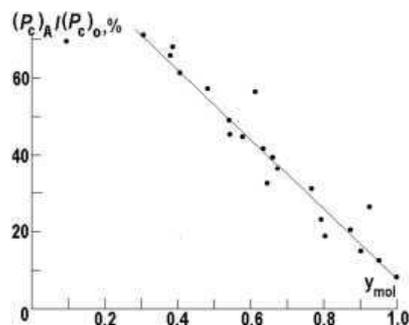


Рис. 4. Зависимость относительной прочности бумаги в присутствии водных растворов различного состава от коэффициента активности воды в соответствующих растворах.

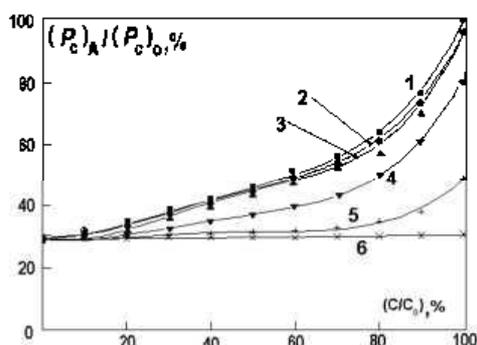


Рис. 5. Зависимость относительной прочности целлофана от концентрации растворов электролитов (C_0 — концентрация насыщенного раствора): $MgCl_2$ (1), $CaCl_2$ (2), K_2CO_3 (3), $LiCl$ (4), $NaCl$ (5), KCl (6).

рует с изменением коэффициента самодиффузии воды (рис. 2, 3) прочность бумаги на растяжение при широком варьировании электролитного состава определяется величиной коэффициента активности воды в растворе (рис. 4).

Испытания в присутствии водных растворов электролитов при постоянной скорости нагружения показали (рис. 5), что растворы солей с «отрицательно гидратированными» ионами (K^+ , Cs^+) во всем интервале исследованных концентраций (вплоть до насыщенных растворов солей) не изменяют степени действия воды на прочность полимера, в то время как достаточно концентрированные растворы солей с «положительно гидратированными» ионами (Na^+ , Li^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , CO_3^{2-}) в значительной степени снижают разупрочняющее действие воды.

Степень влияния растворов зависит от скорости деформирования: при малых скоростях образцы разрушаются, как в чистой во-

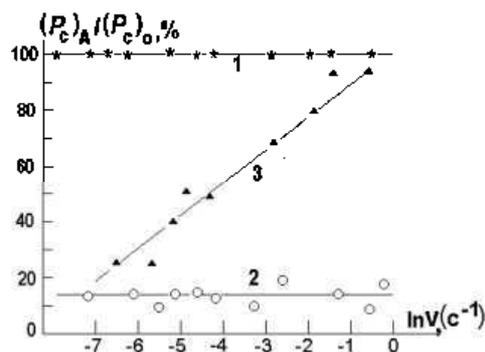


Рис. 6. Зависимости относительной прочности бумаги от скорости растяжения на воздухе (1), в воде (2) и в присутствии насыщенного водного раствора K_2CO_3 (3).

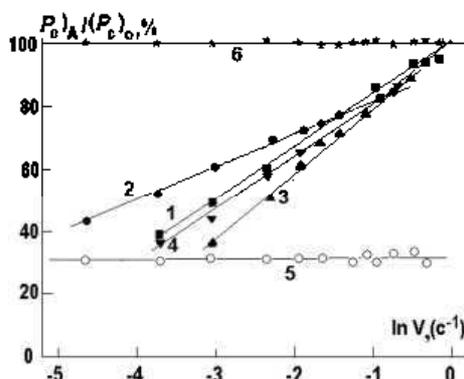


Рис. 7. Зависимости прочности целлофана от скорости растяжения в насыщенных растворах электролитов: $MgCl_2$ (1), $CaCl_2$ (2), K_2CO_3 (3), $LiCl$ (4), в воде (5) и на воздухе (6).

де; при увеличении скорости растяжения прочность в присутствии некоторых «положительно гидратированных» ионов достигает прочности воздушно-сухих образцов. Тот факт, что зависимость от скорости растяжения наблюдается лишь в присутствии растворенных солей, а в чистой воде и на воздухе прочность в исследованном диапазоне скоростей растяжения остается постоянной (рис. 6, 7), свидетельствует о кинетической природе влияния водных растворов электролитов.

Для количественного описания этого явления наиболее перспективным представляется подход, разработанный Журковым и основанный на кинетической концепции прочности. Долговечность материала τ (время жизни образца до разрушения) описывается формулой [14]:

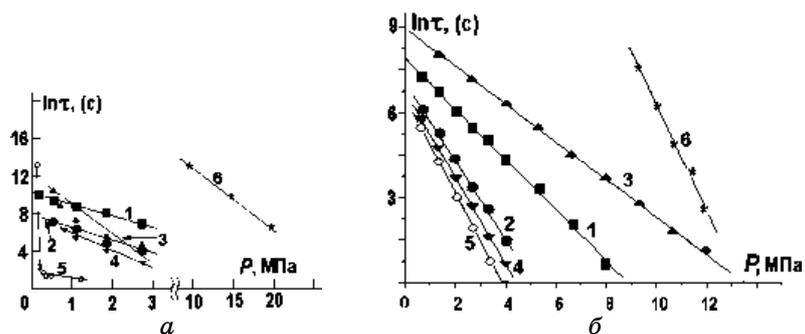


Рис. 8. Силовые зависимости долговечности бумаги (а) и целлофана (б) в насыщенных водных растворах электролитов: $MgCl_2$ (1), $CaCl_2$ (2), K_2CO_3 (3), $LiCl$ (4), в воде (5) и на воздухе (6).

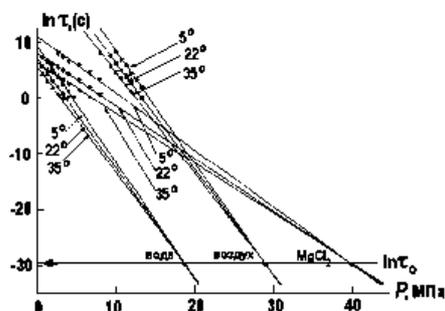


Рис. 9. Силовые зависимости долговечности целлофана в воде, на воздухе и в присутствии растворов $MgCl_2$ при температурах 5, 22 и 35°C.

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma P}{kT}\right), \quad (1)$$

где γ — структурно-чувствительный коэффициент; τ_0 — коэффициент, имеющий размерность времени и отражающий термофлуктуационную природу прочности; U_0 — энергия активации разрушения; P — приложенное напряжение; k — постоянная Больцмана; T — температура.

В режиме динамического нагружения в условиях хрупкого разрушения связь скорости растяжения (V) с прочностью P_c выражается соотношением, аналогичным приведенному в работе [10]:

$$P_c = \frac{kT}{\gamma} \left(\ln \frac{\gamma V E \tau_0}{kT} + \frac{U_0}{kT} \right); \quad (2)$$

E — модуль упругости образцов, рассчитанный по исходным де-

ТАБЛИЦА. Параметры уравнения Журкова: активационный объем γ (см^3), эффективная энергия активации разрушения U_0 (кДж/моль) и ее изменение ΔU (кДж/моль) в присутствии электролитов, рассчитанные по измерениям долговечности (1) и в условиях активного нагружения (2).

Среда испытания		Растворы				H ₂ O	воздух
		MgCl ₂	K ₂ CO ₃	CaCl ₂	LiCl		
Параметры уравнения	уравнение	Целлофан					
$\gamma \cdot 10^{22}$	(1)	6,9	5,1	14,2	14,6	14,1	19,5
	(2)	4,3	3,5	6,9	4,8		
U_0	(1)					85,3	144,2
ΔU_0	(1)	22,5	10,4	14,6	5,4		
ΔU_0	(2)	13,3	6,7	10,0	3,7		
Параметры уравнения	уравнение	Бумага					
$\gamma \cdot 10^{22}$	(1)	3,5	6,7	4,2	5,6	2,9	2,4
	(2)	3,5	4,6	3,7	4,2		
U_0	(1)					83,6	133,8
ΔU_0	(1)	18,8	16,7	12,5	10,4		

формационным кривым. Следует отметить, что определенная для целлофана величина E существенно зависит от состава среды и изменяется от 1000 МПа при испытаниях на воздухе до 50 МПа в присутствии воды.

Действительно, экспериментально полученные зависимости прочности от скорости растяжения хорошо спрямляются в полулогарифмических координатах (рис. 6, 7). Рассчитанные по уравнению (2) величины структурно-чувствительного коэффициента γ и энергии активации U_0 представлены в таблице.

Зависимости долговечности бумаги и целлофана от приложенной нагрузки на воздухе, в присутствии воды и водных растворов электролитов также хорошо спрямляются в полулогарифмических координатах в соответствии с уравнением (1) (рис. 8). При испытаниях бумаги в присутствии воды в области напряжений 0,2 МПа наблюдается т.н. порог прочности (подобно тому, что наблюдалось в [15] для поликристаллов цинка, смоченных ртутью). В этом случае расчеты проводились только для напряжений выше 0,2 МПа. Температурные зависимости долговечности образцов позволяют оценить значение τ_0 дважды: из зависимостей $\tau(1/T)$ и $\tau(\ln P)$. На рисунке 9 в качестве примера приведены данные, полученные для образцов целлофана: сухих, смоченных водой и раствором MgCl₂. Для разных сред величина τ_0 , определенная для целлофана, колеблется в интервале значений 10^{-13} – 10^{-12} с, что близко к интервалу $\tau_0 = 10^{-14}$ – 10^{-12} с, определен-

ному для полимеров [16]. Рассчитанные по уравнению (1) значения U_0 и γ представлены в табл. 1 (ошибка в определении обеих величин составляет $\pm 5\%$). Экспериментально найденное значение γ для испытаний бумаги на воздухе близко к имеющимся в литературе [10, 14]. Величина U_0 , соответствующая воздушно-сухим образцам, лежит в интервале значений $U_0 = 31-35$ ккал/моль для целлюлозы, не подвергшейся специальной осушке [10]. Энергия активации разрушения пропитанного водой целлофана (20,5 ккал/моль) близка к приводимым в литературе энергиям активации разрушения гидрофильных полимеров в присутствии воды (22–27 ккал/моль) [16].

В терминах кинетической теории прочности Журкова полученные результаты говорят о том, что среда может влиять как на величину энергии активации разрушения U_0 , так и на структурно-чувствительный коэффициент γ , отражающий изменение структуры материала при его взаимодействии со средой. Некоторые различия в значениях γ , рассчитанных из результатов испытаний при статическом и динамическом нагружении, могут быть связаны с различными временами контакта образцов с водными растворами при измерениях длительной и мгновенной прочности. Увеличение энергии активации разрушения в присутствии электролитов по порядку величины соответствует приводимому в работе Самойлова значению ΔE , характеризующему степень ближней гидратации ионов (изменению ионом потенциального барьера, разделяющего соседние положения равновесия молекул воды, сравнительно с величиной барьера для чистой воды). Согласно полученным значениям U_0 и ΔU_0 для целлофана и бумаги, соли выстраиваются в том же ряду, который приводится в работах [6, 13] по степени положительной гидратации ионов $Mg^{2+} > Ca^{2+} \approx CO_3^{2-} > Li^+$, определенной по изменению коэффициента самодиффузии в соответствующих растворах. Такая же последовательность соблюдается и при измерениях прочности на растяжение целлофана в присутствии насыщенных растворов электролитов.

Представленные результаты приводят к выводу о том, что влияние электролитного состава раствора на прочность гидрофильных материалов связано с изменением так называемых кинетических свойств растворов, определяемых подвижностью воды вблизи гидратированных ионов.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. П. А. Ребиндер, Е. Д. Щукин, *Коллоидн. журн.*, **20**, № 5: 645 (1958).
2. В. Ю. Траскин, З. Н. Скворцова, Н. В. Перцов, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер, *ДАН СССР*, **191**: 876 (1970).
3. Ф. Ф. Витман, В. А. Берштейн, В. И. Пух, *Прочность стекла* (Москва: Мир: 1969), с. 7.

4. В. А. Берштейн, *Проблемы прочности и пластичности твердых тел* (Ленинград: Наука: 1979).
5. О. Я. Самойлов, *Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов* (Москва: Изд-во АН СССР: 1957).
6. K. J. Muller and H. G. Hertz, *J. Phys. Chem.*, **100**: 1256 (1996).
7. С. А. Засыпкин, М. Н. Родникова, Г. Г. Маленков, *ЖСХ*, **34**, № 2: 96 (1993).
8. М. К. Хрипун, Л. С. Лилич, А. Ю. Ефимов, С. А. Булгаков, *Проблемы современной химии координационных соединений*, **7**: 58 (1983).
9. N. V. Pertsov, *Surface Effects in Crystal Plasticity* (Eds. R. M. Latanision and J. F. Fourie) (Noedhoff-Leyden: 1977).
10. В. А. Берштейн, *Механо-гидролитические процессы и прочность твердых тел*. (Ленинград: Наука: 1987).
11. *Handbook of Chemistry and Physics* (Eds D. Charles and M. S. Hodgman) (Cleveland, Ohio: Chemical Rubber Publishing Co.: 1956).
12. А. Б. Здановский, *Закономерности в изменениях свойств смешанных растворов* (Москва–Ленинград: Труды ВНИИ галургии: 1936), **6**.
13. V. Mills and V. M. M. Lobo, *Self-Diffusion in Electrolite Solutions* (Elsevier: 1988).
14. В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский, *Кинетическая природа прочности твердых тел* (Москва: Наука: 1974).
15. Н. И. Иванова, *Влияние металлических адсорбционно-активных расплавов на длительную прочность материалов* (Диссертация ... канд. хим. наук) (Москва: МГУ: 1969).
16. В. Е. Гуль, *Структура и прочность полимеров* (Москва: Химия: 1971).