

Влияние термоокислительного старения на структуру и свойства полисульфона и прогнозирование его срока эксплуатации

The effect of thermo-oxidative aging on the structure and properties of polysulfone and prediction of its service life

О.Е. ПЕКСИМОВ, Т.И. АНДРЕЕВА, В.А. БАЛАБАНОВА, С.И. КАЗАКОВ, И.Л. ДИНЗБУРГ, Н.Н. МОЛОТКОВА

O.E. PEKSIMOV, T.I. ANDREEVA, V.A. BALABANOVA, S.I. KAZAKOV, I.L. DINZBURG, N.N. MOLOTKOVA

Акционерное общество «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова» (АО «Институт пластмасс»), Москва, Россия
 Joint-Stock Company "Institute of Plastics named after G.S. Petrov", Moscow, Russia
 dir@instplast.ru

В работе проведены исследования влияния термоокислительного старения на структуру и свойства полисульфонов ПСФ-190 (АО «Институт пластмасс», Россия) и Udel P1700 (Solvay Speciality Polymers, Бельгия). Спрогнозированы сроки хранения выбранных марок полисульфонов. Показана разница в протекании процесса низкотемпературного термоокислительного старения для ПСФ-190 и Udel P1700. Установлено, что основные изменения таких характеристик, как плотность, предел текучести при растяжении, относительное удлинение при разрыве образца наблюдаются в течение первых 250 часов термоокислительного старения. Величина удельного объемного электрического сопротивления полисульфонов не изменяется при воздействии температур и времени в условиях низкотемпературного термоокислительного старения.

Ключевые слова: полисульфон, термоокислительное старение, энергия активации

The effect of thermal oxidative aging on the structure and properties of polysulfones PSF-190 (Institute of Plastics JSC, Russia) and Udel P1700 (Solvay Specialty Polymers, Belgium) has been studied. The shelf life of the selected grades of polysulfones has been predicted. The difference in the course of the low-temperature thermo-oxidative aging process for PSF-190 and Udel P1700 is shown. It was found that the main changes in such characteristics as density, tensile yield stress, elongation at break occur during the first 250 hours of thermo-oxidative aging. The value of the specific volume electrical resistance of polysulfones does not change under the influence of temperature and time under conditions of low-temperature thermo-oxidative aging.

Keywords: polysulfone, thermal-oxidative aging, activation energy

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-11-12-7-11

Как известно, старение полимерных материалов – это необратимое изменение свойств, которое происходит с течением времени и представляет собой совокупность разнообразных процессов – химических и физических превращений, происходящих при их переработке, хранении и эксплуатации. Сложность проблемы старения заключается не только в различии механизмов процессов, например, сшивание–деструкция, но и в зависимости их интенсивности от сочетания различных факторов. Наиболее распространенным и практически важным активатором, способствующим старению полимерных материалов, является температура [1, 2].

Крайне важным является количественное прогнозирование эксплуатационной стойкости полимерных материалов. Если время эксплуатационной работоспособности полимерного материала будет занижено, то полимер будет изъят из эксплуатации раньше, чем будет исчерпан его ресурс – это экономически невыгодно. Если же сроки эксплуатации будут завышены, то полимерное изделие выйдет из строя во время эксплуатации, что может привести к серьезным последствиям и финансовым потерям.

Специалистами АО «Институт пластмасс» разработан технологический процесс синтеза полисульфона марки ПСФ-190, позволяющий ускорить и удешевить его производство. Главным отличием данного технологического процесса является проведение синтеза в растворе диметилацетамида и отсутствие стадии блокировки концевых гидроксильных групп [3].

Целью данной работы являлось изучение влияния низкотемпературного термоокислительного старения на физико-механические и электрические характеристики образцов полисульфона

ПСФ-190 (АО «Институт Пластмасс») и полисульфона марки Udel P1700 (Solvay Speciality Polymers), изучение структурных изменений, происходящих в полимерах в процессе термоокислительного старения, и прогнозирование срока их эксплуатации.

Выбранные марки полисульфона ПСФ-190 и Udel-P-1700 характеризуются близкими значениями молекулярных масс, приведенной вязкости, плотности. Исследуемые полисульфоны отличаются процентным содержанием концевых гидроксильных групп (таблица 1).

Таблица 1. Характеристики ПСФ-190 и Udel P1700.

Наименование показателя	ПСФ-190	Udel-P-1700
Плотность, г/см ³	1,233	1,230
Приведенная вязкость, дл/г	0,46	0,50
Средневесовая молекулярная масса, г/моль	60000	65000
Содержание концевых гидроксильных групп –ОН, %	0,055	0,007

Стандартные образцы для испытаний получали методом литья под давлением на термопластавтомате ARBURG Allrounder 320K/700-250. Перед переработкой полисульфоны высушивались в вакуумном сушильном шкафу при температуре 140°C до остаточной влажности 0,01%.

Были проведены ускоренные испытания в режиме термоокислительного старения согласно ГОСТ 9.707-81. Термоокислительное старение проводили при температурах 140, 150, 160 и 170°C на воздухе в электрошкафу сушильном фирмы «ТермИКС» (Россия) модели СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И5М с принудительной вентиляцией.

Выбранные температуры находятся в области стеклообразного состояния полимеров – ниже температуры стеклования. Длительность термоокислительного старения составляла 6000 часов. Промежуточные съемы проводились при временах термоокислительного старения: 1, 5, 20, 50, 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000 часов. Влияние термоокислительного старения изучали по изменению деформационно-прочностных показателей, определенных в режиме растяжения согласно ГОСТ 11262-2017 на универсальной испытательной машине Z020 фирмы Zwick/Roell (Германия), по изменению удельного объемного электрического сопротивления (ГОСТ 6433.2-71) с использованием тераомметра Е6-13А и по изменению плотности (ГОСТ 15139-69 – гидростатическим методом в среде этилового спирта). Исследование структуры образцов проводили методом Фурье-ИК-спектроскопии на приборе SpectrumOne фирмы PerkinElmer (США). Исследование релаксационного α -перехода полимеров проводили методом ДСК по ГОСТ 55135-2012 на приборе для определения термодинамических свойств веществ DSC 8500 фирмы PerkinElmer (США).

В процессе термоокислительного старения происходит изменение цвета образцов от светло-желтого до темно-коричневого, что связано с процессами окисления образцов. При этом с увеличением температуры термоокислительного старения интенсивность изменения цвета образцов возрастает (рис. 1).



Рис. 1. Изменение цвета образцов ПСФ-190 и Udel P1700 после термоокислительного старения: 1 – Udel P1700 исходный; 2 – Udel P1700 после термоокислительного старения при 170°C в течение 6000 ч; 3 – ПСФ-190 исходный; 4 – ПСФ-190 после термоокислительного старения при 170°C в течение 6000 ч.

Для оценки изменения свойств в процессе термоокислительного старения были выбраны показатели «предел текучести при растяжении» и «относительное удлинение при разрыве» как наиболее чувствительные к термоокислительному старению.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости предела текучести при растяжении от длительности термоокислительного старения при температурах 140°C, 150°C, 160°C и 170°C для ПСФ-190 и Udel P1700.

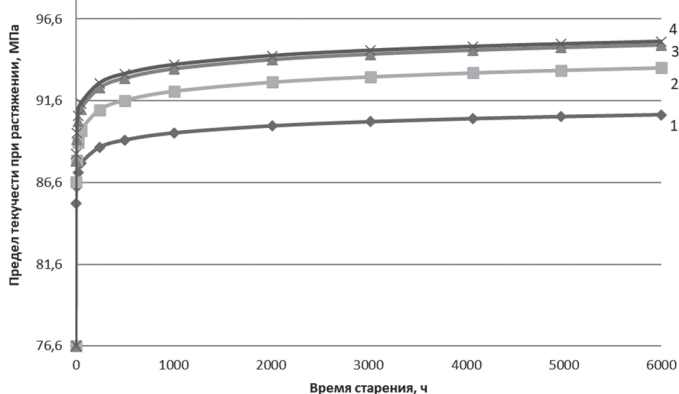


Рис. 2. Зависимость предела текучести при растяжении от длительности термоокислительного старения ПСФ-190 при температуре: 1 – 140°C; 2 – 150°C; 3 – 160°C; 4 – 170°C.

Как видно из представленных данных, для обоих полимеров в процессе термоокислительного старения при температурах 140,

150, 160 и 170°C происходит увеличение показателя «предел текучести при растяжении». В процессе термоокислительного старения вплоть до 6000 часов для ПСФ-190 и для Udel P1700 не наблюдается хрупкого разрушения, образцы имеют предел вынужденной эластичности. Для ПСФ-190 и Udel P1700 кривые зависимости предела текучести при растяжении от времени и температур старения характеризуются наличием двух участков с различной интенсивностью изменения показателя. В первые 250 часов старения происходит наиболее значительное изменение данного показателя, затем интенсивность изменения показателя снижается и практически вплоть до 6000 часов остается постоянной. Рост показателя «предел текучести при растяжении» обусловлен, по-видимому, повышением межмолекулярного взаимодействия в полимере при низкотемпературном термоокислительном старении [4, 5].

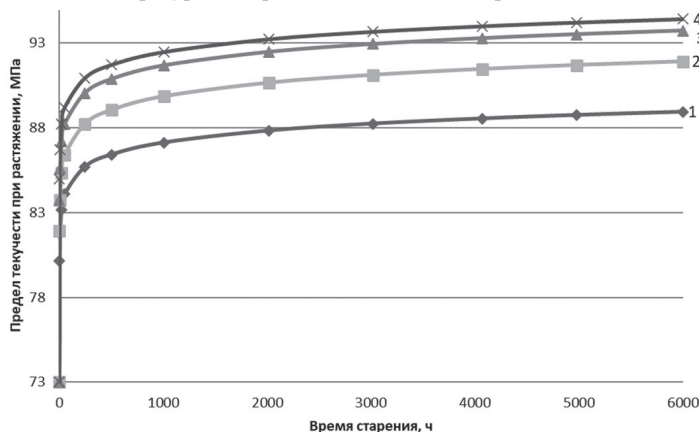


Рис. 3. Зависимость предела текучести при растяжении от длительности термоокислительного старения Udel P1700 при температуре: 1 – 140°C; 2 – 150°C; 3 – 160°C; 4 – 170°C.

Показатель «относительное удлинение при разрыве» в процессе термоокислительного старения для ПСФ-190 и Udel P1700 снижается, и на кинетической кривой можно выделить два временных диапазона старения с различной интенсивностью изменения показателя «относительное удлинение при разрыве». В первые 250 часов старения происходит наиболее интенсивное изменение данного показателя со 110% до 7–9% для ПСФ-190 и со 130% до 9–14% для Udel P1700. За последующие 5750 часов интенсивность изменения показателя «относительное удлинение при разрыве» незначительно снижается и практически остается без изменения.

Таблица 2. Изменение удельного объемного сопротивления ПСФ-190 в процессе термоокислительного старения.

ПСФ-190	Удельное объемное сопротивление, Ом·см		
	Температура, °C		
Время, ч	140	160	170
0	$3,9 \cdot 10^{16}$	$3,9 \cdot 10^{16}$	$3,9 \cdot 10^{16}$
250	$7,7 \cdot 10^{16}$	$5,5 \cdot 10^{16}$	$4,1 \cdot 10^{16}$
500	$4,5 \cdot 10^{16}$	$8,1 \cdot 10^{16}$	$8,4 \cdot 10^{16}$
1000	$4,1 \cdot 10^{16}$	$3,4 \cdot 10^{16}$	$6,1 \cdot 10^{16}$
2000	$5,6 \cdot 10^{16}$	$4,4 \cdot 10^{16}$	$2,7 \cdot 10^{16}$
3000	$4,5 \cdot 10^{16}$	$5,9 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{16}$
5000	$3,2 \cdot 10^{16}$	$9,0 \cdot 10^{16}$	$3,4 \cdot 10^{16}$

Таблица 3. Изменение удельного объемного сопротивления Udel P1700 в процессе термоокислительного старения.

Udel P1700	Удельное объемное сопротивление, Ом·см		
	Температура, °C		
Время, ч	140	160	170
0	$4,9 \cdot 10^{16}$	$4,9 \cdot 10^{16}$	$4,9 \cdot 10^{16}$
250	$5,8 \cdot 10^{16}$	$7,8 \cdot 10^{16}$	$9,9 \cdot 10^{16}$
500	$5,8 \cdot 10^{16}$	$8,6 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{17}$
1000	$4,4 \cdot 10^{16}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$5,2 \cdot 10^{16}$
2000	$4,2 \cdot 10^{16}$	$6,9 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{17}$
3000	$4,5 \cdot 10^{16}$	$7,9 \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^{16}$
5000	$2,4 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^{16}$	$4,7 \cdot 10^{16}$

Изменение показателя «удельное объемное сопротивление», характеризующее диэлектрические свойства исследуемых поли-

сульфонов в условиях термоокислительного старения, представлено в таблицах 2 и 3 для ПСФ-190 и Udel P1700 соответственно.

Представленные данные позволяют сделать вывод о том, что термоокислительное старение при выбранных временах выдержки и температурах не оказывает существенного влияния на величину удельного объемного сопротивления для данных полимеров.

Изучалось изменение плотности исследуемых материалов в процессе термоокислительного старения. Как показали исследования, под влиянием температуры и времени старения происходит увеличение плотности полисульфонов ПСФ-190 и Udel P1700 (таблица 4).

Таблица 4. Свойства ПСФ-190 и UdelP1700 исходных и после воздействия температуры 170°C и времени старения 250, 2000 и 6000 ч.

Образец	Плотность, г/см ³			
	Исходный	250 ч	2000 ч	6000 ч
ПСФ-190	1,233±0,001	1,244±0,001	1,244±0,001	1,245±0,001
Udel P1700	1,230±0,001	1,243±0,001	1,241±0,001	1,241±0,001

Заметное изменение плотности происходит в течение первых 250 часов, и дальнейшее увеличение времени выдержки при заданных температурах не оказывает воздействия на показатель. Рост плотности, по-видимому, связан с увеличением плотности упаковки макромолекул, что подтверждает предположение, высказанное авторами в ряде работ [6, 7], о том, что аморфная фаза полимеров характеризуется отсутствием устойчивого дальнего порядка, наличием флуктуаций плотности, которые могут иметь определённую упорядоченность и, при определенных условиях, служить в дальнейшем зародышами кристаллов.

С целью изучения изменения структуры ПСФ-190 и Udel P1700 под влиянием температуры и времени в условиях ускоренных климатических испытаний проводили исследование методом ИК-спектроскопии образцов полисульфонов исходных и после 2000 и 5000 часов термоокислительного старения при температуре 170°C. Температура была выбрана как температура, при которой наиболее существенно проявляются процессы структурирования и деструкции.

ИК-спектры исходных полисульфонов представлены на рис. 4 и 5.

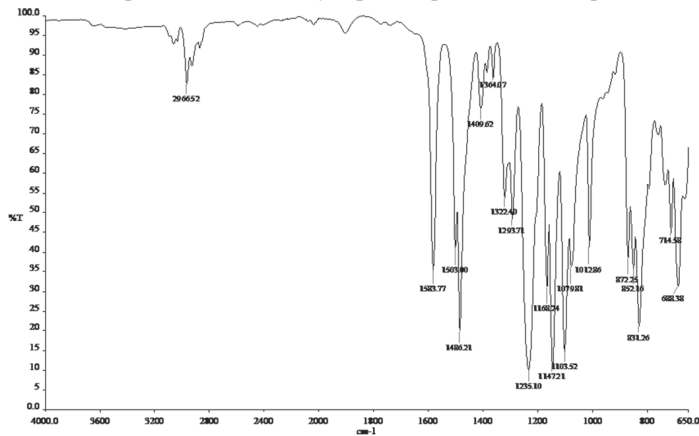


Рис. 4. ИК-спектр ПСФ-190.

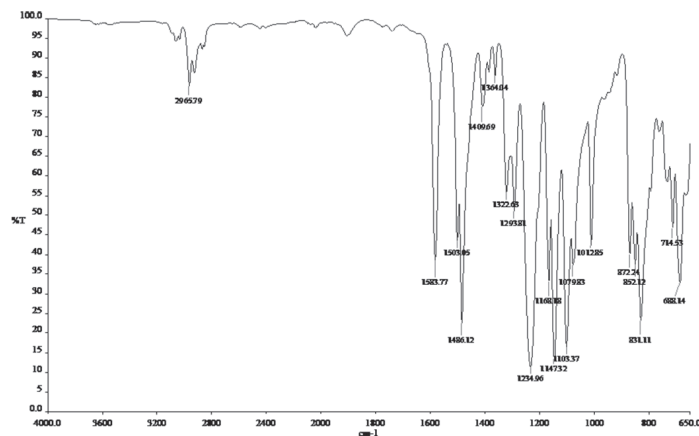


Рис. 5. ИК-спектр Udel P1700.

ИК спектры ПСФ-190 и Udel P1700 идентичны. Как известно [8], в ИК-спектрах полисульфонов 3300–2850 см⁻¹ – область коле-

баний углеродных связей –CH–CH₃; 1850–1400 см⁻¹ – область колебаний C=C и бензольных колец (два максимума); 1400–400 см⁻¹ – основная область, характерная для полисульфонов. Это область колебаний связей O=S=O, –SO₂ и C–O–C.

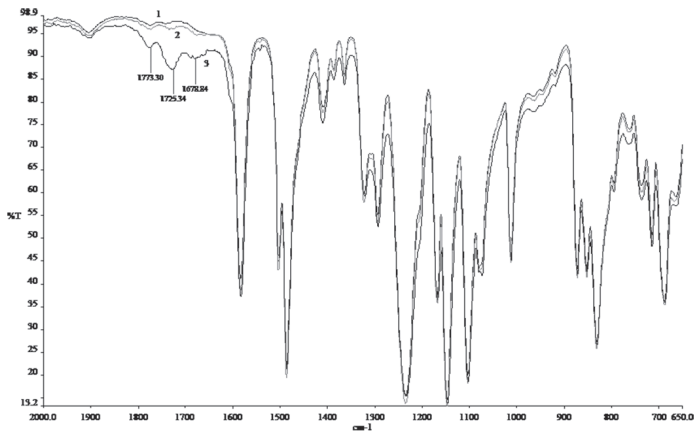


Рис. 6. ИК-спектр ПСФ-190, снятый с поверхности наружного слоя образца: 1 – исходный образец, 2 – образец после экспонирования при 170°C в течение 2000 час, 3 – образец после экспонирования при 170°C в течение 5000 час.

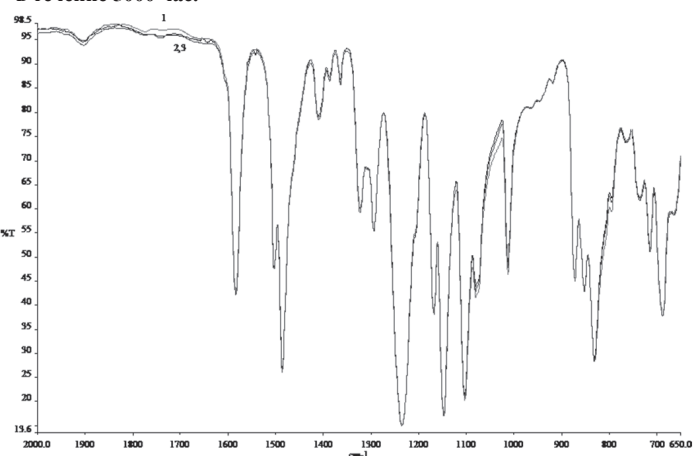


Рис. 7. ИК-спектр Udel P1700, снятый с поверхности наружного слоя образца: 1 – исходный образец, 2 – образец после экспонирования при 170°C в течение 2000 час, 3 – образец после экспонирования при 170°C в течение 5000 час.

В ИК-спектрах ПСФ-190 после 2000 и 5000 часов экспозиции, снятых с поверхности наружного слоя образца, появляются полосы поглощения валентных колебаний в диапазоне 1800–1700 см⁻¹ (рис. 6), которые не наблюдаются в таких же ИК-спектрах Udel P1700 (рис. 7). В ПСФ-190 идет процесс окисления поверхностного слоя образца с образованием карбонильных групп.

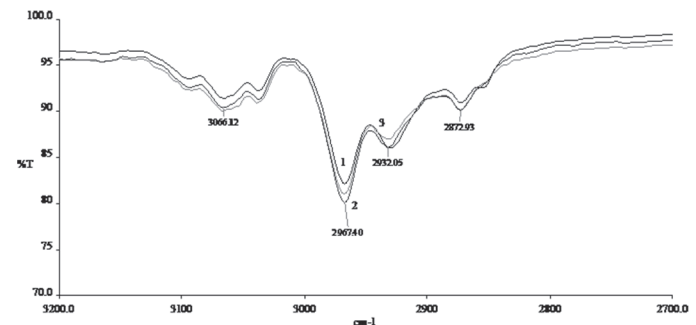


Рис. 8. ИК-спектр ПСФ-190, снятый с поверхности внутреннего слоя образца: 1 – исходный образец, 2 – образец после экспонирования при 170°C в течение 2000 час, 3 – образец после экспонирования при 170°C в течение 5000 час.

В ИК-спектрах образца Udel P1700, в отличие от ИК-спектров образцов ПСФ-190 (рис. 8) после 2000 и 5000 часов экспозиции, снятых с поверхности внутреннего слоя лопатки, появляются полосы поглощения валентных колебаний в диапазоне 3000–2800 см⁻¹ (рис. 9), что связано как с изменением конформации цепи макромолекулы [9], так и с образованием –CH₂– групп, которые образуются при окислении –CH₃ групп. Методом спектрофотометрии было

установлено, что происходит увеличение содержания концевых гидроксильных групп –ОН в образце Udel P1700 после выдержки при температуре 170°C в течение 2000 часов с 0,007 до 0,011%.

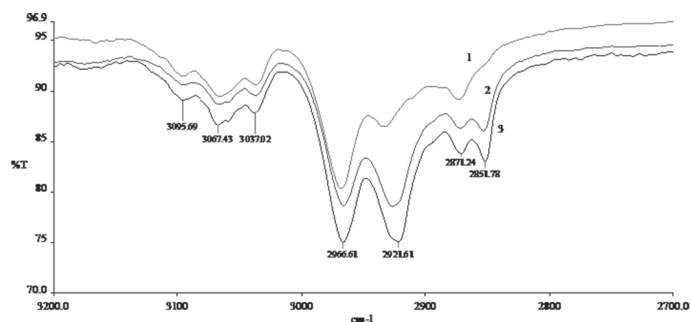


Рис. 9. ИК-спектр Udel P1700, снятый с поверхности внутреннего слоя образца: 1 – исходный образец, 2 – образец после экспонирования при 170°C в течение 2000 час, 3 – образец после экспонирования при 170°C в течение 5000 час.

Методом ИК-спектроскопии показано, что процессы термоокисления в ПСФ-190 и Udel P1700 протекают по-разному. В ПСФ-190 окисление метильных групп идет с поверхностного слоя с образованием карбонильных групп. В Udel P1700 предположительно идет окисление метильных групп с образованием –CH₂– групп.

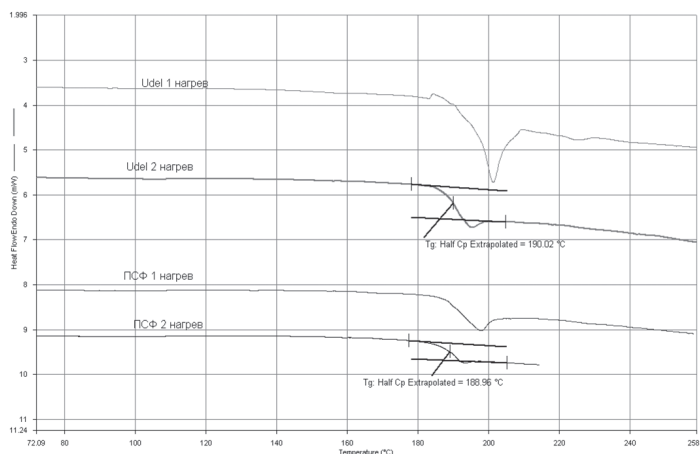


Рис. 10. Кривые ДСК полисульфонов после воздействия температуры 170°C и времени старения 2000 ч.

Методом ДСК проводилось определение температуры стеклования ПСФ-190 и Udel P1700 исходных и после воздействия температуры 170°C в течение 2000 часов. Результаты исследования представлены на рис. 10 и в таблице 5.

Таблица 5. Влияние термоокислительного старения на температуру стеклования полисульфонов и диапазон α-перехода.

Материал	Значение температуры стеклования и интервала α-перехода			
	$T_c, ^\circ\text{C}$		$\Delta T, ^\circ\text{C}$	
	Исходные	После 2000 часов	Исходные	После 2000 часов
ПСФ-190	185±1	189±1	12	13
Udel P1700	187±1	190±1	10	13

Как показали исследования температурного перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое, для полисульфонов характерен узкий интервал перехода. Температурная область перехода (10–13°C) свидетельствует об узком наборе кинетических единиц, участвующих в процессе стеклования.

Значения температуры стеклования исходных ПСФ-190 и Udel P1700 близки. Под влиянием температуры и времени старения происходит увеличение температуры стеклования на 3–4°C. Рост температуры стеклования полисульфонов может быть связан с увеличением плотности молекулярной упаковки макромолекул.

С целью прогнозирования изменения деформационно-прочностных свойств от температуры и времени старения для описания кинетической кривой было применено уравнение первого порядка для двух неконкурирующих процессов по ГОСТ 9.707-81, так как вышеприведенные данные по влиянию термоокислительного старения на деформационно-прочностные характеристики показывают наличие на кривой зависимости «показатель – время старения»

двух участков с различной интенсивностью изменения показателя:

$$X(\tau) = X_{\text{пред}} \pm \gamma_1 \cdot \exp(-K_1 \cdot \tau) \pm \gamma_2 \cdot \exp(-K_2 \cdot \tau),$$

где $X(\tau)$ – значение показателя в момент времени τ , $X_{\text{пред}}$ – предельное значение показателя, K_1 и K_2 – константы скорости процесса, γ_1 и γ_2 – коэффициенты.

Полученные данные были обработаны по ГОСТ 9.707-81 (метод 1), определены значения кажущейся энергии активации процессов, проходящих в полисульфоне при низкотемпературном термоокислительном старении в зависимости от температуры старения, что позволяет прогнозировать изменение основных деформационно-прочностных свойств в разных температурных условиях хранения. Рассчитанные значения кажущейся энергии активации процесса низкотемпературного термоокислительного старения, определенные по изменению показателя «предел текучести при растяжении», для ПСФ-190 составили 112 и 115 кДж/моль, для Udel P1700 – 113 и 112 кДж/моль. Построены кривые прогноза для различных температур старения (рис. 11, 12, 13 и 14).

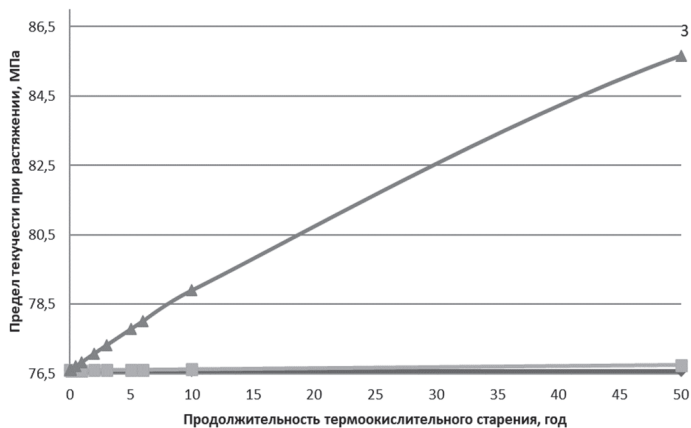


Рис. 11. Кривая прогноза ПСФ-190 – зависимость предела текучести при растяжении от продолжительности термоокислительного старения при различных температурах: 1 – 23°C; 2 – 60°C; 3 – 100°C.

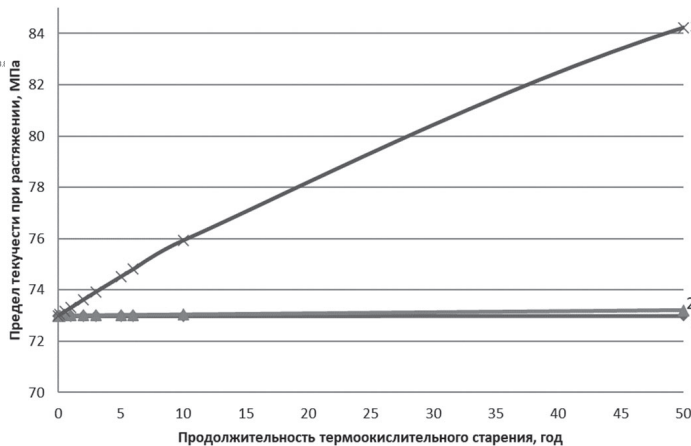


Рис. 12. Кривая прогноза Udel P1700 – зависимость предела текучести при растяжении от продолжительности термоокислительного старения при различных температурах: 1 – 23°C; 2 – 60°C; 3 – 100°C.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что в условиях хранения в течение 50 лет (диапазон температур от 23°C до 60°C) полисульфон ПСФ-190 и Udel P1700 сохраняет высокий уровень деформационно-прочностных свойств. Интенсивность изменения показателя «предел текучести при растяжении» и «относительное удлинение при разрыве» для Udel P1700 в диапазоне температур до 60°C выше, чем для ПСФ-190. С понижением температуры хранения материала ниже 23°C происходит снижение интенсивности процессов термоокислительного старения, протекающих в полимере. Как было показано ранее [10], для обоих полимерных материалов – ПСФ-190 и Udel P1700 – значение температуры хрупкости находится в диапазоне температур ниже минус 60°C. Таким образом, можно отметить, что в диапазоне температур от минус 60 до 60°C для исследуемых полимеров характерно сохранение деформационно-прочностных свойств в течение не менее 50 лет.

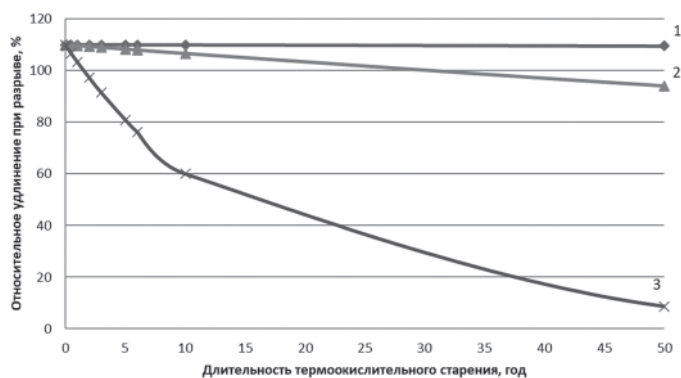


Рис. 13. Кривая прогноза ПСФ-190 – зависимость относительного удлинения при разрыве от продолжительности термоокислительного старения при различных температурах старения: 1 – 23°C; 2 – 60°C; 3 – 100°C.

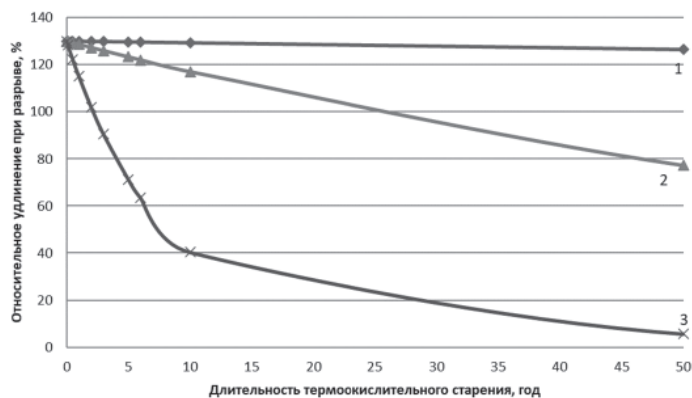


Рис. 14. Кривая прогноза Udel P1700 – зависимость относительного удлинения при разрыве от продолжительности термоокислительного старения при различных температурах старения: 1 – 23°C; 2 – 60°C; 3 – 100°C.

С использованием методики UL 746В был определен относительный безударный механический температурный индекс (RTI) – температура сохранения пятидесятипроцентного значения исходного показателя «прочность при растяжении» в течение 100000 часов. Для исследуемых полисульфонов ПСФ-190 и Udel P1700 относительный безударный механический температурный индекс UL RTI одинаков и составляет 120°C, что на 20–30°C ниже данных, приведенных в литературных источниках [11, 12].

Выводы

Установлено, что величина удельного объемного сопротивления полисульфонов не изменяется при воздействии температур и времени в условиях низкотемпературного термоокислительного старения. Основные изменения таких характеристик, как плотность, предел текучести при растяжении, относительное удлинение при разрыве образца наблюдаются в течение первых 250 часов при всех температурах. Повышение значений предела текучести, по-видимому, происходит в результате роста плотности упаковки макромолекул, что подтверждается увеличением значений плотности (1,233–1,244 г/см³ для ПСФ-190, 1,230–1,243 г/см³ для Udel P1700).

Методом ИК-спектроскопии показано, что процессы термоокисления в ПСФ-190 и Udel P1700 протекают по-разному. В ПСФ-190 окисление метильных групп идет с поверхностного слоя с образованием карбонильных групп. В Udel P1700, предположительно, идет окисление метильных групп с образованием CH₂ групп.

Методом ДСК показано, что в процессе термоокислительного старения под влиянием температуры и времени температура стеклования возрастает, что связано с увеличением плотности упаковки макромолекул. Релаксационный α-переход в исследуемых полисульфонах характеризуется узким набором кинетических единиц, участвующих в α-переходе, и незначительным температурным интервалом перехода.

Процесс термоокислительного старения при хранении полисульфонов ПСФ-190 и Udel P1700 при температурах от минус 60 до 60°C не оказывает существенного влияния на деформационно-прочностные свойства в течение 50 лет.

Литература

1. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия, 1982. – 224 с.
2. Kuroda S.I., Terarechi K., Negani K., Mita I. Degradation of aromatic polymers. 1. Rates of crosslinking and chain scission during thermal degradation of several soluble aromatic polymers. Eur. Polym. J. 1989. vol. 25. №1. p. 1–7.
3. Болотина Л.М., Чеботарев В.П. Развитие исследований в области химии и технологии ароматических полисульфонов. // Пластические массы, 2003, №11, с. 3–7.
4. Matsuoka S. Failure of plastics., Ed. Broetow. N.Y.: SPE and Hausor. 1986. Ch.3.
5. Launterbur P. In determination of organic structures by physical methods., Ed. Nachod F.C. N.Y.: Academic Press. 1962, vol. 2. p. 7.
6. Михайлов Н.В., Шершнев В.А., Шарай Т.А. и др. Основы физики и химии полимеров. М.: Высшая школа, 1977. – 248 с.
7. Кобеко П.П. Аморфные вещества. Изд. АН СССР, 1952
8. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Техносфера, 2013. – 695 с.
9. Шабадаш А.Н., Коновалова Б.Е., Рейтбурд Л.И. и др. Спектроскопическое изучение структуры полисульфонов. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. №6, НИИТЭХИМ, 1976, С. 41–43.
10. Пексимов, О.Е. Изучение температурных переходов в ПСФ-190 Udel P1700 с помощью теплофизических, диэлектрических и физико-механических методов исследования / О.Е. Пексимов // V Всероссийская научная конференция «Физикохимия процессов переработки полимеров» (тезисы докладов), ОАО «Издательство «Иваново»», 2013, С. 136–137
11. Михайлин, Ю.А. Термоустойчивые полимеры и материалы на их основе / Ю.А. Михайлин // Полимерные материалы. – 2005. – №7. – С. 14–17.
12. Udel Design Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/Udel-PSU-Design-Guide_EN-v5.0_0_0.pdf, свободный.