

УДК 541.64:547.128'1

НЕИЗОЦИАНАТНЫЕ ПОЛИСИЛОКСАНУРЕТАНЫ НА ОСНОВЕ ОЛИГОДИМЕТИЛСИЛОКСАНОВ, СОДЕРЖАЩИХ АМИНОПРОПІЛЬНЫЕ И ЭТОКСИЛЬНЫЕ ЗАМЕСТИТЕЛИ

© 2023 г. Е. С. Транкина^{а,*}, А. Ю. Казанцева^а, Д. А. Ханін^а, С. Е. Любимов^а,
Е. Г. Кононова^а, У. С. Андропова^б, А. М. Музафаров^{а,б}

^аИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Вавилова 28, Россия

^бИнститут синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70, Россия

*e-mail: trankina@ineos.ac.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 16.08.2023 г.

Представлен экологичный способ получения сшитых полисилоксануретанов без использования токсичных изоцианатов. Синтез осуществлен в две стадии: на первой, методом аминолита циклокарбонатов (различного строения и функциональности) олигомерными диметилсилоксанами, содержащими аминопропильные и этоксильные заместители, синтезированы неизоцианатные полисилоксануретаны; на второй, в результате гидролиза влагой воздуха этоксильных групп получены сшитые неизоцианатные полисилоксануретаны. По данным ТГА процессы термоокислительной деструкции неизоцианатных полисилоксануретанов начинаются при температуре 240–260°C в зависимости от строения органического блока. Методами ДСК и ТМА изучена структурная организация пленок и определена температура стеклования двух блоков — гибкого силоксанового и жесткого уретанового. Методом сканирующей электронной микроскопии оценена поверхность пленочных образцов неизоцианатных полисилоксануретанов.

DOI: 10.31857/S2308114723700437, EDN: GCQLIT

ВВЕДЕНИЕ

Полиуретаны относятся к гетероцепным высокомолекулярным соединениям, в структуре которых присутствует уретановая группировка $\text{HN}-\text{C}(\text{O})-\text{O}$. Основным методом синтеза ПУ является процесс полиприсоединения олигомерных ди- или полиолов к ди- или полиизоцианатам. Высокая доступность, структурное разнообразие и сравнительно низкая стоимость этих реагентов открыли целый спектр уникальных материалов, свойства которых могут изменяться от жидкостей и эластомеров до жестких пластмасс [1]. Однако помимо низкой гидролитической стабильности, изоцианаты относятся к классу высокотоксичных соединений, поскольку демонстрируют высокую реакционную способность по отношению к соединениям, содержащим подвижные атомы водорода [2–4]. В связи с этим, в 2009 году European Commission (решение № 552/2009 от 22.06.2009), а вслед за ней позже и U.S. Environmental Protection Agency (RIN 2070-ZA15 от 20.04.2011) [5, 6] разработали регламент, согласно которому введены ограничения на при-

менение изоцианатов, в частности в отношении наиболее распространенного метилendiфенилдиизоцианата (МДИ) и его производных.

В литературе описан ряд химических процессов, приводящих к формированию уретановой группировки без участия изоцианатов — поликонденсация бис-алкилкарбаматов, катионная полимеризация циклокарбаматов, сополимеризация замещенных азиридинов с диоксидом углерода, полиприсоединение бициклокарбонатов и полиаминов [7, 8]. Последний процесс (аминолит циклокарбонатов) считается наиболее перспективным для получения неизоцианатных полиуретанов (НИПУ), в связи с тем что реакция не чувствительна к влаге, а исходные компоненты не обладают такой токсичностью, как изоцианаты и фосген, который используют при их синтезе. Основным ограничением для внедрения в промышленность процесса аминолита для синтеза НИПУ является невысокая доступность полициклокарбонатов. Но и в данном направлении в настоящее время проводятся масштабные исследования [9, 10], так как это напрямую связано с фиксацией

диоксида углерода, относящегося к парниковым газам [11]. Физико-механические свойства полученных таким способом полиуретанов также зависят от строения исходных компонентов; поэтому на их основе могут быть созданы эластомеры, гидрогели, пены, адгезивы и покрытия [12–16]. Причем по многим характеристикам НИПУ пре-

восходят традиционные ПУ, что связано с особенностями их структуры.

В результате процесса аминоллиза циклокарбонатов, в соответствии с механизмом раскрытия карбонатного цикла формируются гидроксиуретаны с первичными или вторичными гидроксильными группами:

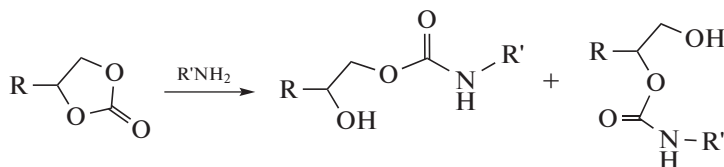


Схема 1.

Образование биуретовых и аллофонатных группировок, оказывающих существенное влияние на свойства полиуретанов, в данном случае исключено. Наличие гидроксильных групп в структуре НИПУ способствует улучшению адгезионных, механических и термических характеристик по сравнению с аналогичными материалами на основе традиционных полиуретанов. Это связано с формированием более плотной сети водородных связей с уретановыми сегментами [17, 18].

Многочисленные исследования показали, что на скорость реакции аминотриазолиза и строение образующихся гидроксикарбонатов оказывает влияние ряд факторов: температура, структура исходных реагентов, растворитель, катализатор [19]. Поскольку скорость реакции и конверсия понижаются при использовании олигомерных аминов и замещенных карбонатов особое внимание придается катализаторам реакции аминотриазолиза. Наиболее перспективными выглядят разнообразные третичные амины — замещенные производные мочевины, соединения амидинового (1,8-дизабицикло[5.4.0]ундец-7-ен — **ДБУ**) или гуанидинового (1,5,7-тризабицикло[4.4.0]дец-5 — **ТБД**) типа, которые применяют для реакций ионной полимеризации с раскрытием цикла эпоксидов, лактонов, лактидов, карбонатов, лактамов и других мономеров [20, 21]. Эти соединения способствуют быстрому переносу протона в переходном состоянии, причем ТБД проявляет “избыточную активность”, что позволяет применять его в процессах аминотриазолиза олигомерных и малоактивных карбонатов на основе растительных масел [22].

Для получения гибридных и(или) сшитых НИ-ПУ используют реагенты, которые могут вступать в реакцию с гидроксильными группами, образующимися при аминолизе циклокарбонатов, или гидролизаться под действием влаги воздуха.

Эти процессы способствуют формированию сетчатых сшитых структур, что благоприятно отражается на физико-механических свойствах полимеров [23]. Такими реагентами успешно выступают функционализированные алкоксисиланы [24–26]. Присутствие гидролизующихся алкокси-групп обеспечивает хорошее сцепление покрытий с различными неорганическими поверхностями [27], позволяя тем самым создавать на их основе клеи и защитные покрытия.

Исследования, направленные на изучение особенностей синтеза неизоцианатных полисилоксануретанов немногочисленны, несмотря на то что эти полимеры, получаемые по традиционной технологии, обладают рядом полезных эксплуатационных свойств. Они обусловлены тем, что в структуре полимера соединены два термодинамически несовместимых блока — неполярный силоксановый и полярный уретановый. Введение силоксанового блока придает гидрофобность (происходит снижение поверхностной энергии) и атмосферостойкость, газопроницаемость и повышенную термостойкость (так как энергия диссоциации связи Si—O составляет ~460.5 кДж/моль), а также устойчивость к динамическим механическим нагрузкам полимерным материалам на их основе. При этом сохраняются хорошие механические характеристики, присущие полиуретанам, и расширяется температурный диапазон эксплуатации до температуры порядка -100°C [28–30].

Для создания неизоцианатных полисилоксануретанов (**НИПСУ**), имеющих в своей структуре мягкие силоксановые блоки, применяют полидиметилсилоксаны с концевыми органическими заместителями, содержащими либо циклокарбонатную, либо аминогруппу [31, 32]. Стоимость таких олигомеров обычно высока из-за их многоступенчатого синтеза.

Недавно [33] был описан одностадийный синтез органосилоксановых олигомеров, содержа-

щих в своей структуре как органические заместители с аминогруппой, так и алкоксигруппы:

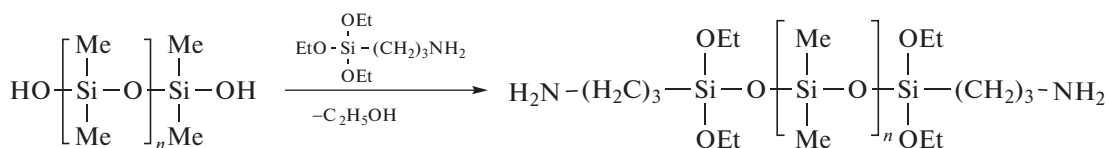


Схема 2.

Приведенный процесс позволяет существенно снизить затраты на синтез аминопропилсилоксанов, что делает их привлекательными для создания на их основе НИПСУ методом аминотриэтоксисилоксанов.

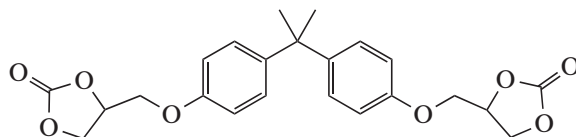
Цель настоящей работы – синтез и анализ термических свойств сшитых НИПСУ на основе олигомерных диметилсилоксанов, содержащих концевые аминопропилные и этоксильные заместители, и циклокарбонатов различного строения (линейного, разветвленного) и функциональности (2–3). С помощью сканирующей электронной микроскопии исследована морфология поверхности пленок на основе неизоцианатных полисилоксануретанов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

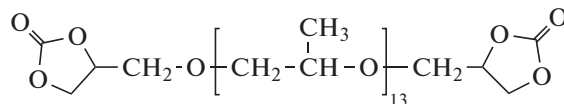
Исходные реагенты

В настоящей работе использовали γ -аминопропилтриэтоксисилан ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$) и γ -амино-

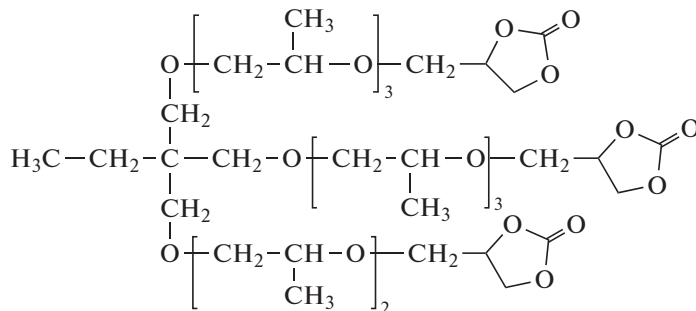
пропилметилдиэтоксисилан ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{SiCH}_3(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$), которые очищали перегонкой 115 град/15 мм и 90 град/15 мм соответственно, диметилдиэтоксисилан ($(\text{CH}_3)_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$) применяли без дополнительной очистки – все реагенты фирмы “ABCR”; 1,8-диазабисцикло[5.4.0]ундец-7-ен фирмы “Aldrich”, “Лапролат 802” – линейный дициклокарбонат на основе окиси полипропилена и “Лапролат 803” – разветвленный трициклокарбонат на основе триметилпропана и окиси пропилена предоставлены Обществом с ограниченной ответственностью “Научно-производственное предприятие “Макромер” им. В.С. Лебедева”; ароматический циклокарбонат на основе бисфенола-А (БФ-ЦК) синтезировали по методике [34] (структуры циклокарбонатов приведены ниже); ледяная уксусная кислота, сульфат натрия безводный, толуол, ацетонитрил квалификации х.ч. – все производства “Компонент-Реактив”:



Ароматический (А-ЦК-2)



Лапролат 802 (Л-ЦК-2)



Лапролат 803 (Р-ЦК-3)

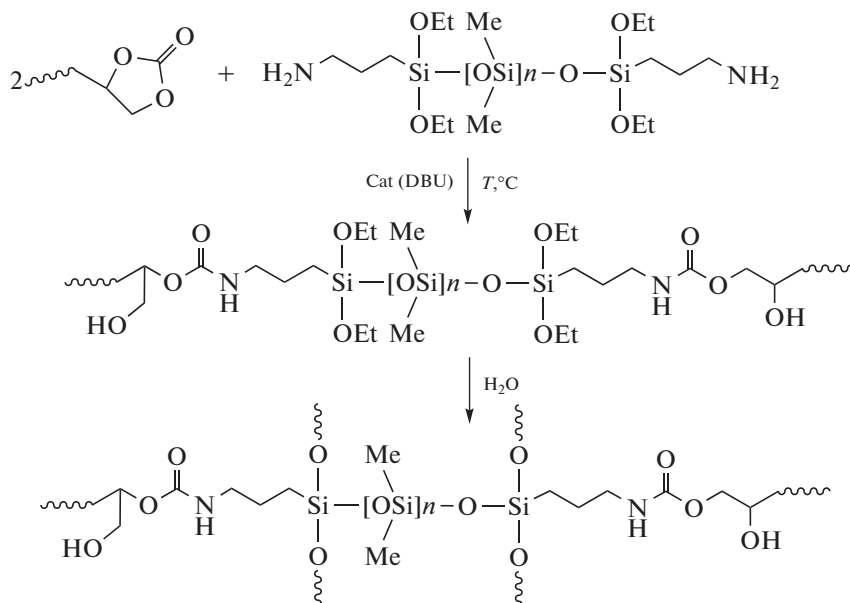


Схема 4.

Методы исследования силоксановых олигомеров и сшитых пленочных образцов НИПСУ

Гель-фракцию определяли в приборе Сокслета экстракцией толуолом навесок полимера.

ГПХ проводили на приборе “Shimadzu” (Япония, Германия), состоящего из насоса высокого давления НРР 5001 (Чехия), рефрактометрического детектора “RID-20А”. Температура термостатирования 40.0°C, элюент толуол, скорость потока 1.0 мл/мин. Колонка 300 × 7.8 мм, заполненная сорбентом “Phenogel 1000А”, время анализа 15–20 мин.

ИК-спектры регистрировали на ИК-фурье-спектрометре “Bruker Tensor37”. Образцами служили таблетки с KBr и тонкие слои между окон KBr. Спектры НПВО полимерных пленок снимали на ИК-спектрометре “Bruker Vertex 70v” с использованием алмазной кюветы.

Спектры ЯМР ^1H и ЯМР ^{29}Si регистрировали на спектрометре “BrukerAvance 400 МГц” с рабочими частотами 400.13 и 79.49 МГц соответственно. Для количественного измерения интенсивностей сигналов спектры ЯМР ^{29}Si снимали с импульсным подавлением, исключающим ядерный эффект Оверхаузера, с длительными задержками 25 с. Использовали растворы в CDCl_3 , хим. сдвиги измеряли относительно ТМС при $T = 298\text{ K}$.

ТГА осуществляли на синхронном термоанализаторе “DTG-60H” (“Shimadzu”, Япония) при скорости нагревания 10 град/мин в аргоне и на воздухе.

ДСК проводили на приборе “DSC-3” (“Mettler-Toledo”, Швейцария) при скорости нагревания 10 град/мин в аргоне.

ТМА выполняли на приборе “ТМА Q400” (“TAInstruments”, США) методом пенетрации. Диаметр зонда 2.5 мм, усилие 1 Н, скорость нагревания и охлаждения 5 град/мин.

Анализ поверхности пленок осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью растрового электронного микроскопа “JCM-6000PLUS” (“JEOL”, Япония) с предварительным напылением на поверхность электропроводящего покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Неизоцианатные полисилоксануретаны на основе α - ω - γ -аминопропил-диэтоксидиметилсилоксана (NH_2Si) или α - ω - γ -аминопропил-этоксидиметилсилоксана (NH_2SiMe) и циклокарбонатов различной функциональности: линейного дициклокарбоната Л-ЦК-2 (на основе окиси пропилена), разветвленного трициклокарбоната Р-ЦК-3 (на основе триметилпропана и окиси пропилена) и ароматического дициклокарбоната А-ЦК-2 (на основе бисфенола-А) были получены в смеси толуол–ацетонитрил методом аминолитиза с добавлением катализатора ДБУ. В табл. 1 приведены значения гель-фракций и термические характеристики сшитых НИПСУ.

Необходимость осуществления процесса в растворе связана, в первую очередь, с несовместимостью исходных реагентов, особенно при ис-

Таблица 1. НИПСУ на основе α - ω - γ -аминопропил-диэтокси-олигодиметилсилоксанов (NH_2Si) и α - ω - γ -аминопропил-метил-этоксидиметилсилоксанов (NH_2SiMe)

Шифр	ЦК	$W_{[\text{Si}(\text{Me})_2\text{O}]}$, мас. %	W_{Si} , мас. %	Гель- фракция, %	T 5%-ной потери массы на воздухе, °C	T_c , °C	
						ДСК	ТМА
Диамин NH_2Si							
$\text{NH}_2\text{Si-A-ЦК-2}$	А	70.7	29.4	97.4	265	−110 +30	−123 +56
$\text{NH}_2\text{Si-P-ЦК-3}$	Р	57.7	24.0	96.4	247	−110 −39	−126 −17
$\text{NH}_2\text{Si-L-ЦК-2}$	Л	57.2	23.8	98.1	242	−120 −61	−119 −68
Диамин NH_2SiMe							
$\text{NH}_2\text{SiMe-A-ЦК-2}$	А	69.6	29.0	97.5	245	−117 +6	−124 +3
$\text{NH}_2\text{SiMe-P-ЦК-3}$	Р	57.0	23.7	98.4	240	−120 −45	−123 −46
$\text{NH}_2\text{SiMe-L-ЦК-2}$	Л	56.5	23.5	98.3	235	−120 −68	−116 −63

пользовании твердого А-ЦК-2. Как отмечалось ранее [19–21], в соответствии с механизмом реакции аминолиз легче протекает в полярных растворителях, так как он участвует в стабилизации и переносе протона в переходном состоянии, поэтому в качестве соразтворителя был введен ацетонитрил, а для ускорения реакции добавлен катализатор ДБУ, который облегчает перенос протона.

Процесс проводился в инертной атмосфере для предотвращения преждевременного гидролиза этокси-групп кремнийорганического олигомера и НИПСУ, приводящего к желированию реакционной массы. Оптимизация времени процесса была выполнена с использованием ИК-спектроскопии (рис. 1) на основании изменения интенсивностей полос валентных колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ в исходных циклокарбонатах (максимум валентных колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ в циклическом карбонате лежит в области 1783 см^{-1}) и конечных гидроксиуретанах (максимум валентных колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ в уретановом фрагменте находится в области 1703 см^{-1}) [35]. При получении НИПСУ на основе труднорастворимого А-ЦК-2 время реакции составило 14 ч.

В ИК-спектре (НПВО) НИПСУ интенсивность амидной (N-H) полосы очень мала, что связано со сравнительно низкой долей уретанового фрагмента в молекуле. На рис. 2 видно, что в ИК-спектре пленочного образца значительной толщины, зарегистрированном в режиме пропускания, характеристические полосы этого фрагмента становятся хорошо различимы: 3333 см^{-1} (валентные колебания связи N-H) и 1648 см^{-1}

(деформационные колебание связи N-H уретанового фрагмента).

Толуольные растворы НИПСУ были использованы для получения сшитых пленочных образцов (схема 4). В присутствии влаги воздуха концевые этоксильные группы подвергаются гидролізу с образованием силоксановых связей. При использовании в синтезе α - ω - γ -аминопропил-метил-этокси-олигодиметилсилоксана (NH_2SiMe) образуется менее плотная силоксановая сетка, так как содержание этоксильных групп в олигомере в 2 раза ниже. Высокие значения гель-фракции подтверждают сшитую структуру НИПСУ (табл. 1).

Термогравиметрический анализ НИПСУ показал, что термоокислительная деструкция на воздухе начинается в интервале $240\text{--}260^\circ\text{C}$ в зависимости от строения исходного циклокарбоната; наибольшие значения наблюдаются для образцов $\text{NH}_2\text{Si-A-ЦК-2}$ и $\text{NH}_2\text{SiMe-A-ЦК-2}$ на основе ароматического дициклокарбоната А-ЦК-2 (рис. 3; таб. 1). Плотность силоксановой сетки практически не оказывает существенного влияния на значения начала термоокислительной деструкции — для образцов на основе α - ω - γ -аминопропил-метил-этокси-олигодиметилсилоксана (NH_2SiMe) прослеживается понижение температуры 5%-ной потери массы на воздухе приблизительно на 10°C . Масса коксового остатка (в виде SiO_2) после ТГА соответствует содержанию кремния в полимерах.

Данные ДСК сшитых НИПСУ в интервале температуры от -140 до $+100^\circ\text{C}$ представлены в табл. 1 и на рис. 4. Видно, что все кривые имеют по два ярко выраженных перегиба, обусловлен-

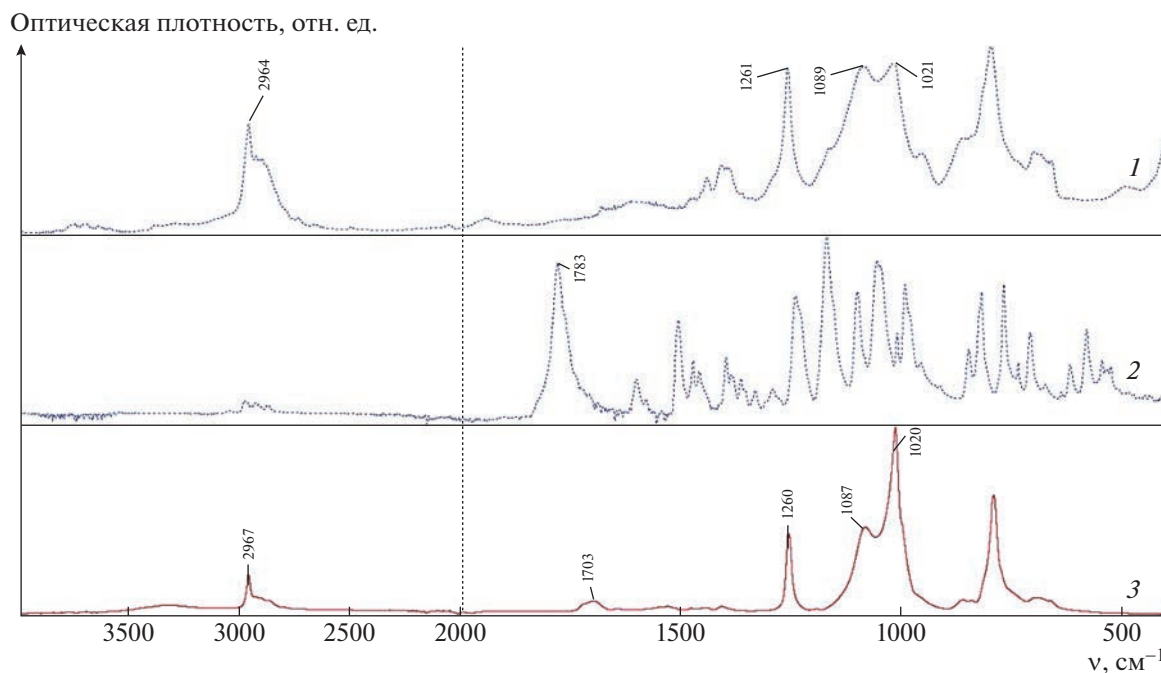


Рис. 1. ИК-спектры (отражение) исходного олигомерного α - ω - γ -аминопропил-диэтоксисилоксана (NH_2Si) (1), ароматического дициклокарбоната (А-ЦК-2) (2) и НИПСУ на их основе (NH_2Si -А-ЦК-2) (3).

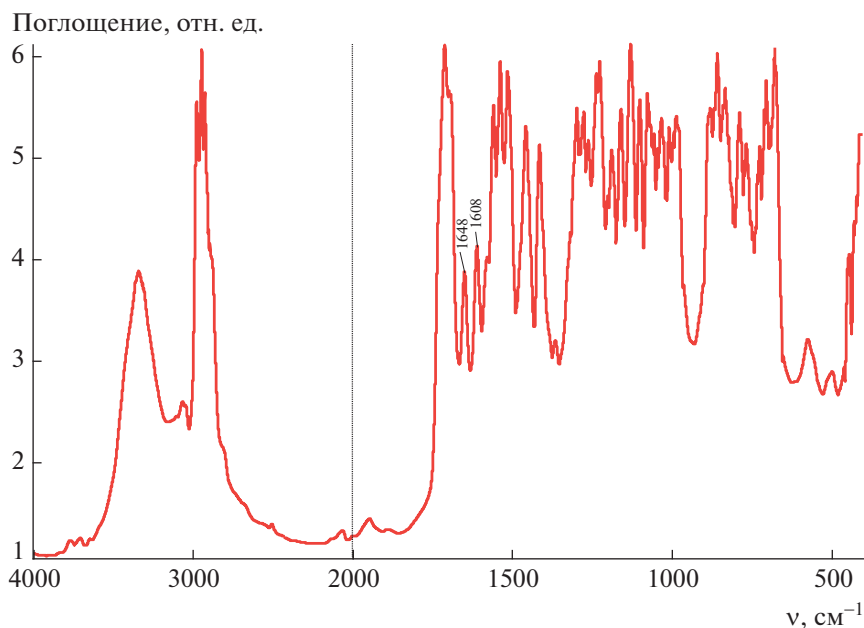


Рис. 2. ИК-спектр (пропускание) НИПСУ NH_2Si -А-ЦК-2.

ные ступенчатым изменением теплоемкости вещества с повышением температуры; это свидетельствует об аморфной структуре данных соединений в твердом состоянии. Предварительный отжиг и медленное охлаждение образцов не повлияли на ход кривых ДСК. В табл. 1 даны значе-

ния температуры стеклования T_g , соответствующие середине перегибов на кривых ДСК. Так, значения температуры первого перехода T_g^1 , находящегося в низкотемпературной области (от -110 до -120°C), соответствуют размягчению гибкого силоксанового блока, а второго — размягчению

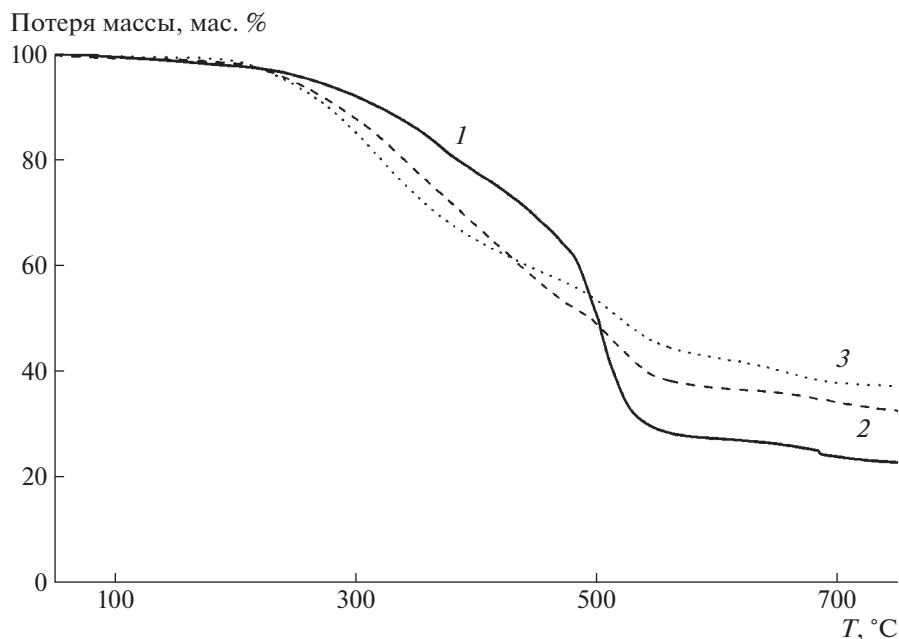


Рис. 3. ТГА (воздух) сшитых НИПСУ: 1 – $\text{NH}_2\text{Si-A-ЦК-3}$, 2 – $\text{NH}_2\text{Si-P-ЦК-2}$, 3 – $\text{NH}_2\text{Si-L-ЦК-2}$.

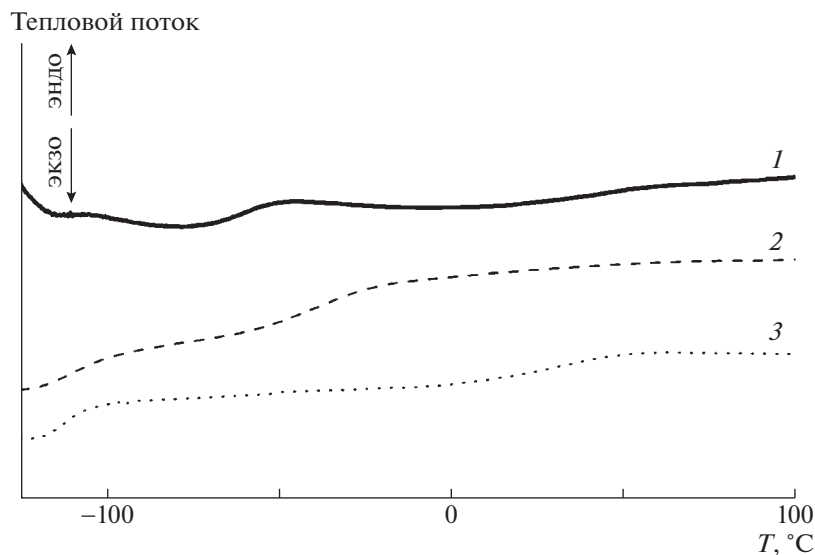


Рис. 4. ДСК сшитых НИПСУ: 1 – $\text{NH}_2\text{Si-L-ЦК-2}$, 2 – $\text{NH}_2\text{Si-P-ЦК-3}$, 3 – $\text{NH}_2\text{Si-A-ЦК-2}$.

жесткого уретанового блока, образованного водородными связями между уретановыми фрагментами. На температуру второго физического перехода T_c^2 влияет строение циклокарбоната. Для НИПСУ на основе олигомера NH_2Si при переходе от жесткого ароматического к разветвленному, а затем, к гибкому пропиленоксидному блоку наблюдается снижение T_c^2 от $+30$ до -39 и -61°C соответственно. Эти значения лежат в тем-

пературных областях, характерных для стеклования органических полиэфиров [36].

При исследовании сшитых НИПСУ на основе олигомера NH_2SiMe , в котором содержится меньше этоксильных групп по сравнению с олигомером NH_2Si , т.е. при отверждении образуется менее плотная силоксановая сетка, можно видеть понижение T_c^2 . Известно, что появление любого фактора, уменьшающего подвижность молекулы при повышении температуры, приводит к повы-

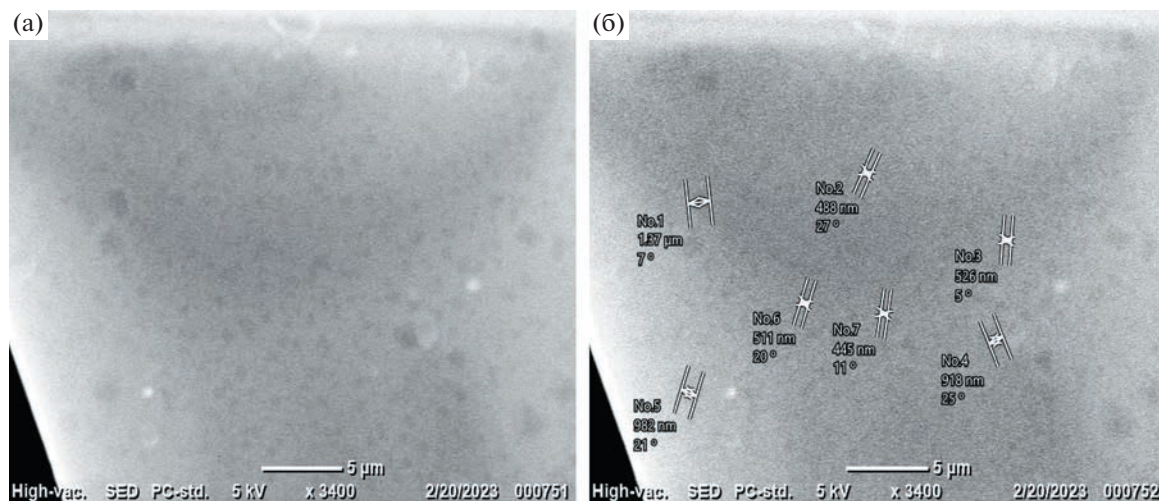


Рис. 5. Изображение СЭМ образца $\text{NH}_2\text{SiMe-A-CQ-2}$: а — поверхность пленки, б — показаны средние размеры областей.

шению T_c (увеличение молекулярной массы, силы межмолекулярных связей (водородных, ван-дер-ваальсовых), введение объемных заместителей и ковалентных связей затормаживающих вращение понижает мобильность молекул). В нашем случае понижение плотности силоксановой сетки приводит к большей подвижности жестких блоков.

Проведенный термомеханический анализ сшитых НИПСУ также выявил два перехода в тех же температурных интервалах, что подтверждает сегментированное микрофазовое строение неизоцианатных полисилоксануретанов (табл. 1). Незначительное отклонение прослеживается в значениях T_c^2 для образцов на основе диамина NH_2Si , установленных разными методами. Это связано с тем, что при проведении ТМА, T_c определяют по моменту понижения модуля упругости при повышении температуры. При отверждении же НИПСУ на основе диамина NH_2Si образуется более плотная силоксановая сетка, чем в случае образцов на основе диамина NH_2SiMe , понижая тем самым подвижность полимерных цепей (схема 4) и увеличивая значения температуры стеклования.

Микрофотография надмолекулярной структуры поверхности пленки сшитого НИПСУ $\text{NH}_2\text{SiMe-A-CQ-2}$, полученная при помощи СЭМ, представлена на рис. 5. На поверхности образца, находящейся в контакте с воздухом, наблюдается формирование микрофазового разделения вследствие термодинамической несовместимости полярных уретановых и неполярных (или малополярных) мягких силоксановых сегментов. В процессе отверждения силоксановые сегменты вытесняются на границу раздела раствор—воздух.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования в процессе аминолита циклокарбонатов различного строения и функциональности олигомерных диметилсилоксанов, содержащих как γ -аминопропильные, так и этоксильные заместители при концевых атомах кремния, при сохранении реакционноспособных этоксильных групп, гидролиз которых в дальнейшем обеспечивает формирование силоксановой сетчатой структуры в полимере. Также синтезированы сшитые НИПСУ и изучены их термические свойства. Наличие двух переходов T_c как на кривых ДСК, так и ТМА свидетельствует о микрофазовом разделении в составе сополимера, которое обусловлено термодинамической несовместимостью мягкого силоксанового и жесткого уретанового сегментов в структуре полимера. Полученные данные открывают новые возможности для дальнейшей оптимизации процесса аминолита широкого круга циклокарбонатов олигомерными диорганосилоксанами, содержащими как γ -аминопропильные, так и этоксильные заместители при концевых атомах кремния.

Работа выполнена в рамках госзадания № 075-03-2023-642 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования Центра исследования строения молекул Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН и Центра исследования полимеров Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FFSM-2021-0004) 2021–2023 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sonnenschein M.F.* // Polyurethanes. Science, Technology, Markets and Trends. New York: Wiley, 2014.
2. *Lesage J., DeGraff I., Danchik R.* // Isocyanates: Sampling, Analysis and Health Effects. American Society for Testing and Materials. 2002, 138.
3. *Redlich Carrie A.* // Int. Immunopharm. 2002. V. 2. № 2–3. P. 213.
4. *Meredith S.K.* // Occup. Environmental Med. 2000. V. 57. № 12. P. 830.
5. Commission Regulation (EC). Off. J. Eur. Union 2009, P. 552.
6. Methylene Diphenyl Isocyanate (MDI) and Related Compounds Action Plan, Toluene Diisocyanate (TDI) Action Plan; U.S Environmental Protection Agency, 2011.
7. *Kreye O., Mutlu H., Meier M.A.R.* // Green Chem. 2013. V. 15. № 6. P. 1431.
8. *Maisonneuve L., Lamarzelle O., Rix E., Grau E., Cra-mail H.* // Chem. Rev. 2015. V. 115. № 22. P. 12407.
9. *Kember M.R., Buchard A., Williams C.K.* // Rev. Chem. Commun. (Camb). 2011. V. 47. № 1. P. 141.
10. *Guo L., Lamb K.J., North M.* // Green Chem. 2021. V. 23. P. 77.
11. *Quere C.Le., Jackson R.B., Jones M.W., Smith A.J.P., Abernethy S., Andrew R.M., De-Gol A.J., Willis D.R., Shan Y., Canadell J.G., Friedlingstein P., Creutzig F., Peters G.P.* // Nat. Clim. Change. 2020. № 10. P. 647.
12. *Poussard L., Mariage J., Grignard B., Detrembleur C., Jérôme C., Calberg C., Heinrichs B., De Winter J., Gerbaux P., Raquez J.-M., Bonnaud L., Dubois Ph.* // Macromolecules. 2016. V. 49. P. 2162.
13. *Beniah G., Liu K., Heath W.H., Miller M.D., Scheidt K.A., Torkelson J.M.* // Eur. Polym. J. 2016. V. 84. P. 770.
14. *Gennen S., Grignard B., Thomassin J.-M., Gilbert B., Vertruyen B., Jerome C., Detrembleur C.* // Eur. Polym. J. 2016. V. 84. P. 849.
15. *Cornille A., Dworakowska S., Bogdal D., Boutevin B., Caillol S.A.* // Eur. Polym. J. 2015. V. 66. P. 129.
16. *Dolci E., Michaud G., Simon F., Boutevin B., Fouquay S., Caillol S.* // Polym. Chem. 2015. № 6. P. 7851.
17. *Cornille A., Michaud G., Simon F., Fouquay S., Auvergne R., Boutevin B., Caillol S.* // Eur. Polym. J. 2016. V. 84. P. 404.
18. *Ochiai B., Inoue S., Endo T.* // J. Polym. Sci., Polym. Chem. 2005. V. 43. P. 6615.
19. *Cornille A., Auvergne R., Figovsky O., Boutevin B., Caillol S.* // Eur. Polym. J. 2017. V. 87. P. 535.
20. *Blain M., Jean-Gérard L., Auvergne R., Benazet D., Caillol S., Andrioletti B.* // Green Chem. 2014. V. 16. P. 4286.
21. *Lambeth R.H., Henderson T.J.* // Polymer. 2013. V. 54. P. 5568.
22. *Dove A.P.* // ACS Macro Lett. 2012. V. 1. P. 1409.
23. *Haniffa Mhd. Abd. Cader Mhd., Munawar K., Ching Y.Ch., Illias H.A., Chuah Ch.H.* // Chem Asian J. 2021. V. 16. P. 1281.
24. *Decostanzi M., Ecochard Y., Caillol S.* // Eur. Polym. J. 2018. V. 109. P. 1.
25. *Figovsky O., Shapovalov L., Buslov F.* // Surf. Coat. Int. B. 2005. V. 88. B1. P. 1.
26. *Rossi de Aguiar K.M.F., Ferreira-Neto E.P., Blunk S., Schneider J.F., Picon C.A., Lepienski C.M., Rischkae K., Rodrigues-Filho U.P.* // RSC Adv. 2016. № 6. P. 19160.
27. *Wei jie B.C., Zhou W., Wang T.-H.* // Lab. Chip. 2012. V. 12. P. 4120.
28. *Askari F., Barikani M., Barmar M.* // J. Appl. Polym. Sci. 2013. V. 130. № 3. P. 1743.
29. *Lu Ch.-An., Xu M., Tan Zh., Qu Zh., Wu K., Shi J.* // Coll. Polym. Sci. 2020. V. 298. P. 1215.
30. *Riehle N., Athanasopulu K., Kutuzova L., Götz T., Kandellbauer A., Tovar G.E.M., Lorenz G.* // Polymers. 2021. V. 13. P. 212.
31. *Hanada K., Kimura K., Takahashi K., Uruno M.* Pat. US 2014/0024274 A1.
32. *Aguiar K.R., Santos V.G., Eberlin M.N., Rischka K., Noeske M., Tremiliosi-Filho G., Rodrigues-Filho U.P.* // RSC Adv. 2014. V. 4. P. 24334.
33. *Meshkov I.B., Kalinina A.A., Gorodov V.V., Bakirov A.V., Krashenninnikov S.V., Chvalun S.N., Muzafarov A.M.* // Polymers. 2021. V. 13. № 17. P. 2848.
34. *Lyubimov S.E., Zvinchuk A.A., Davankov V.A., Chowdhury B., Arzumanyan A.V., Muzafarov A.M.* // Russ. Chem. Bull. Int. Ed. 2020. V. 69. № 6. P. 1076.
35. *Levina M.A., Zabalov M.V., Krashenninnikov V.G., Tiger R.P.* // Polymer Science B. 2018. V. 6. № 5. P. 563.
36. *Виноградова С.В., Васнев В.А.* Поликонденсационные процессы и полимеры. М.: Наука, 2000.