

## АНИОННАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМИДАЗОЛОВ

© М. С. Федосеев, Л. Ф. Державинская, И. А. Борисова, Т. Е. Ощепкова

Институт технической химии —  
филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН,  
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 3  
E-mail: msfedoseev@mail.ru

Поступила в Редакцию 14 января 2022 г.

После доработки 13 апреля 2022 г.

Принята к публикации 26 апреля 2022 г.

*Методом дифференциальной сканирующей калориметрии исследована кинетика анионной полимеризации эпоксидной смолы ЭД-22 под действием инициаторов имидазолов различного строения. Методом инфракрасной спектроскопии исследована зависимость степени превращения эпоксидной смолы от количества инициатора в реакционной смеси и температуры полимеризации. Установлена концентрация инициатора в реакционной смеси (2–3 мас%) и определен режим полимеризации с постепенным подъемом температуры, при которых формируются терmostойкие полимеры с наибольшими значениями температуры стеклования и стабильными физико-механическими характеристиками в широком диапазоне температур. Показана возможность использования эпоксид-имидазольных реакционных смесей для получения терmostойких композитов.*

Ключевые слова: эпоксидные смолы; анионная полимеризация; имидазолы; терmostойкие полимеры и композиты

DOI: 10.31857/S0044461822030045, EDN: DEUBNE

Полимеризация эпоксидных смол может осуществляться с использованием широкого круга отвердителей, таких как ангидриды кислот, амины, полиамиды, полисульфиды, фенолформальдегиды, имидазолы [1, 2]. Имидазолы привлекают внимание из-за их высокой реакционной способности при цепной (ионной) полимеризации эпоксидных смол. Полимеры, полученные по механизму анионной полимеризации с использованием имидазолов, характеризуются повышенной терmostойкостью и устойчивостью к действию кислот и щелочей, что определяется образованием простых терmostабильных эфирных

связей —С—О—С [3, 4]. При достаточно большом количестве публикаций по кинетике полимеризации эпоксидных соединений под действием имидазолов различного строения недостаточно информации по влиянию количества инициатора и режимов полимеризации на конечные свойства полимеров [5, 6]. Например, в работе [7] при изучении анионной полимеризации диглицидилового эфира бисфенола А под действием имидазолов в количестве 2 мас% были получены полимеры с температурой стеклования 160–162°C. В работе [4] представлены полимеры, полученные на основе диглицидилового эфира бисфе-

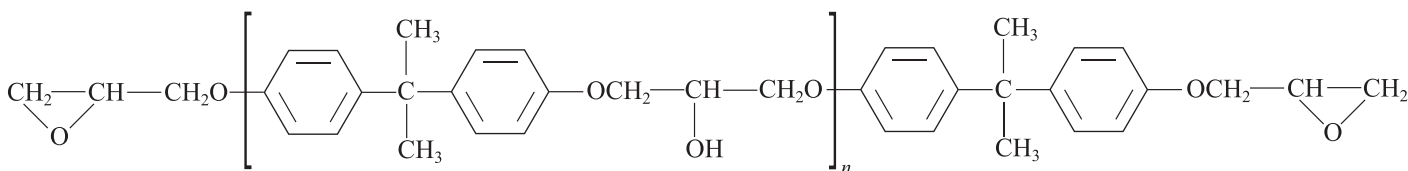
нола F (YDF-170) под действием этих же имидазолов в количестве 10 мас% с более низкими температурами стеклования — от 98 до 134°C. Использованные эфиры похожи по строению и различаются лишь мостиковой группой в бисфеноле. Существенное различие в значениях температуры стеклования, по всей видимости, связано с концентрацией инициатора в реакционной системе.

Цель работы — определение количества имидазольного инициатора в реакции анионной полимеризации эпоксидной смолы для получения полимеров

и композитов с высокой температурой стеклования (теплостойкостью).

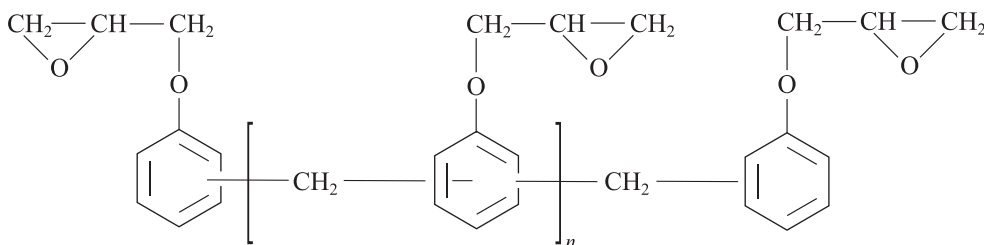
### Экспериментальная часть

Использовали эпоксидные смолы различной функциональности: двухфункциональную эпоксидную смолу ЭД-22 — диглицидиловый эфир дифенилолпропана (массовая доля эпоксидных групп 23%, динамическая вязкость при 25°C 9.8 Па·с, АО «Химэкс Лимитед»):



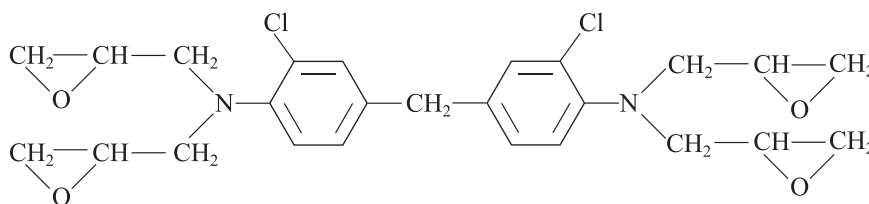
трехфункциональную эпоксидную смолу УП-643 — полиглицидиловый эфир новолачной эпоксидной смолы (содержание эпоксидных групп 23.4%, ди-

намическая вязкость при 50°C 55 Па·с, АО «Химэкс Лимитед»):



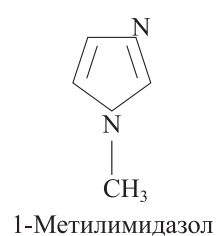
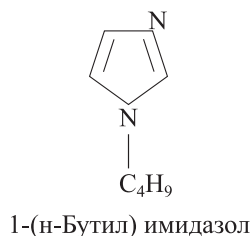
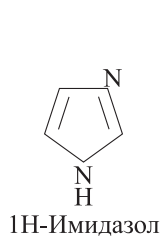
четырефункциональную эпоксидную смолу ЭХД (ТУ 2225-607-11131395-03, содержание эпоксид-

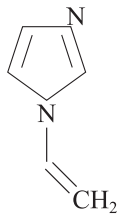
ных групп 28.3%, динамическая вязкость при 50°C 15 Па·с, АО «Химэкс Лимитед»):



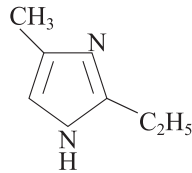
В качестве инициаторов анионной полимеризации использовали имидазолы различного строения: 1H-имидазол 99% (Alfa Aesar, кат. номер A10221), 1-(н-бутил)имидазол 99% (Alfa Aesar, кат. номер L07793), 1-метиylimидазол 99% (Alfa Aesar, кат. но-

мер A12575), 1-винилимидазол 99% (Alfa Aesar, кат. номер L16174), 2-этил-4-метиylimидазол 96% (Alfa Aesar, кат. номер A15798), N,N'-карбонилдиимидазол 97% (Alfa Aesar, кат. номер A14688):

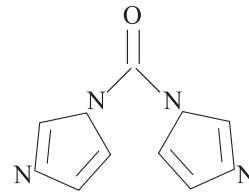




1-Винилимидазол



2-Этил-4-метилимидазол



N, N'-Карбонилдиимидазол

Анионную полимеризацию эпоксидной смолы ЭД-22 под действием имидазолов изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии на калориметре DSC 822e (METTLER TOLEDO) в динамическом режиме при скорости нагрева 5 град·мин<sup>-1</sup> в интервале температур 25–300°C.

Температуру структурного стеклования образцов полимеров определяли на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 822e фирмы METTLER TOLEDO при скорости сканирования 5 град·мин<sup>-1</sup> в интервале температур 25–200°C.

ИК-спектры поглощения регистрировали на Фурье-спектрометре VERTEX-80v (Bruker) в диапазоне 4000–400 см<sup>-1</sup> при спектральном разрешении 2 см<sup>-1</sup>. Обработку спектров проводили с помощью стандартной процедуры программного обеспечения OPUS 6.5. Реакцию полимеризации эпоксидной смолы в присутствии имидазолов контролировали по пику в области деформационных колебаний 916 см<sup>-1</sup>, характерному для эпоксидной группы.

Реологические свойства эпоксид-имидазольных композиций оценивали по изменению вязкости на ротационном вискозиметре Rheotest 2.1 (Rheotest Manufactory GmbH) с узлом конус–плита при постоянной скорости сдвига 180 с<sup>-1</sup> при температуре 60 ± 0.5°C.

Образцы для физико-механических испытаний изготавливали следующим образом. Реакционные смеси получали смешением смолы с инициаторами при температуре 40°C при вакуумировании в течение 10–15 мин. Композиции заливали в металлические формы шелевого типа и нагревали в термошкафу по заданным режимам. После полимеризации составов формы выдерживали при комнатной температуре в течение 24 ч. Физико-механические характеристики при растяжении отвержденных полимеров (прочность и относительную критическую деформацию) определяли на разрывной машине Instron 3565 (Instron Corporation) при скорости растяжения 0.28 с<sup>-1</sup> при разных температурах согласно методике.\* Характеристики композиционного мате-

риала при сжатии определяли на образцах в виде брусьев на универсальной электромеханической машине FS100CT (Testometric Company LTD) с климатической камерой T48150E при скорости испытаний 0.016 с<sup>-1</sup> при разных температурах согласно методике.\*\*

Исследование термомеханических свойств полимеров проводили на установке NETZSCH DMA 242C, позволяющей определять динамический модуль упругости  $E$  и тангенс угла потерь  $\tan E'/E$ , который равняется отношению модуля потерь  $E''$  к модулю упругости  $E$ . Эти показатели характеризуют вязкоупругие свойства и теплостойкость, которую оценивали по максимуму  $\tan E'/E$  при частоте приложения нагрузки 0.5 Гц (значение температуры стеклования). Эксперимент проводили в интервале температур 30–280°C со скоростью нагрева 2 град·мин<sup>-1</sup>. Нагружение проводили по режиму трехточечного изгиба, перемещение заданной величины прикладывали к среднему сечению образца. Амплитуда изгиба образца составляла 50–60 мкм.

### Обсуждение результатов

При изучении анионной полимеризации эпоксидных смол под действием имидазолов наряду с ранее использованными были выбраны имидазолы, замещенные в положении 1 — 1-(*n*-бутил)имидазол, 1-винилимидазол, N,N'-карбонилдиимидазол. Максимальное изменение интенсивности пика деформационных колебаний эпоксидной группы 916 см<sup>-1</sup> на ИК-спектрах реакционной смеси смолы ЭД-22 с инициатором 2-этил-4-метилимидазолом в количестве 3 мас% при температурах 130–190°C происходит в течение первых 30 мин, в дальнейшем изменения интенсивности незначительны. Некоторое количество эпоксидных групп не вступает в реакцию (табл. 1). При 100°C интенсивность расходования эпоксидных групп заметно ниже, степень конверсии 87.9%. При

\* ГОСТ ISO 37–2013. Межгосударственный стандарт. Резина или термопластик. Определение упругопрочностных свойств при растяжении.

\*\* ГОСТ 25.602–80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

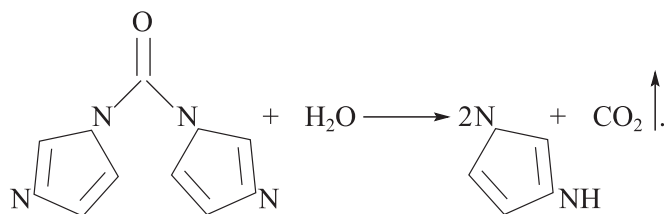
Таблица 1

Интенсивность пика деформационных колебаний эпоксидной группы  $916\text{ см}^{-1}$  в реакционной смеси ЭД-22–2-этил-4-метилимидазол (содержание инициатора 3 мас%) при различных температурах

Время, мин	Интенсивность, %, при температура, °С				
	100	130	150	170	190
0	100	100	100	100	100
30	21.6	11.2	10.5	5.9	6.7
60	17.5	7.5	7.4	5.5	5.1
90	13.5	5.4	5.3	5.2	4.7
150	12.1	5.2	5.3	5.3	4.5

большем количестве инициатора — 10 мас% реакция протекает несколько быстрее, но также не приводит к полному расходованию эпоксидных групп (рис. 1). Степень конверсии эпоксидных групп — 96.1%.

На термограммах дифференциальной сканирующей калориметрии анионной полимеризации смолы ЭД-22 (содержание инициатора 3 мас%) зафиксированы два пика в случае незамещенных в положении 1 имидазолов — 1Н-имидазол, 2-этил-4-метилимидазол (рис. 2, а). Первый пик при более низкой температуре характеризует образование аддуктов с эпоксидной смолой, второй — анионную полимеризацию под действием этих аддуктов, что соответствует механизму анионной полимеризации имидазолами [6, 8]. В присутствии замещенных имидазолов [1-(н-бутил)-имидазол, 1-метилимидазол, 1-винилимидазол] на термограммах фиксируется один пик, соответствующий анионной полимеризации (рис. 2, б). Следует отметить некоторые особенности полимеризации смолы замещенным N,N'-карбонилдиимидазолом. На термограмме по аналогии с незамещенным имидазолом присутствуют два пика. Это связано с тем, что N,N'-карбонилдиимидазол является неустойчивым химическим соединением и легко гидролизуется с выделением двух молекул имидазола по следующей схеме [9]:



Если оценивать реакционную активность представленных имидазолов по пику на термограммах (табл. 2), то их можно расположить в следующий ряд: 1Н-имидазол, N,N'-карбонилдиимидазол, 1-метилимидазол, 2-этил-4-метилимидазол, 1-(н-бутил)-

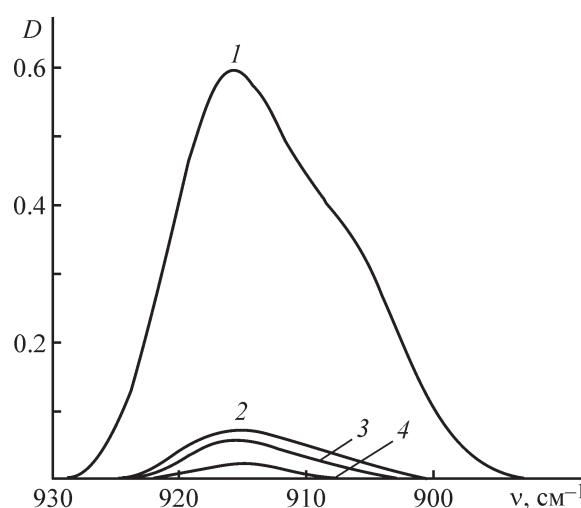


Рис. 1. Фрагменты ИК-спектров поглощения в области колебаний эпоксидной группы реакционной смеси ЭД-22–2-этил-4-метилимидазол (содержание инициатора 10 мас%).

Спектр: исходный (1) и после выдерживания при 130°С 30 (2), 90 (3), 150 мин (4).

имидазол, 1-винилимидазол. Последний является наименее реакционным. 1-Винилимидазол содержит двойную связь, и при его использовании в качестве инициатора кроме анионной полимеризации может протекать радикальная полимеризация самого 1-винилимидазола. В этом случае реакция может идти по механизму взаимопроникающих сеток [10].

Температурная область полимеризации изменяется незначительно при увеличении количества инициатора в 10 раз (от 1 до 10 мас%) (рис. 3). В обоих случаях (2-этил-4-метилимидазол и N,N'-карбонилдиимидазол) максимум тепловыделения сдвигается на 15°, температура начала реакции практически не изменяется.

Таким образом, анионную полимеризацию эпоксидной смолы ЭД-22 под действием имидазолов можно проводить при небольших концентрациях

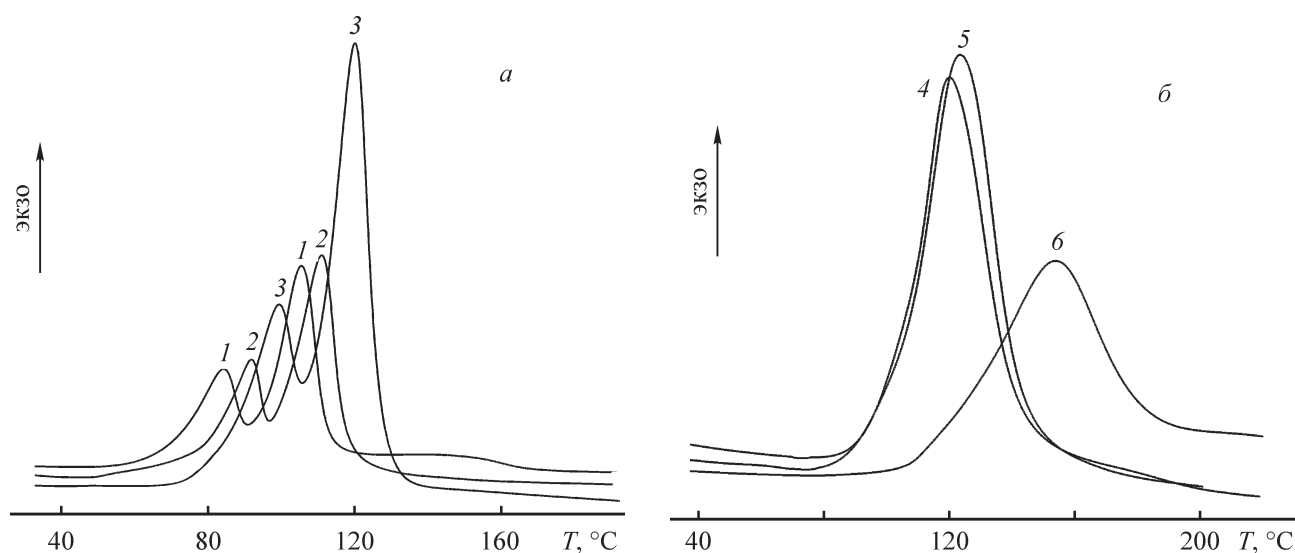


Рис. 2. Термограммы дифференциальной сканирующей калориметрии анионной полимеризации смолы ЭД-22 под действием не замещенных в положении 1 имидазолов (а): 1H-имидазола (1), 2-этил-4-метилимидазола (3) и N,N'-карбонилдиимидазола (2) — и замещенных (б): 1-метиylimидазола (4), 1-(н-бутил)имидазола (5), 1-винилимидазола (6). Содержание инициатора 3 мас%.

последних в реакционной системе (1–3 мас%), а температурно-временные режимы выбирать по максимальной степени завершенности реакции.

Оценка изменения вязкости эпоксид-имидазольных композиций с течением времени позволила оценить возможность их использования в процессах переработки и изготовления полимеров. Ряд имидазолов, соответствующий реологическим кривым, практически совпадает с рядом их реакционной активности, определенной методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Время достижения вязкости ~50 Па·с определяет возможность применения состава в технологическом процессе производства тех или иных изделий и для представленных имида-

золов составляет от 75 до 120 мин при 60°C (рис. 4). Вязкость композиции с менее реакционным инициатором 1-винилимидазолом в течение 5 ч при 60°C практически не изменяется. Проявляя активность при более высоких температурах, 1-винилимидазол может являться латентным инициатором анионной полимеризации эпоксидных смол [11].

Окончательный выбор концентрации инициатора в системе отверждения был сделан по результатам определения температуры стеклования и физико-механических характеристик полимеров, полученных под действием двух имидазолов — 2-этил-4-метилимидазола и N,N'-карбонилдиимидазола (табл. 3). Полимеры на основе реакционных смесей с большим

Таблица 2

Параметры реакции полимеризации эпоксидной смолы ЭД-22 под действием имидазолов в количестве 3 мас%

Инициатор	Температура начала реакции, °С	Максимум тепловыделения, °С	Тепловой эффект $Q$ , Дж·г <sup>-1</sup>
1H-Имидазол	50	87 107	475
1-(н-Бутил)имидазол	80	121	576
1-Метилимидазол	80	118	386
1-Винилимидазол	100	153	468
2-Этил-4-метиylimидазол	75	97 120	425
N,N'-Карбонилдиимидазол	50	92 110	466

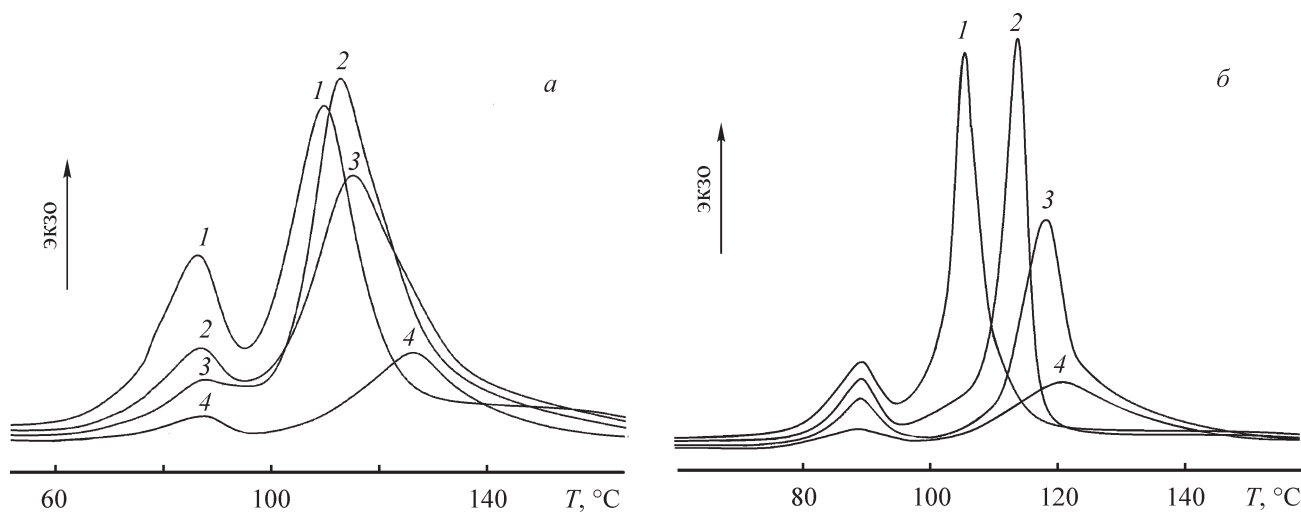


Рис. 3. Термограммы дифференциальной сканирующей калориметрии анионной полимеризации смолы ЭД-22 под действием  $N,N'$ -карбонилдиимидазола (а) и 2-этил-4-метиylimидазола (б).

Содержание инициатора (мас%): 1 — 10, 2 — 5, 3 — 3, 4 — 1.

количеством инициатора (15–5 мас%) характеризуются высокими значениями прочности при комнатной температуре, но при этом низкими температурами стеклования, а прочность при температуре 150°C близка к нулю. Уменьшение количества инициатора до 2–3 мас% при полимеризации смолы ЭД-22 приводит к формированию полимеров со значительно более высокой температурой стеклования и соответственно теплостойкостью. При этом их прочность снижает-

ся в 1.5–2 раза, но практически не изменяется при испытаниях при 150°C, что свидетельствует об их термоустойчивости. Полимеры, сформированные с количеством инициатора 1 мас%, имели повышенную хрупкость и не были испытаны. Таким образом, более теплостойкие полимеры на основе эпоксидных смол и имидазолов могут быть получены при минимальной концентрации инициатора 2–3 мас%.

Этот вывод подтверждают результаты испытаний полимеров методом динамического механического анализа, который позволяет оценить поведение материалов при нагрузке в широком интервале температур (рис. 5). Данные показывают преимущество режима полимеризации с постепенным подъемом температуры отверждения (100°C, 1 ч + 130°C, 1 ч + 150°C, 2 ч) перед режимом полимеризации при одной температуре (150°C, 3 ч) для получения материалов с более высоким модулем упругости и температурой стеклования, которая составляет 171 и 159°C соответственно.

Изготовлены полимеры по механизму анионной полимеризации в присутствии инициаторов — имидазолов в количестве 3 мас% с использованием режима постепенного подъема температуры. Полученные материалы имеют высокий модуль упругости при изгибе при 30°C (2670–3250 МПа) и высокие значения механического стеклования (170–192°C). Как и следовало ожидать, характеристики полимеров на основе трех- и четырехфункциональной смол выше, чем полимеров на основе двухфункциональной смолы (табл. 4). В таблице приведены значения модуля упругости, температуры стеклования и температуры  $T_{1000}$ , при которой материал сохраняет значения

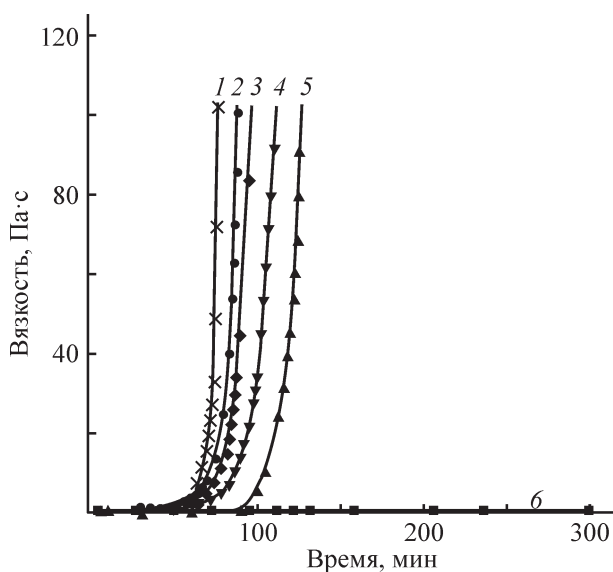


Рис. 4. Нарастание динамической вязкости при 60°C реакционных систем на основе ЭД-22 и инициаторов — имидазолов в количестве 3 мас%.

1 — 1-метиylimидазол, 2 — 1H-имидазол, 3 —  $N,N'$ -карбонилдиимидазол, 4 — 1-(н-бутил)имидазол, 5 — 2-этил-4-метиylimидазол, 6 — 1-винилимидазол.



Таблица 3

Физико-механические свойства и температура стеклования полимеров анионной полимеризации на основе реакционных систем с разным содержанием инициатора

Содержание инициатора, мас%	Свойства при разрыве при температуре испытаний				Температура структурного стеклования, °С
	25°С		150°С		
	прочность, МПа	деформация, %	прочность, МПа	деформация, %	
Инициатор 2-этил-4-метилимидазол					
15	58	10	1	—	95
10	50	9	1	3	98
5	30	4	2	6	115
3	30	4	31	7	165
2	30	9	29	10	172
1	—	—	—	—	170
Инициатор N,N'-карбонилдиимидазол					
15	62	8	1	8	97
10	71	10	2	8	111
5	45	5	6	4	123
3	25	5	27	6	170
2	23	4	28	6	173
1	—	—	—	—	170

Примечание. (—) — полимеры не были испытаны.

модуля упругости, равное 1000 МПа, и может быть использован в качестве конструкционного материала в различных приложениях.

Итогом исследований является изготовление и испытание композиционного материала на основе

стекловолокнутого наполнителя и эпоксид-имидазольного связующего с инициатором 1-метилимидазолом в количестве 3 мас% (табл. 5). Он был получен методом прессования пропитанной связующим ткани МКТ-4.2 с последующей полимеризацией по ступен-

Таблица 4

Термомеханические свойства полимеров анионной полимеризации

Инициатор, 3 мас%	Модуль упругости $E$ , МПа, при 30°С	Температура стеклования, °С (ДМА)	$T_{1000}$ , °С	Тангенс угла механических потерь при $E = 1000$ МПа
Полимеры на основе смолы ЭД-22				
1Н-Имидазол	2850	170	160	0.195
1-(н-Бутил)имидазол	2900	175	161	0.187
1-Метилимидазол	2750	165	154	0.208
1-Винилимидазол	2670	156	140	0.195
2-Этил-4-метилимидазол	2750	176	159	0.240
N,N'-Карбонилдиимидазол	2730	172	162	0.194
Полимеры на основе смолы УП-643				
1-(н-Бутил)имидазол	2920	192	168	0.176
Полимеры на основе смолы ЭХД				
1-(н-Бутил)имидазол	3250	182	162	0.174

**Таблица 5**  
Свойства композиционного материала при сжатии

Температура испытаний, °С	Разрушающее напряжение, МПа	
	эпоксид-имидазольный композит	композит на основе ЭДТ-10
25	125	141
100	108	83
150	65	—
200	36	27

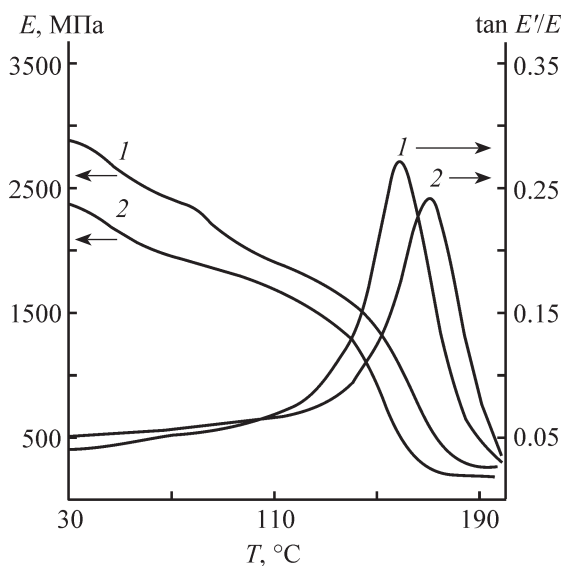


Рис. 5. Зависимость динамического модуля упругости  $E$  и тангенса угла механических потерь  $\tan E'/E$  от температуры для полимеров, полученных анионной полимеризацией смолы ЭД-22 в присутствии 1Н-имидазола в количестве 3 мас%.

1 — отверждение при 150°C, 3 ч; 2 — отверждение с постепенным подъемом температуры (100°C, 1 ч + 130°C, 1 ч + 150°C, 2 ч).

чатовому режиму. По разрушающему напряжению на сжатие композит на основе эпоксид-имидазольного связующего не уступает композиту на основе известного связующего ЭДТ-10, в котором инициатором полимеризации является триэтаноламинтитанат.

### Выводы

Полимеры анионной полимеризации на основе эпоксидных смол разной функциональности с высокой теплостойкостью (температура стеклования 170–192°C) и стабильными физико-механическими характеристиками в широком интервале температур (25–150°C) формируются при концентрации инициатора 2–3 мас% по режиму постепенного подъема

температуры. Инициатор 1-винилимидазол при полимеризации проявляет латентные свойства.

Образцы композита на основе опытного эпоксид-имидазольного связующего имеют характеристики, сравнимые с характеристиками образцов на основе штатного связующего ЭДТ-10, а по теплостойкости превосходят его (падение прочности на сжатие при 200°C составляет 69 и 81% соответственно).

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ гос. регистрации 122011900165-2) с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация об авторах

Федосеев Михаил Степанович, д.т.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9775-5025>  
Державинская Любовь Федоровна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2711-1379>  
Борисова Ирина Алексеевна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-3400>  
Ощепкова Тамара Евгеньевна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3122-0757>

### Список литературы

- [1] Brydson's Plastics Materials / Ed. by M. Gilbert. 8th Ed. London: Elsevier Ltd, 2017. P. 773–797. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00027-X>
- [2] Massingill J. L., Jr., Bauer R. S. Epoxy Resins // Applied Polymer Science: 21st Century / Eds C. Craver,



- C. Carraher. Amsterdam: Elsevier Science, 2000. P. 393–424.
- [3] *Ghaemy M., Sadjady S.* Kinetic analysis of curing behavior of diglycidyl ether of bisphenol a with imidazoles using differential scanning calorimetry techniques // *J. Appl. Polym. Sci.* 2006. V. 100. P. 2634–2641. <https://doi.org/10.1002/app.22716>
- [4] *Ham Y. R., Kim S. H., Shin Y. J., Lee D. H., Yang M., Min J. H., Shin J. S.* A comparison of some imidazoles in the curing of epoxy resin // *J. Indust. Engin. Chem.* 2010. V. 16. N 4. P. 556–559. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.03.022>
- [5] *Barton J. M., Hamerton I., Howlin B. J., Jones J. R., Liu Sh.* Studies of cure schedule and final property relationships of a commercial epoxy resin using modified imidazole curing agents // *Polymer.* 1998. V. 39. N 10. 1929–1937. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(97\)00372-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(97)00372-8)
- [6] *Jišová V.* Curing mechanism of epoxides by imidazoles // *J. Appl. Polym. Sci.* 1987. V. 34. N 7. P. 2547–2558. <https://doi.org/10.1002/app.1987.070340718>
- [7] *Федосеев М. С., Державинская Л. Ф.* Синтез и свойства полимерных материалов, полученных анионной полимеризацией эпоксидных олигомеров // *ЖПХ.* 2012. Т. 85. № 11. С. 1847–1852 [*Fedoseev M. S., Derzhavinskaya L. F.* Synthesis and properties of polymeric materials prepared by anionic polymerization of epoxy oligomers // *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 11. P. 1753–1757. <https://doi.org/10.1134/S1070427212110201>].
- [8] *Leena K., Soumyamol P. B., Baby M., Suraj S., Rajeev R., Mohan D. S.* Non-isothermal cure and decomposition kinetics of epoxy–imidazole systems // *J. Therm. Analys. Calorim.* 2017. V. 130. N 2. P. 1053–1061. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6410-5>
- [9] *Федосеев М. С., Глушков В. А., Горбунов А. А., Державинская Л. Ф., Ощепкова Т. Е.* Синтез и свойства полимерных материалов, полученных при полимеризации эпоксидных олигомеров с продуктами превращений N,N'-карбонилдиимдазола // *ЖПХ.* 2012. Т. 85. № 3. 485–489 [*Fedoseev M. S., Glushkov V. A., Gorbunov A. A., Derzhavinskaya L. F., Oshchepkova T. E.* Synthesis and properties of polymeric materials prepared by polymerization of epoxy oligomers with N,N'-carbonildiimidazole transformation products // *Russ. J. Appl. Chem.* 2012. V. 85. N 3. P. 456–459. <https://doi.org/10.1134/S1070427212030238>].
- [10] *Santanakrishnan S., Hutchinson R. A.* Free-radical polymerization of N-vinylimidazole and quaternized vinylimidazole in aqueous solution // *Macromol. Chem. Phys.* 2013. V. 214. N 10. P. 1140–1146. <https://doi.org/10.1002/macp.201300044>
- [11] *Shi K., Shen Y., Zhang Y. and Wang T.* A modified imidazole as a novel latent curing agent with toughening effect for epoxy // *Eng. Sci.* 2018. V. 5. P. 66–72. <https://doi.org/10.30919/es8d639>
-