

## НОВЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ НА ОСНОВЕ *N,N*-ДИМЕТИЛАМИНОАЛКИЛАМИДОВ ПЕРФТОРАЛКАНОВЫХ КИСЛОТ

© В. А. Осипова<sup>1</sup>, Т. И. Горбунова<sup>1</sup>, М. А. Барабанов<sup>1</sup>, А. В. Мехяев<sup>1</sup>,  
Д. И. Вичужанин<sup>2</sup>, С. В. Смирнов<sup>2</sup>, А. В. Пестов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН,  
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 22

<sup>2</sup> Институт машиноведения УрО РАН,  
620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34

<sup>3</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19  
E-mail: osipova.sva@gmail.com

Поступила в Редакцию 20 октября 2021 г.

После доработки 14 декабря 2021 г.

Принята к публикации 17 января 2022 г.

*Синтезирован ряд *N,N*-диметиламиноалкиламидов перфторбутановой и перфторпентановой кислот, изучена активность указанного ряда амидов в реакции отверждения коммерческой эпоксидной смолы ЭД-20. По данным дифференциального термического анализа, ИК-Фурье-спектроскопии и с учетом величины содержания гель-фракции в отвержденных композициях установлено, что при повышении массовой доли углеводородной части и снижении содержания фтора в молекуле реагента увеличивается реакционная способность отвердителя. Оценка прочности склеивания стали марки Ст3 эпоксидной смолой ЭД-20, отвержденной амидами, показала, что все синтезированные соединения обеспечивают в 2 раза более эффективное склеивание, чем полиэтиленполиамин — стандартный отвердитель. В случае склеивания алюминиевого сплава Д16 эффективность, наоборот, незначительно снижается.*

Ключевые слова: амиды; перфторкарбоновые кислоты; эпоксидная смола; катализаторы полимеризации

DOI: 10.31857/S0044461822010066

Эпоксидные смолы широко применяются в промышленности в качестве основы для клеевых композиций, покрытий и герметизирующих материалов благодаря химической, термической и механической стойкости, высокой адгезии к металлам [1]. Данные соединения представляют собой форполимеры, способные к отверждению благодаря раскрытию оксирановых циклов под действием различных веществ, например нуклеофильных реагентов.

Свойства полимерных композиционных материалов на основе отвержденной эпоксидной смолы зависят от условий отверждения и химического строения компонентов — наполнителей и отвердителя [2]. Введение атомов фтора в состав эпоксидных олигомеров предварительной обработкой фторсодержащими реагентами представляет собой несомненный практический интерес, так как приводит к снижению

свободной поверхностной энергии и диэлектрической проницаемости материала и, как следствие, к увеличению гидрофобности его поверхности [3].

Широко используемыми отвердителями для эпоксидно-диановых смол, например ЭД-20, являются полиамины: полиэтиленполиамин, изофорондиамин и др. Такие отвердители содержат первичные и (или) вторичные аминогруппы — сильные нуклеофилы. Третичные амины относятся к основному типу катализаторов полимеризации эпоксидных смол [4]. Они часто используются для отверждения смол совместно с полиаминами, что значительно ускоряет процесс отверждения, а также позволяет провести его в более мягких условиях [5]. Разработка новых полиаминных отвердителей на основе фторированных соединений является актуальной областью исследования органической химии [6].

Цель работы — получение полифторированных аминоксидов, содержащих третичную аминогруппу, и изучение их активности в реакции отверждения эпоксидной смолы ЭД-20 для расширения ряда фторированных отвердителей эпоксидных смол и установления влияния строения отвердителя на его активность.

### Экспериментальная часть

В работе использовали реактивы ООО ОРТ «Химреактивы»: свежеперегранный толуол (х.ч.), свежеперегранный ацетон (х.ч.), свежепрокаленную соль  $\text{CaCl}_2$  (ч.), соляную кислоту (32%, х.ч.), 2-(*N,N*-диметиламино)этиламин (99%, Sigma-Aldrich, кат. номер 9030), 3-(*N,N*-диметиламино)-1-пропиламин ( $\geq 95\%$ , Sigma-Aldrich, кат. номер 3680532), этиловый эфир перфторбутановой кислоты (97%, Sigma-Aldrich, кат. номер 175145), этиловый эфир перфторпентановой кислоты (97%, Sigma-Aldrich, кат. номер 396575), 2,3-эпоксипропанол (96%, Sigma-Aldrich, кат. номер G5809), эпоксидно-диановую смолу марки ЭД-20 (эпоксидное число 21.1%, ФКП «Завод им. Я. М. Свердлова»), полиэтиленполиамин (Chimex Ltd). Для определения прочности при сдвиге использовались пластины конструкционной стали марки Ст3 (ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод») и сплава алюминия Д16 (ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»).

Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{19}\text{F}$  записаны с помощью спектрометров Bruker AVANCE-500 и DRX-400. Внутренними стандартами для измерения химических сдвигов  $^1\text{H}$  и  $^{19}\text{F}$  являются  $\text{SiMe}_4$  (аналитический стандарт, для спектроскопии ЯМР, реагент ACS, Sigma-Aldrich, кат. номер 87920) и  $\text{C}_6\text{F}_6$  (99.5%, для ЯМР, реагент ACS, Sigma-Aldrich, кат. номер 326720) соответственно. Содержание элементов С, Н и N определяли с помощью элементного анализатора Perkin Elmer PE 2400, серия II CHN-O EA 1108, содержание F определяли спектрофотометрическим методом.\* ИК-спектры получены на ИК-

Фурье-спектрометре Nicolet 6700 (Thermo Scientific) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазным кристаллом в диапазоне 4000–450  $\text{см}^{-1}$ . Дифференциально-термический анализ проводили с использованием дериватографа TGA/DSC 1 (Mettler Toledo) при скорости нагрева 5 град-мин $^{-1}$  в среде аргона (60 мл·мин $^{-1}$ ). Предел прочности композиций при сдвиге ( $\sigma_{\text{сд}}$ ) определяли по ГОСТ 14759–69 «Клеи. Метод определения прочности при сдвиге» на универсальной сервогидравлической испытательной системе 8801 (Instron) с записью диаграмм нагружения. Дистиллированную воду для промывания и приготовления растворов получали с помощью электрического дистиллятора ДЭ-4 ТЗМОИ (АО «Тюменский завод медицинского оборудования и инструментов»).

*Получение аминоксидов (1a–d).* В круглодонную колбу, снабженную обратным холодильником, капельной воронкой и магнитной мешалкой, помещали 0.050 моль этилового эфира перфторбутановой или перфторпентановой кислоты и 15 мл толуола. Затем реакционную массу нагревали до кипения, прикапывали 0.055 моль 2-(*N,N*-диметиламино)этиламина или 3-(*N,N*-диметиламино)-1-пропиламина и выдерживали в течение 1 ч при 110°C. По окончании промывали массу 5%-ным раствором HCl (5 раз по 5 мл), дистиллированной водой, сушили над  $\text{CaCl}_2$  и отгоняли низкокипящие продукты до 120–122°C. Остаток перегоняли в вакууме масляного насоса и получали аминоксиды (1a–d).

*N*-(2-(Диметиламино)этил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамид (1a). Бесцветная жидкость, т. кип. 100°C при 5 мм рт. ст. Выход 73%. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1191, 1217 (C–F); 1710 (C=O); 2779, 2827, 2867, 2953, 2979 (C–H); 3341 (N–H). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  (400 МГц,  $\text{CDCl}_3$ ,  $\delta$ , м. д., *J*, Гц): 2.25 с (6H, 2 $\text{CH}_3$ ), 2.48 т (2H,  $\text{CH}_2$ , *J* = 5.9), 3.43 т (2H,  $\text{CH}_2$ , *J* = 5.9). Спектр ЯМР  $^{19}\text{F}$  (376 МГц,  $\text{CDCl}_3$ ,  $\delta$ , м. д., *J*, Гц): 34.81 м (2F,  $\text{CF}_2$ ), 41.17 кв (2F,  $\text{CF}_2$ , *J* = 8.8), 81.24 т (3F,  $\text{CF}_3$ , *J* = 8.8).

Найдено (%): С 33.70, Н 3.99, F 46.93, N 10.05.

$\text{C}_8\text{H}_{11}\text{F}_7\text{N}_2\text{O}$ . Вычислено (%): С 33.81, Н 3.90, F 46.80, N 9.86.

*N*-(3-(Диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамид (1b). Бесцветная жидкость,

\* МВИ 88-16358-95–2009. Определение массовой доли фтора в органических соединениях спектрофотометрическим методом. Центр коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений», аттестовано «Центр метрологии и сертификации «Сергимет» УрО РАН», 18.09.2009.

т. кип. 111–112°C/5 мм рт. ст. Выход 74%. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1187, 1216 (C–F); 1716 (C=O); 2789, 2828, 2868, 2953 (C–H); 3331 (N–H). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  (400 МГц,  $\text{CDCl}_3$ ,  $\delta$ , м. д.): 1.72 м (2H,  $\text{CH}_2$ ), 2.26 с (6H, 2 $\text{CH}_3$ ), 2.52 т (2H,  $\text{CH}_2$ , *J* = 5.6), 3.49 м (2H,  $\text{CH}_2$ ), 9.99 уш (С, 1H, NH). Спектр ЯМР  $^{19}\text{F}$  (376 МГц,  $\text{CDCl}_3$ ,  $\delta$ , м. д., *J*, Гц): 34.65 м (2F,  $\text{CF}_2$ ), 40.79 кв (2F,  $\text{CF}_2$ , *J* = 8.8), 81.15 т (3F,  $\text{CF}_3$ , *J* = 8.8).

Найдено (%): C 36.27, H 4.49, F 44.67, N 9.54.  
 $C_9H_{13}F_7N_2O$ . Вычислено (%): C 36.25, H 4.39, F 44.60, N 9.39.

*N*-(2-(Диметиламино)этил)-2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентанамид (1с). Желтоватая жидкость. т. кип. 102–104°C/5 мм рт. ст. Выход 79%. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $cm^{-1}$ : 1210, 1236 (C—F); 1708 (C=O); 2779, 2828, 2868, 2953 (C—H); 3342 (N—H). Спектр ЯМР  $^1H$

(400 МГц,  $CDCl_3$ ,  $\delta$ , м. д.): 2.27 с (6H, 2CH<sub>3</sub>), 2.50 т (2H, CH<sub>2</sub>,  $J = 6.0$ ), 3.43 м (2H, CH<sub>2</sub>). Спектр ЯМР  $^{19}F$  (376 МГц,  $CDCl_3$ ,  $\delta$ , м. д.,  $J$ , Гц): 35.95 м (2F, CF<sub>2</sub>), 38.36 м (2F, CF<sub>2</sub>), 41.98 м (2F, CF<sub>2</sub>), 80.97 т (3F, CF<sub>3</sub>,  $J = 9.8$ ).

Найдено (%): C 32.24, H 3.23, F 51.05, N 8.38.  
 $C_9H_{11}F_9N_2O$ . Вычислено (%): C 32.35, H 3.32, F 51.16, N 8.38.

*N*-(3-(Диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентанамид (1d). Желтоватая жидкость, т. кип. 117–119°C/5 мм рт. ст. Выход 81%. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $cm^{-1}$ : 1210, 1236 (C—F); 1713 (C=O); 2789, 2828, 2868, 2953 (C—H); 3333 (N—H). Спектр ЯМР  $^1H$

(400 МГц,  $CDCl_3$ ,  $\delta$ , м. д.,  $J$ , Гц): 1.72 м (2H, CH<sub>2</sub>), 2.26 с (6H, 2CH<sub>3</sub>), 2.53 т (2H, CH<sub>2</sub>,  $J = 5.6$ ), 3.49 м (2H, CH<sub>2</sub>), 9.97 уш. с (1H, NH). Спектр ЯМР  $^{19}F$  (376 МГц,  $CDCl_3$ ): 35.89 м (2F, CF<sub>2</sub>), 38.24 м (2F, CF<sub>2</sub>), 41.64 м (2F, CF<sub>2</sub>), 80.98 т.т (3F, CF<sub>3</sub>,  $J = 9.9$  Гц,  $J = 2.1$ ).

Найдено (%): C 34.57, H 3.76, F 49.14, N 8.09.  
 $C_{10}H_{13}F_9N_2O$ . Вычислено (%): C 34.49, H 3.76, F 49.10, N 8.05.

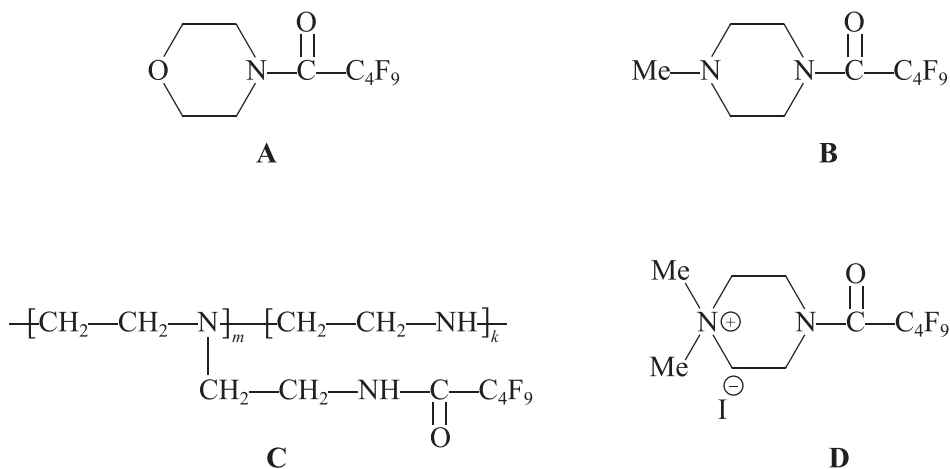
Композицию отверждали следующим способом: в емкость помещали 2.00 г эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, 0.20 г исследуемого отвердителя и перемешивали до получения однородного состава в течение 10 мин. Далее смесь помещали в тефлоновую форму для отверждения и выдерживали 5 ч при 80°C или использовали для склеивания пластин стали марки Ст3 или пластин сплава алюминиевого Д16 в течение 5 ч при 80°C.

Определение содержания растворимой фракции проводили по изменению массы отвержденных образцов до и после горячей экстракции ацетоном в течение 24 ч в аппарате Сокслета с дальнейшим просушиванием образцов до постоянной массы.

### Обсуждение результатов

Ранее [7] была изучена возможность использования в качестве отвердителей эпоксидных смол азотсодержащих производных перфторпентановой кислоты на примере ее амидов **A**, **B** и **C**, полученных из *N*-метилпиперазина, морфолина и полиэтиленimina соответственно, и фторсодержащей четвертичной аммонийной соли **D** — метилированного амида **B** (схема 1). Соединения, содержащие третичную аминогруппу, позволяют получить покрытия на основе эпоксидного клея, характеризующиеся высокой адгезией по отношению к стали и усиливающие антикоррозионные свойства клея в солянокислой среде.

Схема 1

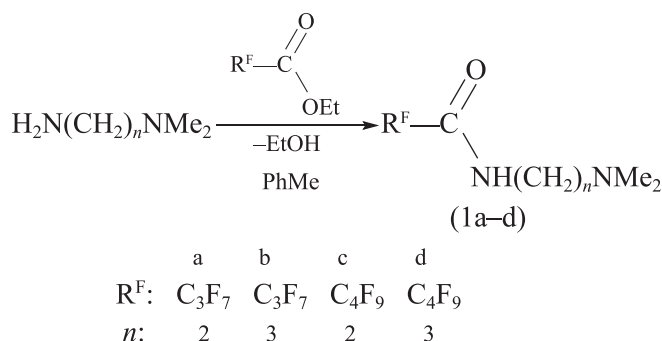


Амид **A**, не имея сильноосновного третичного атома азота, не проявил каталитической активности в реакции отверждения. Наименьшая начальная температура отверждения 57°C и степень защиты от коррозии 95% в описанных условиях были достигнуты для соединения **C** с амидной группировкой ациклического строения.

По реакции амидирования этиловых эфиров перфторированных кислот синтезирован ряд линейных аминоксидов (1a–d), содержащих третичный атом

азота (схема 2). Соединения (1a–d) использованы в качестве отвердителей эпоксидной смолы. Третичные амины относятся к основному типу катализаторов полимеризации эпоксидных смол [8]. Они часто используются для отверждения смол совместно с полиаминами, что значительно ускоряет процесс отверждения, а также позволяет провести его в более мягких условиях [9]. При этом каталитическая способность третичных аминов реализуется посредством раскрытия оксиранов в бетаины [10].

Схема 2



Для изучения раскрытия оксиранового цикла под действием полученных полифторированных аминоксидов был проведен процесс отверждения 2,3-эпоксипропанола продуктом (1b) в массовом соотношении 10:1 соответственно при 70°C в течение 24 ч. Оценку эффективности использования (1b) в качестве отвердителя проводили по изменению интенсивности полос поглощения в ИК-спектрах смеси до и после отверждения (рис. 1).

В смеси до отверждения на фоне характеристических полос поглощения 2,3-эпоксипропанола [11], соответствующих асимметричным (3062 см<sup>-1</sup>), симметричным валентным колебаниям метиленовой группы кольца (2927 см<sup>-1</sup>), вибрационным деформациям в плоскости —CH<sub>2</sub>— кольца (1484 см<sup>-1</sup>) и асимметричному растяжению связи C—O—C (907 см<sup>-1</sup>), наблюдаются полосы, характерные для связи C—F (1210 см<sup>-1</sup>), для деформационных колебаний связи N—H (1623 см<sup>-1</sup>), и полоса, соответствующая валентным колебаниям связи C=O (1720 см<sup>-1</sup>), которые сохраняются после отверждения. В ИК-Фурье-спектрах реакционной смеси после выдерживания в течение 24 ч при 70°C наблюдается исчезновение полос поглощения, свойственных для оксиранового цикла, и увеличение интенсивности полосы связи C—O—C при 1112 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует о раскрытии цикла 2,3-эпоксипропанола под действием (1b).

Существенных различий в протекании процесса термического разложения продуктов взаимодействия ЭД-20 с полученными полифторированными аминоксидами по данным термогравиметрического и дифференциального термического анализа не выявлено (рис. 2). Несмотря на то что основная деструкция происходит в интервале 350–450°C с последующим полным разложением при 450–600°C, первичная потеря массы (около 3%) начинается от 140°C для (1c) и от 200–250°C для остальных образцов. Деструкция образцов

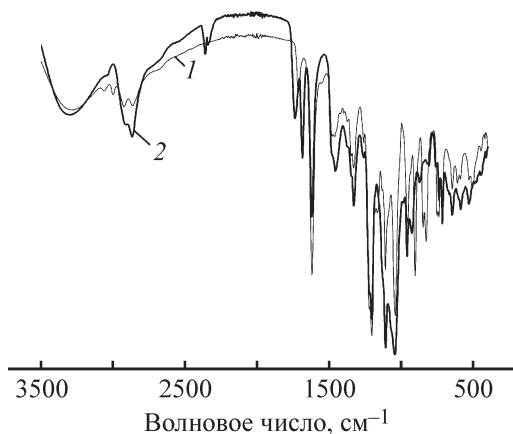


Рис. 1. ИК-спектры реакционной смеси N-(3-(диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамида с 2,3-эпоксипропанолом до (1) и после отверждения (2).

на основе (1b) и (1d) происходит с большей потерей массы за более узкий температурный промежуток.

Температурные режимы отверждения, а также структура компонентов композиции влияют на механические свойства полученных покрытий. При отверждении эпоксидной смолы, модифицированной перфторнонановой кислотой в температурном интервале 70–130°C [12], выявлено, что в случае отверждения при 70°C накопление атомов фтора на границе воздух/смола преобладает над их миграцией к поверхности металла подложки, что приводит к увеличению гидрофобности образующейся поверхности. В случае отверждения при 130°C обнаружены эквивалентные концентрации фтора на обеих границах раздела смолы, снижение свободной поверхностной энергии и диэлектрической проницаемости материала и уменьшение адгезии материала с металлом. Длинные фторированные цепи модификатора также обеспечивают миграцию атомов фтора к поверхности покрытия, но в то же время уменьшают степень сшивки смолы, что снижает ее прочность на разрыв [13]. Для оценки реакционной активности аминоамидов (1a–d) в реакции отверждения эпоксидной смолы использовали данные дифференциального термического анализа (см. таблицу). Значительные экзотермические эффекты процесса отверждения эпоксидной смолы ЭД-20 свидетельствуют о способности всех исследуемых аминоамидов (1a–d) активировать данную реакцию.

Активность соединений (1a–d) в реакции отверждения эпоксидной смолы убывает в ряду (1b) >

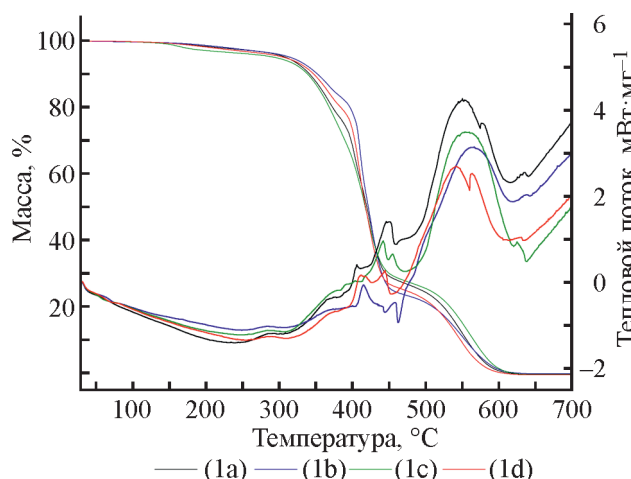


Рис. 2. Термограммы образцов эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, отвержденной *N*-(2-(диметиламино)этил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамидом (1a), *N*-(3-(диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамидом (1b), *N*-(2-(диметиламино)этил)-2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентанамидом (1c) и *N*-(3-(диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентанамидом (1d).

> (1d) ≈ (1a) > (1c): аминоамид (1b) оказался наилучшим катализатором отверждения эпоксидной смолы в данном ряду, поскольку температура начала отверждения с использованием этого соединения оказалась самой низкой — 78°C, в то время как соединения (1a) и (1d) характеризуются почти одинаковыми промежуточными значениями температур начала отверждения — 86 и 87°C соответственно, а соеди-

Содержание гель-фракции, прочность склеивания при сдвиге, данные дифференциального термического анализа процесса отверждения эпоксидной смолы ЭД-20 аминоамидами

Отвердитель	Температура начала отверждения, °C	Температура экзопика, °C	Теплота отверждения, Дж·г <sup>-1</sup>	Содержание гель-фракции, %	Прочность склеивания при сдвиге σ <sub>сд</sub> , МПа	
					сталь марки Ст3	сплав алюминия Д16
<i>N</i> -(2-(Диметиламино)этил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамид	87	110	203	89.8	9.6 ± 1.0	3.4 ± 0.5
<i>N</i> -(3-(Диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамид	78	104	166	90.5	9.7 ± 1.0	3.7 ± 0.5
<i>N</i> -(2-(Диметиламино)этил)-2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентанамид	100	130	252	75.3	7.4 ± 1.0	3.8 ± 0.5
<i>N</i> -(3-(Диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентанамид	86	108	169	85.8	11.2 ± 1.0	3.8 ± 0.5
Полиэтиленполиамин					5.3 ± 0.5	4.3 ± 0.5

нение (1с) — 100°C. На основе данных дифференциального термического анализа установлен оптимальный режим отверждения композиций: выдерживание смеси смолы и отвердителя в течение 5 ч при 80°C.

В ИК-спектрах отвержденных аминоамидами (1а–д) смол присутствует полоса поглощения оксирановых групп при 910 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует о наличии непрореагировавших эпоксидных олигомеров. Содержание доли полимера (гель-фракции) в отвержденном материале подтверждает снижение активности аминоамидов в ряду (1b) > (1d) ≈ (1a) ≈ > (1c) при отверждении смолы ЭД-20.

Способность аминоамидов (1а–д) к раскрытию оксирановой группы, по-видимому, определяется их природой: чем выше массовая доля углеводородной части и ниже содержание атомов фтора в молекуле катализатора, тем ниже температура начала теплового эффекта, что соответствует более высокой реакционной способности аминоамида как активатора отверждения. В то же время увеличение содержания F в отвердителе может приводить к снижению способности отвердителя к гомогенному смешению с эпоксидной смолой ЭД-20 и, как следствие, снижению реакционной способности.

Оценка прочности склеивания образцов стали Ст3 и образцов алюминиевого сплава Д16 эпоксидной смолой ЭД-20, отвержденной аминоамидами (1а–д), показывает, что в случае образцов стали Ст3 все синтезированные соединения обеспечивают в 2 раза более эффективное склеивание, чем полиэтиленполиамин — стандартный отвердитель (см. таблицу). В случае склеивания алюминиевого сплава Д16 эффективность, наоборот, незначительно снижается, что обусловлено большей афинностью алюминия к фтору (см. таблицу), что и обеспечивает повышение концентрации фторсодержащего соединения у поверхности склеивания, приводящее к уменьшению адгезии.

### Выводы

Синтезированные в данной работе аминоамиды на основе перфторкарбоновых кислот и N,N-диметиламиноалкиламинов способны отверждать эпоксидную смолу ЭД-20. При увеличении массовой доли углеводородной части и снижении содержания фтора в молекуле отвердителя повышается реакционная способность отвердителя и снижается температура начала теплового эффекта. Наибольшее содержание гель-фракции 90.5% обнаружено в композиции на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, отвержденной N-(3-(диметиламино)пропил)-2,2,3,3,4,4,4-гептафторбутанамидом.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН (тема АААА-А19-119012290116-9) с использованием оборудования и внутренних стандартов для измерения химических сдвигов <sup>1</sup>H и <sup>19</sup>F Центра коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений». Измерения прочности склеивания при сдвиге выполнены в рамках государственного задания Института машиноведения УрО РАН (тема АААА-А18-118020790145-0) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Пластометрия».

### Конфликт интересов

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

### Информация о вкладе авторов

Т. И. Горбунова и А. В. Пестов синтезировали ряд аминоамидов (1а–д) и провели их идентификацию; В. А. Осипова и М. А. Барабанов провели отверждение смолы ЭД-20 полученными аминоамидами, изучение отверждения 2,3-эпоксипропанола продуктом (1b), а также определили содержание гель-фракции в полученных композициях; А. В. Мехаев провел термогравиметрические исследования образцов композиции; Д. И. Вичужанин и С. В. Смирнов провели оценку прочности склеивания полученными композициями образцов металлов.

### Информация об авторах

*Осипова Виктория Александровна*,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7451-9428>

*Горбунова Татьяна Ивановна*, д.х.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4288-1988>

*Барабанов Михаил Александрович*, к.х.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5850-8443>

*Мехаев Александр Владимирович*,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9657-2243>

*Вичужанин Дмитрий Иванович*, к.т.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>

*Смирнов Сергей Витальевич*, д.т.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>

*Пестов Александр Викторович*, к.х.н., доцент,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4270-3041>

## Список литературы

- [1] Meng F., Zhang T., Liu L., Cui Y., Wang F. Failure behaviour of an epoxy coating with polyaniline modified grapheme oxide under marine alternating hydrostatic pressure // *Surf. Coat. Tech.* 2019. V. 361. P. 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.037>
- [2] Ferdosian F., Ebrahimi M., Jannesari A. Curing kinetics of solid epoxy/DDM/nanoclay: Isoconversional models versus fitting model // *Thermochim. Acta.* 2013. V. 568. P. 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.06.001>
- [3] Duan H., Xu X., Leng K., Zhang S., Han Y., Gao J., Yu Q., Wang Z. A (4-fluorophenyl)(phenyl)phosphine oxide-modified epoxy resin with improved flame-retardancy, hydrophobicity, and dielectric properties // *J. Appl. Polym. Sci.* 2021. V. 138. ID 50792. <https://doi.org/10.1002/app.50792>
- [4] Xiong X., Zhou L., Ren R., Ma X., Chen P. Thermal, mechanical properties and shape memory performance of a novel phthalide-containing epoxy resins // *Polym. J.* 2018. V. 140. P. 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.02.043>
- [5] Parildar R. A., Ibik A. A. B. Characterization of tertiary amine and epoxy functional all-acrylic coating system // *Prog. Org. Coat.* 2013. V. 76. N 6. P. 955–958. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.10.019>
- [6] Рахматуллина А. П., Сатбаева Н. С., Черезова Е. Н., Изергина А. С. Новое эпоксидное связующее на базе сложного эфира: синтез и влияние на процесс отверждения эпоксиаминных композиций // *ЖПХ.* 2020. Т. 93. № 2. С. 181–186. <https://doi.org/10.31857/S0044461820020048> [Rakhmatullina A. P., Satbaeva N. S., Cherezova E. N., Izergina A. S. New complex epoxy ester resin-based binder: Synthesis and influence on the curing process of epoxyamine compositions // *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. V. 93. N 2 P. 182–187. <https://doi.org/10.1134/S1070427220020044>].
- [7] Пестов А. В., Пузырев И. С., Мехаев А. В., Горбунова Т. И., Салоутин В. И., Смирнов С. В., Вичужанин Д. И., Матафонов П. П. Модифицирование адгезивных материалов на основе эпоксидных олигомеров фторсодержащими органическими соединениями // *ЖПХ.* 2014. Т. 87. № 4. С. 482–487 [Pestov A. V., Puzyrev I. S., Mekhaev A. V., Gorbunova T. I., Saloutin V. I., Smirnov S. V., Vichuzhanin D. I., Matafonov P. P. Modification of adhesive materials based on epoxy oligomers with fluorinated organic compounds // *Russ. J. Appl. Chem.* 2014. V. 87. P. 474–479. <https://doi.org/10.1134/S10704272140400132>].
- [8] Xiong X., Zhou L., Ren R., Ma X., Chen P. Thermal, mechanical properties and shape memory performance of a novel phthalide-containing epoxy resins // *Polym. J.* 2018. V. 140. P. 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.02.043>
- [9] Parildar R. A., Ibik A. A. B. Characterization of tertiary amine and epoxy functional all-acrylic coating system // *Prog. Org. Coat.* 2013. V. 76. N 6. P. 955–958. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.10.019>
- [10] López-Barajas F., Ramos-DeValle L. F., Sánchez-Valdes S., Ramírez-Vargas E., Martínez-Colunga G., Espinoza-Martínez A. B., Flores-Gallardo S., Mendez-Nonell J., Morales-Cepeda A. B., Lozano-Ramirez T., Beltrán-Ramírez F. I. Curing kinetics of diglycidyl ether of Bisphenol-A epoxy system using a tertiary amine, through the study of its rheometric characteristics // *Polym. Test.* 2019. V. 73. P. 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.043>
- [11] Arjunan V., Rani T., Santhanam R., Mohan S. Structural characteristics and harmonic vibrational analysis of the stable conformer of 2,3-epoxypropanol by quantum chemical methods // *Spectrochim. Acta. A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 2012. V. 96. P. 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.05.012>
- [12] Rolere S., Coulon J.-F., Poncin-Epaillard F. Influence of the curing temperature on the diffusion rate of the perfluorinated alkyl chains of a modified epoxy resin // *Eur. Polym. J.* 2017. V. 91. P. 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.03.053>
- [13] Tan J., Liu W., Wang Z. Hydrophobic epoxy resins modified by low concentrations of comb-shaped fluorinated reactive modifier // *Prog. Org. Coat.* 2017. V. 105. P. 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.01.018>