

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-35-45

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ 2,2-БИС(4-ЦИАНАТОФЕНИЛ)ПРОПАНА

М.А. Лаврин¹, А.Л. Шошева¹, Г.Б. Эльдяева¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования модификации 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана каталитической системой с целью снижения его температуры формования. Описана методика синтеза и термообработки. Показано влияние температуры отверждения и концентрации ацетилацетоната кобальта (III), а также 4-нонилфенола, применяемого в качестве растворителя, на скорость полимеризации 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана, степень конверсии, а также температуру стеклования отвержденной полимерной матрицы.

Ключевые слова: 2,2-бис(4-цианатофенил)пропан, ацетилацетонат кобальта (III), 4-нонилфенол, термореактивные полимерные связующие, циклотримеризация

Для цитирования: Лаврин М.А., Шошева А.Л., Эльдяева Г.Б. Исследование каталитического отверждения 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-35-45.

Scientific article

RESEARCH OF THE 2,2-BIS(4-CYANATOPHENYL)PROPANE CATALYTIC POLYMERIZATION

M.A. Lavrin¹, A.L. Shosheva¹, G.B. Eldyaeva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. In this article the results study of modification of the 2,2-bis(4-cyanatophenyl)propane by catalytic system in order to reduce the cure temperature are presented. The methods of synthesis and heat treatment are described. The influence of curing temperature and the concentration of tris(acetylacetonato)cobalt (III), as well as 4-nonylphenol, using as solvent, on the polymerization rate of 2,2-bis(4-cyanatophenyl)propane, degree of conversion and glass transition temperature of the cured polymer matrix is shown.

Keywords: 2,2-bis(4-cyanatophenyl)propane, tris(acetylacetonato)cobalt (III), 4-nonylphenol, thermosetting polymer resin, cyclotrimerization

For citation: Lavrin M.A., Shosheva A.L., Eldyaeva G.B. Research of the 2,2-bis(4-cyanatophenyl)propane catalytic polymerization. *Trudy VIAM*, 2025, no. 1 (143), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-35-45.

Введение

Интерес к термостойким связующим обусловлен их особыми свойствами – сочетанием повышенной теплостойкости, термоокислительной стабильности и высокой прочности. Один из классов термостойких связующих – циановые эфиры, которые находят широкое применение в аэрокосмической отрасли, а также в микроэлектронике. В структуре мономера цианового эфира содержатся реакционноспособные циановые группы, которые гомополимеризуются по реакции циклотримеризации с образованием полициануратной полимерной сетки триазиновых циклов. Полициануратная полимерная сетка сочетает высокую температуру стеклования ($>250\text{ }^{\circ}\text{C}$), низкую диэлектрическую проницаемость (2,5–3,2), радиопрозрачность и огнестойкость [1–13].

Реакция отверждения цианэфирных связующих протекает путем взаимодействия мономеров циановых эфиров, которое основано на способности цианэфирных функциональных групп реагировать между собой с формированием триазинового кольца. Реакция циклотримеризации с образованием сшитых полимеров – полициануратов, осуществляется по схеме, представленной на рис. 1, где R – различные ароматические и элементоорганические радикалы [14, 15].

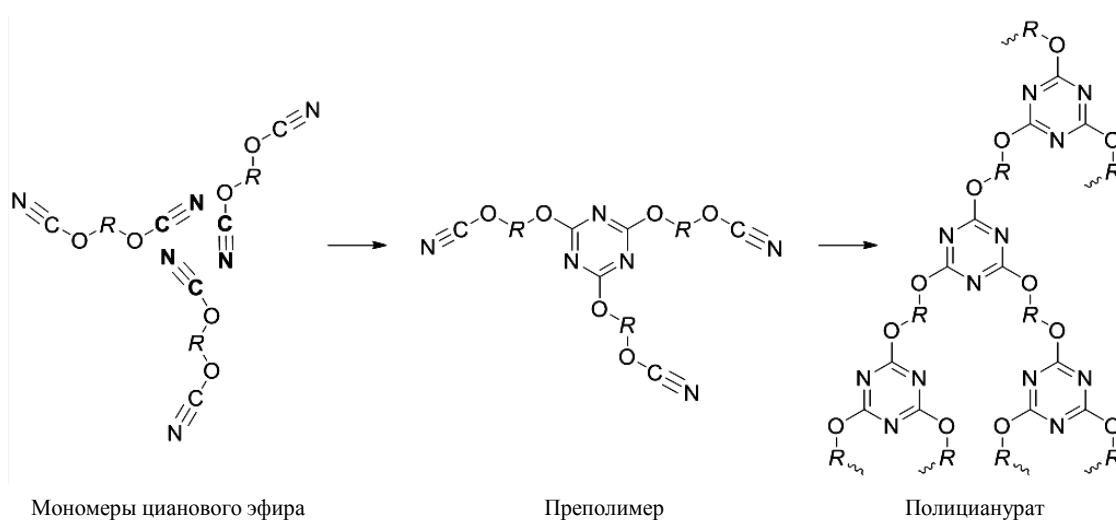


Рис. 1. Схема реакции циклотримеризации мономеров цианового эфира

Реакция циклотримеризации протекает при температуре $170\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и имеет автокаталитический характер, а также катализируется примесями непрореагировавшего фенола, который содержится в исходных компонентах цианэфирных связующих. Для ускорения реакции циклотримеризации и снижения температуры реакции отверждения используют такие катализаторы, как карбоксилаты и хелатные соединения переходных металлов [16–20].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [21].

Материалы и методы

Наибольшее практическое применение в синтезе цианэфирных связующих получили мономеры на основе бисфенолов различного строения. В данной работе использовали один из самых широко применяемых мономеров: 2,2-бис(4-цианатофенил)пропан (ЦФП), структурная формула которого представлена на рис. 2.

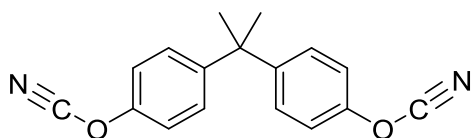


Рис. 2. Структурная формула 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана

Широко известно использование органометаллических соединений в качестве катализаторов реакции циклотримеризации. Наиболее применяемыми катализаторами являются ацетилацетонаты металлов переходных групп. В качестве объектов исследования в данной работе использовали композиции на основе мономера ЦФП, катализатора ацетилацетоната кобальта (III) (далее – $(acac)_3Co$) и растворителя 4-нонилфенола. Ацетилацетонат кобальта (III) вводили в 2,2-бис(4-цианатофенил)пропан в растворенном виде. Катализатор $(acac)_3Co$ плохо растворяется в циановых мономерах, поэтому в качестве растворителя использовали 4-нонилфенол, который также проявляет каталитическую активность. Приготовили растворы $(acac)_3Co$ в 4-нонилфеноле с концентрациями: 2,4; 3,6; 6,0 и 12,0 %.

Кажущуюся вязкость по Брукфильду определяли в соответствии с ГОСТ 25271–93.

Тепловые эффекты реакции измеряли с помощью дифференциального сканирующего калориметра – испытания проводили при нагреве от 25 до 350 °С со скоростью 5 и 10 °С/мин по ГОСТ 56755–2015.

Температуру стеклования отвержденных образцов определяли методом термомеханического анализа по ГОСТ 56723–2015 в интервале температур от 25 до 300 °С со скоростью сканирования 5 °С/мин.

Результаты и обсуждение

В данной работе исследовали каталитические свойства катализатора ацетилацетоната кобальта (III), а также растворителя 4-нонилфенола по отношению к 2,2-бис(4-цианатофенил)пропану.

На рис. 3 представлены кривые ДСК для олигомеризованного образца 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана и композиции на основе олигомеризованного ЦФП с катализатором $(acac)_3Co$ в количестве 5,05 мкмоль на 1 г состава (см. таблицу).

Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) измерений неотвержденных образцов с тепловым эффектом 724,1 Дж/г

Образец	Температурный интервал пика ДСК, °С		
	Начало	Пик	Конец
Немодифицированный	260	304	331
Модифицированный	145	163	182

На кривой немодифицированного ЦФП (рис. 3, а) наблюдается широкий экзотермический пик в диапазоне температур от 210 до 360 °С с максимумом при 304 °С. Тепловой эффект, по данным ДСК, составляет 724 Дж/г.

Кривые ДСК модифицированных образцов 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана с различным содержанием катализатора имеют схожий вид (рис. 3, б), значительно отличающийся от кривой немодифицированного ЦФП (рис. 3, а). На рис. 3, б представлена кривая ДСК модифицированного ЦФП с добавлением 5%-ного раствора ацетилацетоната

кобальта (III) с концентрацией 3,6 % и содержащего 5,05 мкмоль $(\text{acac})_3\text{Co}$ на 1 г состава. Благодаря наличию катализатора в системе экзотермический пик обладает более узким профилем, а также смещен в область более низких температур. Температура пика начала реакции начинается при 130 °С, имеет максимум при 163 °С и широкое «плечо» – до 360 °С. Тепловой эффект совпадает с тепловым эффектом немодифицированного образца и также составляет 724 Дж/г.

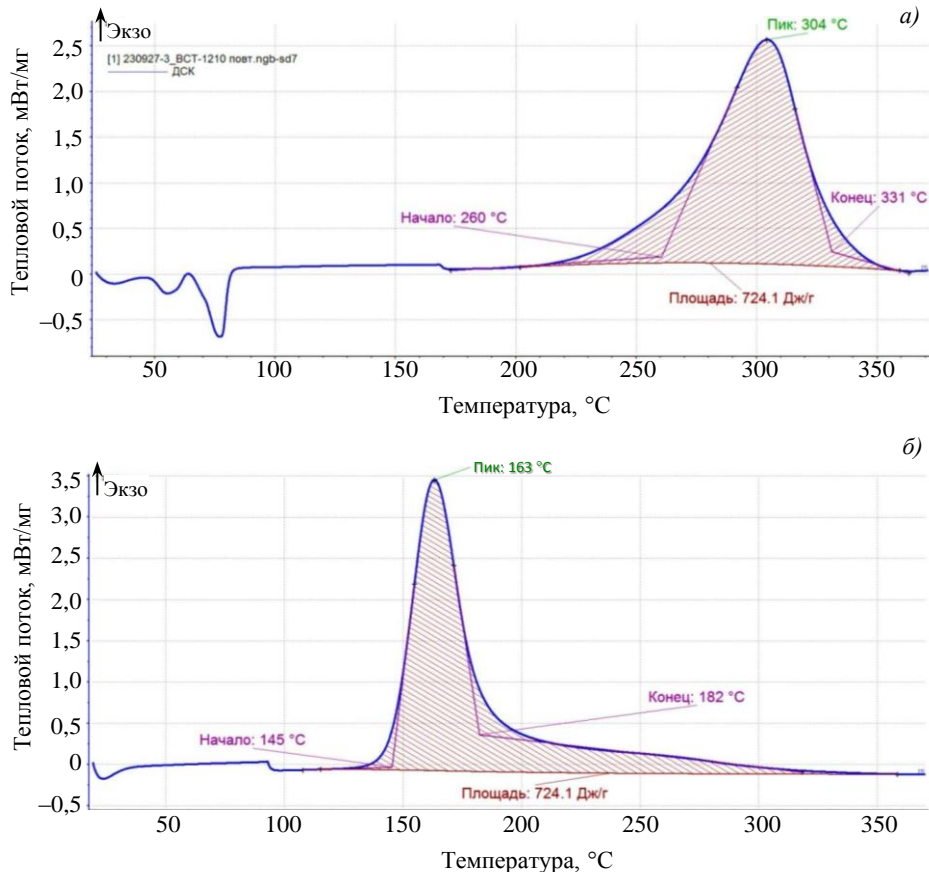


Рис. 3. Кривые ДСК 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана (ЦФП) немодифицированного (а) и модифицированного ацетилацетонатом кобальта (III) (б)

Основная цель использования катализатора – увеличение скорости химической реакции, а также снижение температуры ее протекания. О скорости реакции судили по зависимости продолжительности гелеобразования при изотермической выдержке при температуре 120 °С.

Сравнение изотерм вязкости для немодифицированных и модифицированных катализатором образцов представлено на рис. 4. Видно, что при температуре 120 °С вязкость исходного образца за 2 ч изменилась незначительно, в то время как вязкость образца с катализатором начала нарастать, начиная с 20 мин, и через 56 мин после начала эксперимента составляла 17 Па·с. При проведении дальнейших исследований время достижения вязкости 15 ± 2 Па·с считалось временем гелеобразования.

Увеличение концентрации катализатора приводит к уменьшению времени до начала активного роста вязкости системы при 120 °С (рис. 5) и, как следствие, уменьшению времени гелеобразования. При увеличении содержания катализатора с 3,37 до 8,42 мкмоль/г время гелеобразования пропорционально уменьшается с 68 до 42 мин.

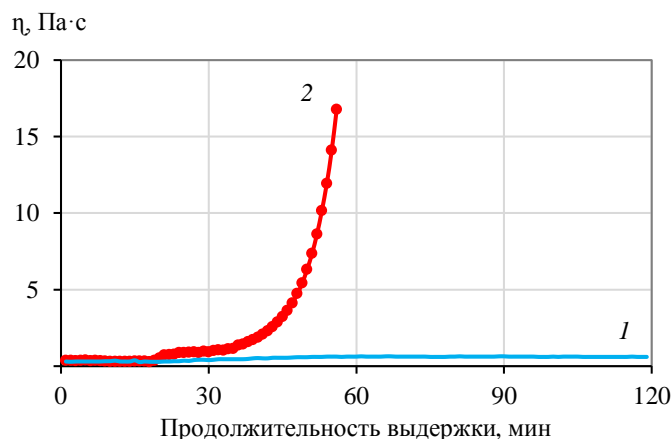


Рис. 4. Зависимости кажущейся вязкости η от продолжительности выдержки при температуре 120 °С немодифицированного (1) и модифицированного (2) образцов 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана с концентрацией ацетилацетоната кобальта (III) 5,05 мкмоль на 1 г состава

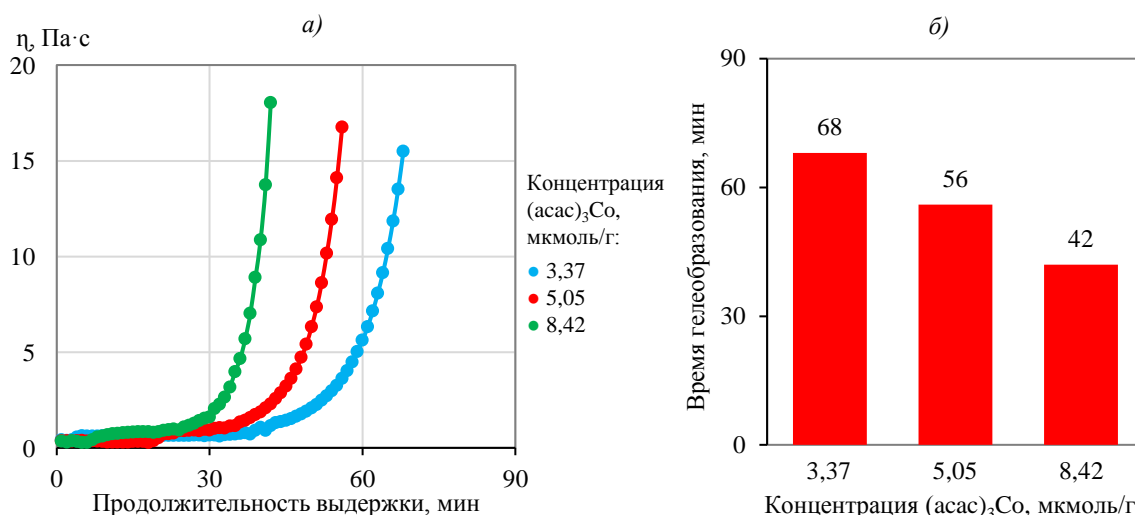


Рис. 5. Зависимости кажущейся вязкости η от продолжительности выдержки (а) и времени гелеобразования при температуре 120 °С (б) модифицированных образцов 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана с различной концентрацией ацетилацетоната кобальта (III)

Помимо влияния концентрации катализатора на время гелеобразования, исследовали также влияние растворителя 4-нонилфенола на скорость реакции при одинаковых содержаниях катализатора (асас)₃Со. В качестве фиксированной концентрации катализатора выбрали содержание ацетилацетоната кобальта (III), равное 5,05 мкмоль на 1 г состава.

Из представленных изотерм вязкости (рис. 6) можно сделать вывод, что при одинаковых концентрациях соли трехвалентного кобальта скорость гелеобразования также изменяется в зависимости от количества 4-нонилфенола. При содержании 4-нонилфенола, равном 1,5 %, время гелеобразования составляет 84 мин. При увеличении содержания 4-нонилфенола оно уменьшается и при концентрации, равной 10 %, составляет 32 мин.

Видно, что варьирование концентрации катализатора ацетилацетоната кобальта (III) в составе, а также изменение содержания 4-нонилфенола оказывают существенное влияние на время до начала активного возрастания вязкости 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана и, следовательно, на скорость полимеризации.

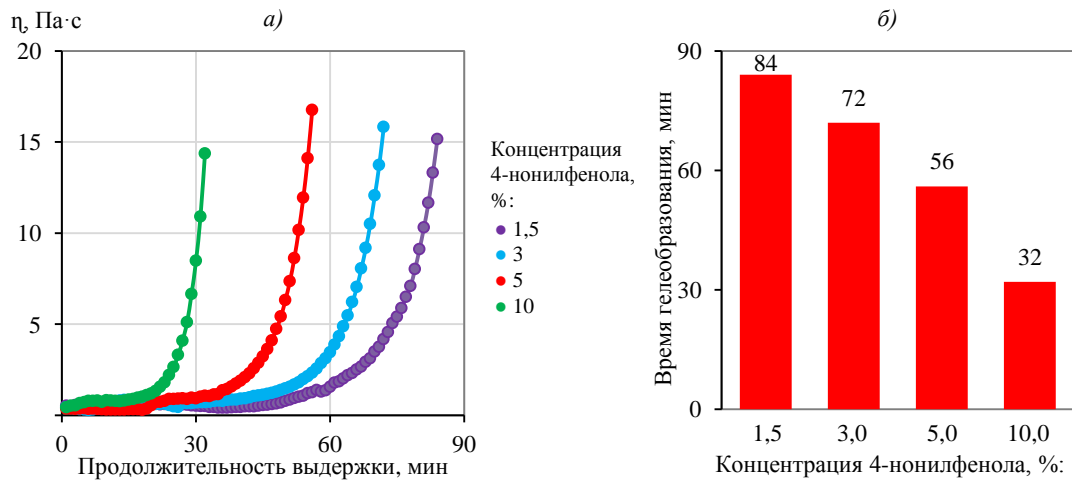


Рис. 6. Зависимости кажущейся вязкости η от продолжительности выдержки (а) и времени гелеобразования при температуре 120 °С (б) модифицированных образцов 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана с различной концентрацией 4-нонилфенола

Далее рассмотрим такие характеристики отвержденных связующих, как степень конверсии (а также связанный с ней остаточный тепловой эффект) и температура стеклования. Полученные композиции отверждали в термошкафу при температурах 120, 160, 180, 200 и 220 °С, которые изменяли и повышали последовательно.

Степень конверсии (или степень отверждения) – одна из главных характеристик отвержденного термореактивного связующего. Для определения степени конверсии отвержденные образцы исследовали методом ДСК. По площадям под кривыми высчитывали остаточный тепловой эффект, который соотносили с тепловым эффектом неотвержденного образца.

Следует отметить, что при отверждении исходного 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана без добавления раствора катализатора при температурах до 220 °С удалось получить максимальную конверсию на уровне 92–94 %. Значение температуры стеклования при этом составило 226–232 °С.

На рис. 7, а представлены значения степени отверждения для образцов ЦФП, содержащих по 5 % растворов катализатора с концентрациями 2,4; 3,6 и 6,0 %, с содержанием $(\text{асас})_3\text{Со}$: 3,37; 5,05 и 8,42 мкмоль/г соответственно. Образцы отверждали последовательно при температурах 120, 180, 200, 220 °С в течение 2 ч при каждой температуре.

Видно, что степень конверсии образцов увеличивается при повышении температуры термообработки при любом содержании катализатора. При этом приросты схожи между собой. Существеннее всего это проявляется при переходе от температуры 120 к 180 °С. Дальнейшее повышение температуры отверждения до 200 и 220 °С оказывает меньшее влияние на степень полимеризации.

В отличие от скорости полимеризации и времени до ее начала в системах, модифицированных раствором катализатора, значения степени отверждения не имеют строгой зависимости от концентрации катализатора $(\text{асас})_3\text{Со}$. Для всех образцов, отвержденных при температуре 120 °С, степень отверждения составляет от 65 до 69 %, при температуре 220 °С степень полимеризации превышает 98 %.

Значения степени отверждения образцов, содержащих 5,05 мкмоль/г ацетилацетоната кобальта (III) и от 1,5 до 10 % 4-нонилфенола, представлены на рис. 7, б. Для всех образцов при повышении температуры термообработки наблюдается схожая зависимость, аналогичная предыдущей (рис. 7, а). Повышение температуры приводит к увеличению конверсии полученных образцов. При температуре 220 °С для всех образцов

реализуется степень полимеризации не менее 96 %. Исключением является образец, содержащий в своем составе 10 % 4-нонилфенола, – конверсия, превышающая 99 %, реализуется уже при температуре 180 °С.

При одинаковых температурах отверждения при повышении содержания растворителя и постоянном содержании катализатора степень полимеризации увеличивается. Повышение концентрации 4-нонилфенола с 1,5 до 10 % при температуре 120 °С приводит к росту степени конверсии образцов с 59 до 79 %, а при 220 °С – с 96 до 99 %.

Таким образом, при 5%-ном содержании 4-нонилфенола и любой из трех представленных концентраций катализатора (рис. 7, а) степень полимеризации модифицированных образцов ЦФП, аналогичная немодифицированным, достигается при отверждении до температуры 180 °С. При фиксированной концентрации $(\text{acac})_3\text{Co}$, равной 5,05 мкмоль/г, и содержании нонилфенола на уровне 5 % или выше также достигается значение степени конверсии, сравнимое или превышающее исходное.

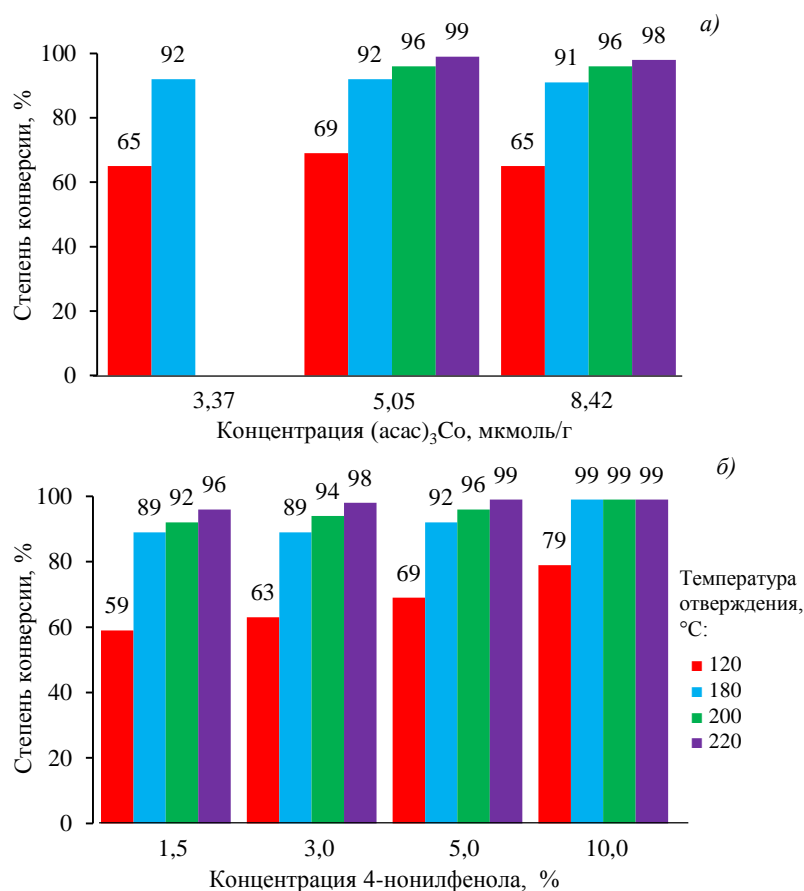


Рис. 7. Зависимости степени конверсии модифицированного 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана от концентрации ацетилацетоната кобальта (III) (а) и содержания 4-нонилфенола (б)

Температура стеклования – важный параметр для любого полимерного композиционного материала. Этот параметр определяет многие конструкционные возможности материала, в том числе температуру эксплуатации. На рис. 8, а представлены результаты измерения температуры стеклования полученных отвержденных образцов ЦФП с концентрациями ацетилацетоната кобальта (III) от 3,37 до 8,42 мкмоль/г. Следует отметить, что значения температур стеклования после отверждения чистого ЦФП при температуре 220 °С составляют 226–232 °С.

При различных содержаниях катализатора (аналогично ранее приведенным зависимостям) температура стеклования образцов увеличивается при повышении температуры

термообработки, что согласуется с увеличением степени полимеризации. Образцы, прошедшие термообработку при 120 °С, демонстрируют увеличение температуры стеклования при повышении содержания катализатора. Схожая тенденция наблюдается и при дальнейшем увеличении температуры отверждения и концентрации ацетилацетоната кобальта (III).

Отвержденные при температуре 200 °С модифицированные образцы 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана демонстрируют температуру стеклования на уровне немодифицированного ЦФП, отвержденного при температуре 220 °С. Модифицированные образцы, отвержденные при температуре 220 °С, обладают даже большей температурой стеклования, которая составляет 236–238 °С, что также связано с увеличением конверсии по сравнению с немодифицированными образцами (рис. 8, а).

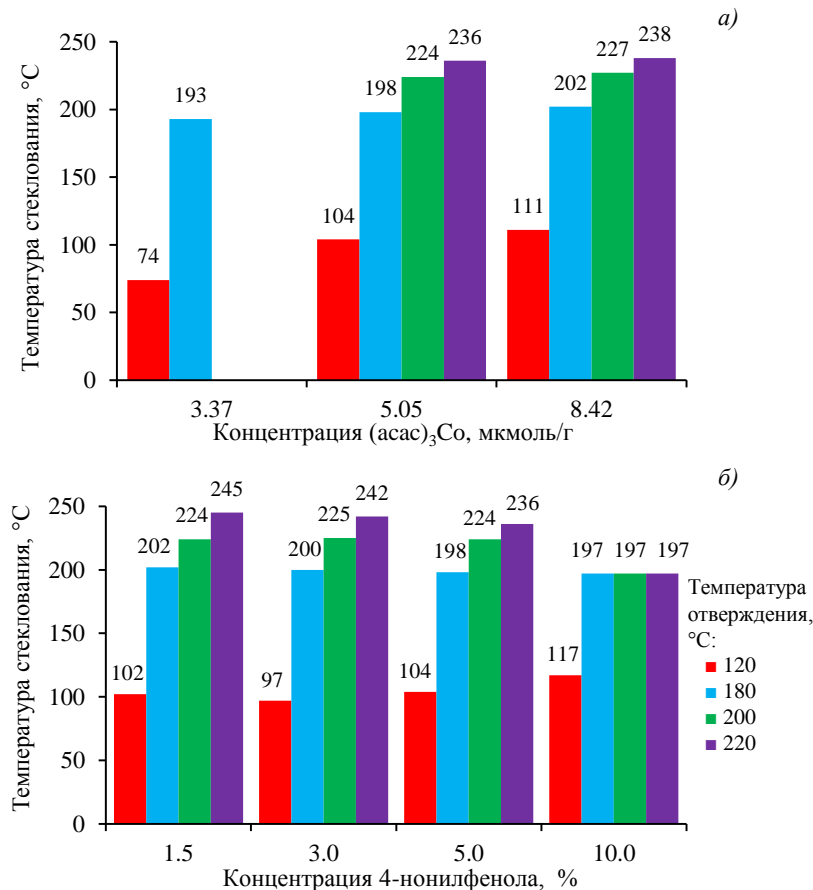


Рис. 8. Зависимости температуры стеклования модифицированного 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана от концентрации ацетилацетоната кобальта (III) (а) и содержания 4-нонилфенола (б)

Результаты определения температур стеклования модифицированных образцов с различным содержанием 4-нонилфенола представлены на рис. 8, б. Повышение температуры отверждения также увеличивает конечную температуру стеклования, что совпадает с предыдущими зависимостями, выявленными ранее, однако для образцов, содержащих 10 % 4-нонилфенола, температура стеклования достигает своего максимума уже при температуре 180 °С, и дальнейшее повышение температуры отверждения не приводит к существенным изменениям.

Образцы, содержащие от 1,5 до 5 % растворителя-катализатора, после отверждения при температуре 120 °С демонстрируют схожие температуры стеклования в интервале температур от 97 до 104 °С. При концентрации 4-нонилфенола, равной 10 %, наблюдается ее увеличение до 117 °С.

После отверждения при температуре 180 °С на образцах наблюдается плавное снижение температуры стеклования с 202 до 197 °С. Наиболее существенно данная тенденция проявляется при повышении температур термообработки до 200–220 °С. При температуре 200 °С и концентрации от 1,5 до 5 % итоговые результаты измерения температуры стеклования практически не различаются между собой, однако при повышении содержания растворителя с 5 до 10 % наблюдается резкое ее снижение с 224 до 197 °С. Аналогичное плавное снижение температуры стеклования с 245 до 236 °С с дальнейшим резким ее падением до 197 °С присутствует и при 220 °С. Следует отметить, что температуры стеклования, схожие с аналогичной температурой немодифицированного ЦФП, реализуются для образцов с любым содержанием 4-нонилфенола – от 1,5 до 10 %, отвержденных при температуре 200 °С. Таким образом, можно сделать вывод, что 4-нонилфенол оказывает каталитический эффект при полимеризации и также является пластификатором, снижающим температуру стеклования.

Заключения

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что увеличение концентрации катализатора ацетилацетоната кобальта (III) и растворителя 4-нонилфенола в составе композиции на основе 2,2-бис(4-цианатофенил)пропана приводит к сокращению времени гелеобразования и увеличению скорости циклотримеризации.

Увеличение содержания $(\text{acac})_3\text{Co}$ с 3,37 до 8,42 мкмоль/г не оказывает существенного влияния на степень полимеризации отвержденных образцов, но повышает конечную температуру стеклования на 2–4 °С при всех температурах отверждения. В то же время увеличение содержания 4-нонилфенола с 1,5 до 10 % приводит к повышению степени отверждения и снижению температуры стеклования отвержденных образцов, что указывает на его пластифицирующие свойства.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
2. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Долгова Е.В., Лаврова К.С. Применение материалов на основе циановых эфиров (обзор). Часть 1. Авиационная и космическая техника // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 04. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-48-60.
6. Гусева М.А. Циановые эфиры – перспективные термореактивные связующие (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50.
7. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
8. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 260–265.
9. Долгова Е.В. Применение материалов на основе циановых эфиров (обзор). Часть 2. Микроэлектроника, 3D-печать, защита от ионизирующего излучения // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 12. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-139-156.

10. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
11. Шошева А.Л., Ахмадиева К.Р., Валуева М.И., Начаркина А.В. Бисмалеинимидные связующие (обзор). Часть 2 // *Труды ВИАМ*. 2023. № 7 (125). Ст. 04. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-34-55.
12. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург, 2016. С. 25–26.
13. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide-Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose // *Polymer Science. Ser.: D*. 2017. Vol. 10. No. 3. P. 225–229.
14. Kessler M.R. Cyanate Ester Resins // *Wiley Encyclopedia of Composites*. Second Ed. John Wiley & Sons, 2012. P. 1–14.
15. Bauer M., Bauer J. Aspects of the kinetics, modeling and simulation of network build-up during cyanate ester cure // *Chemistry and Technology of Cyanate Ester Resins* / Ed. I. Hamerton. Chapman & Hall, 1994. P. 58–86.
16. Панкратов В.А., Виноградова С.В. Политриазины // *Успехи химии*. 1972. Т. XLI. № 1. С. 117–149.
17. Аристов В.Ф., Халиманович В.И., Миронович В.В., Ислентьева Т.А., Гуров Д.А. Цианатэфирные связующие в аэрокосмической отрасли. Каталитические свойства органометаллических комплексов и солей диазония с комплексными анионами в отверждении цианатэфирных связующих // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 2 (48). С. 159.
18. Аншин В.С. Цианатэфирные мономеры и олигомеры. Обзор современного состояния исследований и перспективы развития // *Высокомолекулярные соединения. Сер.: Б*. 2022. Т. 64. № 3. С. 163–196.
19. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 2. С. 38–42.
20. Коршак В.В. Основные особенности полициклотримеризации // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 1974. Т. XVI. № 5. С. 926–941.
21. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

References

1. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
2. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
3. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing are the basis of innovations. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Dolgova E.V., Lavrova K.S. Application of cyanate ester materials (review). Part 1. Aviation and space structures. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-48-60.
6. Guseva M.A. Cyanic esters are prospective thermosetting binders (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50.
7. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 158–167.

8. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Kim M.A., Babin A.N. Melt binding for perspective methods of production of PCM of new generation. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 260–265.
9. Dolgova E.V. Application of cyanate ester materials. Part 2. Microelectronics, 3D printing, radiation protection. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-139-156.
10. Tkachuk A.I., Donetskyy K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
11. Shosheva A.L., Ahmadiyeva K.R., Valueva M.I., Nacharkina A.V. Bismaleimide resins (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-34-55.
12. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg, 2016, pp. 25–26.
13. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide-Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose. *Polymer Science. Ser.: D*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 225–229.
14. Kessler M.R. Cyanate Ester Resins. *Wiley Encyclopedia of Composites*. Second Ed. John Wiley & Sons, 2012, pp. 1–14.
15. Bauer M., Bauer J. Aspects of the kinetics, modeling and simulation of network build-up during cyanate ester cure. *Chemistry and Technology of Cyanate Ester Resins*. Ed. I. Hamerton. Chapman & Hall, 1994, pp. 58–86.
16. Pankratov V.A., Vinogradova S.V. Polytriazines. *Uspekhi khimii*, 1972, vol. XLI, no. 1, pp. 117–149.
17. Aristov V.F., Khalimanovich V.I., Mironovich V.V., Isentyeva T.A., Gurov D.A. Cyanate-ether binders in the aerospace industry. Catalytic properties of organometallic complexes and diazonium salts with complex anions in the curing of cyanate ether binders. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2 (48), p. 159.
18. Anshin V.S. Cyanate ether monomers and oligomers. Review of the current state of research and development prospects. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: B*, 2022, vol. 64, no. 3, pp. 163–196.
19. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. New polymeric binding for perspective methods of manufacturing of constructional fibrous PCM. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2011, no. 2, pp. 38–42.
20. Korshak V.V. Main features of polycyclotrimerization. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: A*, 1974, vol. XVI, no. 5, pp. 926–941.
21. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Лаврин Максим Александрович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шошева Анфиса Львовна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Эльдеева Галина Борисовна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maxim A. Lavrin, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anfisa L. Shosheva, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Galina B. Eldyayeva, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.09.2024.
The article was submitted 13.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.09.2024.