

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЛАВНОГО ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-62 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИОННОГО ЗНАЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ***П.А. Кузнецова<sup>1</sup>, А.И. Ткачук<sup>1</sup>, А.С. Любимова<sup>1</sup>, Г.Б. Эльдяева<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** Представлены теплофизические и физико-механические показатели однокомпонентного эпоксидного связующего марки ВСЭ-62, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Приведены значения температуры стеклования связующего, кинетические кривые процесса отверждения при разных скоростях нагрева образца, график продолжительности гелеобразования и значения предела прочности при статическом изгибе. Показаны результаты реологических испытаний в изотермическом и динамическом режимах. Низкие значения вязкости связующего и длительная жизнеспособность при повышенных температурах позволяют использовать связующее для изготовления различных изделий из полимерных композиционных материалов методами пропитки под давлением и вакуумной инфузии.

**Ключевые слова:** эпоксидные связующие, однокомпонентное связующее марки ВСЭ-62, жизнеспособность, вакуумная инфузия, полимерные композиционные материалы

**Для цитирования:** Кузнецова П.А., Ткачук А.И., Любимова А.С., Эльдяева Г.Б. Характеристики расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-62 для изготовления высоконагруженных деталей конструкционного значения инъекционными методами // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53.

Scientific article

**CHARACTERISTICS OF THE MOLTEN EPOXY RESIN SYSTEM VSE-62, PROCESSED BY THE INJECTION METHODS, FOR THE MANUFACTURE OF HIGHLY LOADED STRUCTURAL POLYMER COMPOSITE MATERIALS***P.A. Kuznetcova<sup>1</sup>, A.I. Tkachuk<sup>1</sup>, A.S. Lyubimova<sup>1</sup>, G.B. Eldjaeva<sup>1</sup>*

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

**Abstract.** In the present work, the thermophysical and physico-mechanical characteristics of a molten epoxy resin system VSE-62, developed in SIC «Kurchatov Institute» – VIAM, are considered. The value of the glass transition temperature of the system, the kinetic parameters of the curing process with a different speed of the heating, the plot of the gelation time and flexural strength are given. The results of rheological tests in isothermal and dynamical modes are shown. The low viscosity of the system and long-term viability at high temperatures allows it to be used for the manufacture of various polymer composite materials by resin transfer moulding and vacuum assisted resin transfer moulding.

**Keywords:** epoxy resin system, one component epoxy resin system VSE-62, vacuum assisted resin transfer moulding, polymer composite material, gelation time

*For citation:* Kuznetcova P.A., Tkachuk A.I., Lyubimova A.S., Eldjaeva G.B. Characteristics of the molten epoxy resin system VSE-62, processed by the injection methods, for the manufacture of highly loaded structural polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53.

### Введение

В настоящее время наиболее перспективным направлением в развитии материаловедения являются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Одно из главных их достоинств по сравнению с остальными материалами – это сочетание свойств [1–3]. Изделия, изготовленные из ПКМ, обладают высокой коррозионной стойкостью и имеют небольшую массу, что является существенными преимуществами для их использования в таких отраслях промышленности, как авиационная, судостроительная и транспортная. Применение композитов в авиационной сфере с каждым годом стремительно увеличивается. Получение новых ПКМ с улучшенными свойствами способствует созданию деталей, которые не могут быть изготовлены из обычных материалов. Использование деталей, полученных из ПКМ за один технологический цикл, позволяет заменить сборочные детали, что приводит к уменьшению показателя трудоемкости [4].

При разработке ПКМ одним из наиболее важных этапов является подбор полимерного связующего. Полимерная матрица отвечает за термомеханические и эксплуатационные характеристики готового композита. При выборе связующего необходимо ориентироваться не только на прочностные характеристики готового материала, но и на жизнеспособность связующего в процессе переработки, реологические характеристики при различных температурах и экологическую безопасность. Эти показатели необходимы для корректного выбора способа переработки связующего в ПКМ и получения изделий с требуемыми свойствами [5].

В мировом производстве используют различные технологии изготовления изделий из ПКМ, наиболее распространенными из которых являются контактное формование, намотка (сухая и мокрая), препреговые (прессование, автоклавное и вакуумное формование) и инжекционные методы [6, 7].

Технология контактного формования представляет собой достаточно простой по аппаратурно-технической составляющей метод. Его преимуществами являются невысокая стоимость необходимого оборудования и возможность изготовления изделий различных форм. Существенные недостатки данной технологии – высокая трудоемкость и невозможность точного контроля над параметрами формирующегося изделия (количество связующего, наличие пор и др.) [8].

Метод намотки позволяет использовать как препреги, так и непропитанные волокнистые наполнители. Основной особенностью технологии является то, что конечная форма изделия зависит от вращения оснастки. Высокий уровень производительности процесса и возможность изготовления крупногабаритных деталей являются преимуществами данного метода, однако при его использовании необходимо дорогостоящее оборудование [9, 10].

К препреговым технологиям относятся прессование и автоклавное формование, особенность которых состоит в том, что первоначально получают препрег, после чего его раскраивают под требуемые размеры, выкладывают в оснастку и начинают процесс формования [11, 12].

Автоклавное формование позволяет получать изделия различной геометрической формы, с точными линейными параметрами и высокими физико-механическими характеристиками, одинаковыми для всего изделия [13, 14]. Однако эта технология – капиталоемкий и трудозатратный процесс ввиду необходимости использования дорогостоящих

аппаратурного оснащения и расходных материалов, а также за счет высоких энергозатрат. Это приводит к уменьшению доли материалов, полученных данным методом, на мировом рынке.

При безавтоклавных технологиях процессы совмещения наполнителя со связующим и формование происходят за одну технологическую операцию [15]. К ним относятся вакуумное формование препрегов и инъекционные методы, такие как RTM (Resin Transfer Moulding – пропитка под давлением) и VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding – вакуумная инфузия). Основными преимуществами этих технологий являются [16–18]:

- уменьшение трудоемкости;
- невысокие затраты на оборудование и расходные материалы;
- возможность изготовления деталей сложной формы;
- снижение отходов производства.

Инъекционные методы нашли широкое применение для изготовления таких деталей, как лопасти ветрогенераторов, винтовентиляторных двигателей, лопатки турбореактивных двигателей, монолитные обтекатели и т. д. При этом доля материалов, полученных данными методами, на мировом рынке непрерывно увеличивается.

Возможность использования методов в каждом случае зависит от множества факторов: требуемой формы конечного изделия, его размеров, объема производства, стоимости процесса, требований к свойствам конечного изделия. Для получения требуемых характеристик ПКМ необходимо подобрать связующее в соответствии с выбранным методом формования и обеспечить определенные условия для его отверждения [19, 20].

Для изготовления изделий из ПКМ в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано эпоксидное связующее марки ВСЭ-62 [21]. Цель данной работы – оценка возможности изготовления с использованием данного связующего крупногабаритных деталей конструкционного значения инъекционными методами.

### Материалы и методы

Исследованы теплофизические и физико-механические свойства однокомпонентного эпоксидного связующего ВСЭ-62 (ТУ 1-595-12-1875–2020), его реологические показатели и жизнеспособность.

Реологические характеристики данного связующего измеряли на ротационном вискозиметре Брукфильда марки Cap 2000+ (шпиндель № 1) в соответствии с ГОСТ 25271–93.

Температуру стеклования отвержденных образцов связующего измеряли в режиме трехточечного изгиба, со скоростью нагревания 5 °С/мин, при осциллирующей нагрузке с частотой 1 Гц в соответствии со стандартом ASTM E 1640. Испытания проводили на образцах размером 50×10×4 мм.

Кинетические параметры реакции отверждения определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на калориметре марки Netzsch в диапазоне рабочих температур от –100 до +400 °С и с интервалом скоростей нагрева от 1 до 20 °С/мин. Испытания проводили при трех скоростях нагрева в соответствии с ISO 11357-5.

Испытания на определение пределов прочности при статическом изгибе и растяжении отвержденных образцов связующего осуществляли при комнатной температуре на испытательной машине ИР5282-50 по ГОСТ 4648–2014 и ГОСТ 11262–2017.

Продолжительность гелеобразования определяли на гель-таймере Geltimer Gelnorm при температуре 160 °С с навеской связующего массой 12 г.

### Результаты и обсуждение

Одним из преимуществ эпоксидного связующего ВСЭ-62, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, является низкая вязкость и невысокая скорость ее нарастания при температуре пропитки. Для достижения требуемых технологических и эксплуатационных характеристик применяли различные низковязкие отвердители с пониженной реакционной способностью и активные разбавители. Связующее поставляется в металлических герметичных емкостях в количестве от 5 кг и представляет собой высоковязкую массу от светло-желтого до темно-коричневого цвета без механических включений.

Основные эксплуатационные характеристики отвержденного при температуре 20 °С образца эпоксидного связующего ВСЭ-62 представлены ниже:

Свойства	Значения свойств
Температура стеклования, °С:	
$T_{g_{dry}}$	165
$T_{g_{wet}}$	142
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	145
Модуль упругости при статическом изгибе, МПа	3,05
Предел прочности при растяжении, МПа	87
Температура доотверждения, °С	180

Для оценки возможности изготовления крупногабаритных деталей конструкционного значения инъекционными методами в первую очередь необходимо исследовать такой важный параметр связующего, как его технологическая жизнеспособность, который используется для определения максимального времени, при котором связующее еще можно переработать выбранными методами.

На рис. 1 представлена зависимость вязкости связующего от продолжительности выдержки при температуре 100 °С. Видно незначительное нарастание вязкости до значения 0,14 Па·с в течение 6,5 ч, что позволяет полностью проводить процесс пропитки пакета угле- или стеклонаполнителя методом вакуумной инфузии либо пропиткой под давлением. В начале измерения нарастание вязкости происходит медленно, однако затем при протекании химических реакций, являющихся экзотермическими, наблюдается выделение тепла, которое незначительно увеличивает скорость нарастания вязкости, и последующий процесс идет с повышением скорости реакции.

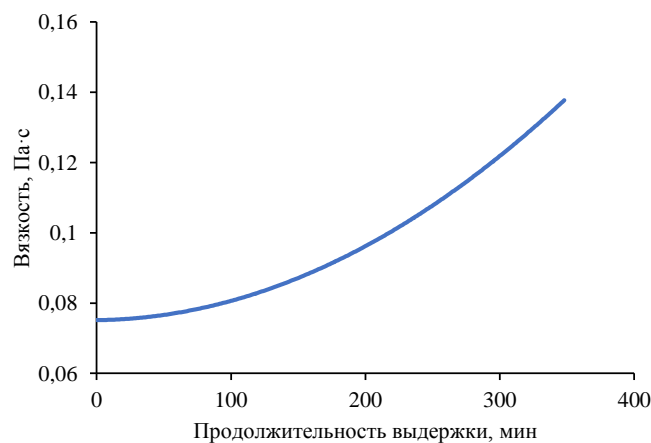


Рис. 1. Зависимость вязкости связующего от продолжительности выдержки при температуре 100 °С

Значения вязкости эпоксидного связующего ВСЭ-62 в динамическом режиме в интервале температур от 60 до 120 °С приведены ниже:

Температура, °С	60	70	80	90	100	110	120
Вязкость, Па·с	0,750	0,339	0,157	0,089	0,054	0,034	0,026

Видно, что максимального значения вязкости (<0,6 Па·с), необходимого для проведения процесса вакуумной инфузии, удается достичь уже при температуре 70 °С.

Одной из глобальных проблем при изготовлении ПКМ является неконтролируемый саморазогрев реактопластичных связующих, в частности эпоксидной матрицы. В процессе взаимодействия эпоксидных смол с отверждающимися системами происходит раскрытие эпоксидных колец, которое способствует большому выделению тепловой энергии. Бесконтрольное ускорение этого процесса может привести к неравномерному образованию трехмерной сетчатой структуры и, как следствие, к повышению внутренних напряжений в системе, что не только снижает теплостойкие и упругопрочностные характеристики ПКМ, но и приводит к короблению и деструкции материала. Особенно это актуально при изготовлении разнотолщинных или крупногабаритных изделий. В частности, при использовании в составе ПКМ на производстве низко-теплопроводного наполнителя (например, полимерных волокон и др.) ввиду значительного экзотермического эффекта реакции отверждения могут происходить термодеструкция и даже горение материала.

Поэтому при разработке эпоксидного связующего ВСЭ-62 не только сделали акцент на его реологические и механические характеристики, но и учитывали влияние кинетических закономерностей полимеризации на возможность термодеструкции материала при переработке крупногабаритных деталей из ПКМ. Кинетические параметры процесса отверждения данного связующего изучали методом ДСК. Результаты анализа образца связующего при разных скоростях нагрева представлены на рис. 2. Испытания проводили в атмосфере продувочного газа – азота, со скоростью нагревания 5, 10 и 20 °С/мин.

На графиках, представленных на рис. 2, видно, что в интервале скорости нагревания от 5 до 20 °С/мин процесс активной полимеризации связующего ВСЭ-62 начинается с температуры >190 °С/мин, а температуры ее основных пиков приходятся на значения >232 °С. Нагрев образца со скоростью 5 °С/мин приводит к более пологой термограмме с завершением реакции при температуре 265 °С и значением суммарной теплоты реакции отверждения, равной 675 Дж/г. При скорости нагрева 20 °С/мин термограмма становится более крутой, температура пика повышается на 47 °С, а суммарная теплота процесса уменьшается до 629 Дж/г. Таким образом, при варьировании скорости нагрева и подборе оптимального для каждого изделия ступенчатого режима появляется технологическое окно, позволяющее не только проводить пропитку крупногабаритного изделия из ПКМ, но и избегать перегрева детали в процессе формования.

Особенно актуальным этот аспект является при переработке в ПКМ полимерных волокон на основе арамида и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. С одной стороны, пластики на их основе обладают длительной жизнеспособностью, высокими значениями прочности и ударной вязкости, повышенными трибологическими значениями, а также электро- и звукоизоляционными свойствами, а с другой – невысокими показателями теплопроводности (не более 5 Вт/(м·К)), что в сочетании с низкими значениями теплопроводности эпоксидной матрицы может приводить к локальным перегревам и деструкции материала при переработке ПКМ в крупные

изделия. Для сравнения: углеродное волокно обладает коэффициентом теплопроводности на уровне 10 Вт/(м·К), что в 10 раз превышает этот показатель у стеклоткани и в 2,5 раза – у арамидного волокна [22]. Сравнение коэффициентов теплопроводности некоторых волокон [23] представлено ниже:

Волокно	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Углеродное волокно марки Т 300	10
Стекло С	1,05
Арамидное волокно марки Тварон	4,8
Волокно из СВМПЭ	0,36–0,43
Эпоксидное связующее	~0,5

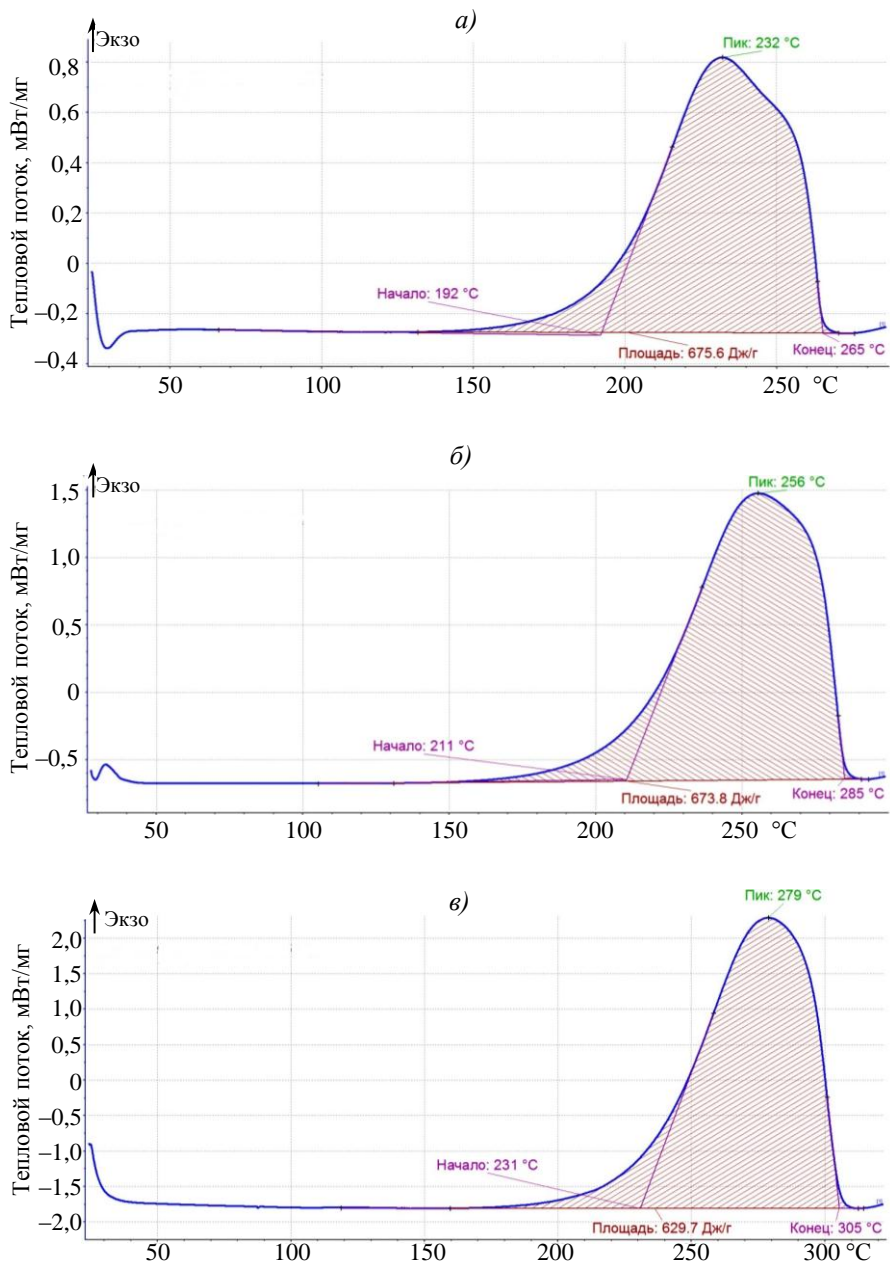


Рис. 2. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии образца эпоксидного связующего ВСЭ-62 со скоростью нагрева 5 (а), 10 (б) и 20 °С/мин (в)

Для подтверждения факта возможности безопасной пропитки с использованием крупных объемов связующего и последующего его отверждения опробован процесс отверждения образцов эпоксидного связующего ВСЭ-62. Его проводили при повышенной температуре в сравнении с однокомпонентным эпоксидным связующим, модифицированным каучуком, и связующим марки ВСЭ-1212 с близкими рабочими температурами, но отличающимися в первую очередь системой отвердителей. На гель-таймере Geltimer Gelnorm при повышенной температуре 160 °С исследована продолжительность гелеобразования этих связующих. Определение точки гелеобразования дает представление о данном параметре и температуре, при которой происходят образование первичных ковалентных связей и активное увеличение молекулярной массы композиции. Исследование продолжительности гелеобразования также дает возможность подобрать оптимальную начальную температуру процесса отверждения и избежать неконтролируемого саморазогрева системы, который может привести к самовозгоранию при формовании крупногабаритных деталей. На рис. 3 представлены зависимости температуры эпоксидных связующих от продолжительности гелеобразования при изотермической выдержке. Гелеобразование инъекционного однокомпонентного эпоксидного связующего, модифицированного каучуком, составляет ~25 мин с подъемом температуры на 10 °С. В образце связующего марки ВСЭ-1212, перерабатываемого по препреговой технологии, при температуре измерения 160 °С происходит самовозгорание. При исследовании продолжительности гелеобразования данного связующего уже через 15 мин после выдержки при температуре 145 °С наблюдается увеличение температуры на 10 °С.

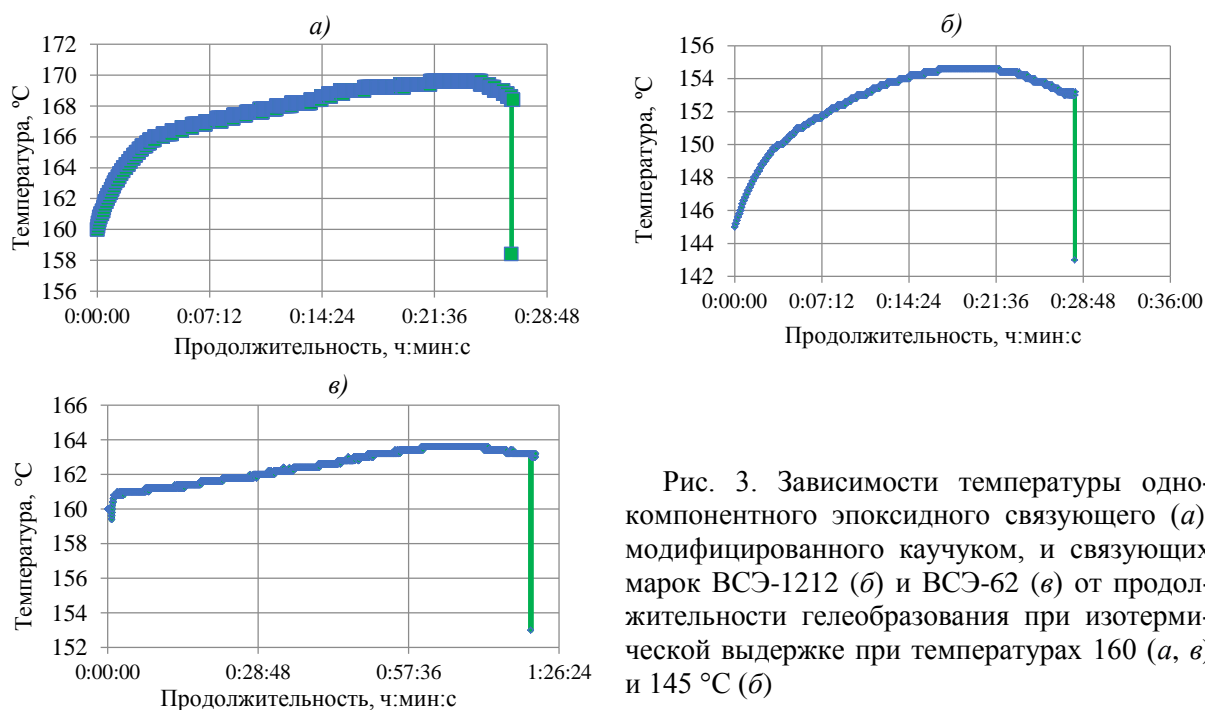


Рис. 3. Зависимости температуры однокомпонентного эпоксидного связующего (а), модифицированного каучуком, и связующих марок ВСЭ-1212 (б) и ВСЭ-62 (в) от продолжительности гелеобразования при изотермической выдержке при температурах 160 (а, в) и 145 °С (б)

Однако для связующего ВСЭ-62 при той же температуре измерения наблюдается более положительная картина. Максимальное возрастание температуры всего на 4 °С происходит спустя 1 ч после нагревания образца, а продолжительность гелеобразования составляет 80 мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что благодаря грамотно подобранному соотношению компонентов и использованию промышленно доступной отверждающей

системы, разработанное связующее ВСЭ-62 по сравнению с аналогичными эпоксидными связующими, отверждающимися в аналогичном интервале температур, не только имеет длительную технологическую жизнеспособность, но и полимеризуется в процессе формования ПКМ без значительного экзотермического эффекта, способного вызывать термодеструкцию и дефекты в материале.

### **Заключения**

В работе рассмотрены теплофизические и физико-механические параметры однокомпонентного эпоксидного связующего марки ВСЭ-62, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, подробно исследованы его жизнеспособность и возможность использования материала для безопасного изготовления крупногабаритных деталей методами вакуумной инфузии или пропиткой под давлением.

По результатам исследования реологических характеристик в динамическом режиме видно, что связующее может быть переработано в ПКМ методом вакуумной инфузии начиная с температуры 70 °С, поскольку достигает требуемых значений максимальной вязкости для использования данной технологии. Изучение жизнеспособности композиции при повышенной температуре показало, что происходит незначительное нарастание вязкости, что открывает большое технологическое окно для изготовления деталей. Кинетические исследования свидетельствуют, что на кривых ДСК процесс активной полимеризации связующего ВСЭ-62 наблюдается с температуры >170 °С, а температуры ее основных пиков начинаются со значений >232 °С. Нагревание образца со скоростью 20 К/мин приводит к получению наиболее крутой термограммы и максимальному температурному пику.

Сравнение графиков гелеобразования разработанного связующего с другими однокомпонентными системами со схожими рабочими температурами показало, что исследуемая система имеет небольшое увеличение температуры в процессе отверждения в сравнении с другими композициями. Незначительный саморазогрев связующего позволяет избежать дефектов и возгорания при пропитке больших деталей. По представленным данным можно сделать вывод, что эпоксидное связующее марки ВСЭ-62 рекомендуется для изготовления методом вакуумной инфузии или пропиткой под давлением высоконагруженных деталей конструкционного назначения.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### **Список источников**

1. Kablov E.N. New generation Materials and technologies for their digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
2. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Тимошков П.Н. Современные полимерные композиционные материалы для применения в авиационной технике // III Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: ВИАМ, 2018. С. 40–56.
5. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.

6. Коган Д.И. Технология изготовления полимерных композиционных материалов способом пропитки пленочными связующими: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2011. 139 с.
7. Кудрявцева А.Н., Ткачук А.И., Григорьева К.Н., Гуревич Я.М. Использование связующего марки ВСЭ-30, перерабатываемого по инфузионной технологии, для изготовления низко- и средненагруженных деталей конструкционного назначения // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
8. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В. Производство изделий из полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2004. 464 с.
9. Власов С.В., Кандырин Л.Б., Кулезнев А.В. и др. Основы технологии переработки пластмасс. М.: Химия, 2004. 600 с.
10. Холодников Ю.В. Способы изготовления изделий из композитов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6. С. 214–221.
11. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
12. Братухин А.Г., Боголюбов В.С., Сироткин О.С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении. М.: Готика, 2003. 516 с.
13. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3. С. 20–26.
14. Лешукова И.В. Принципиальные технологии изготовления авиационных конструкций из композиционных материалов: RTM и автоклавное формование // Инновационная наука. 2018. № 1. С. 14–16.
15. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносов А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
16. Arulappan S., Duraisamy A., Adhikari D., Gururaja S. Investigations on pressure and thickness profiles in carbon fiber-reinforced polymers during vacuum assisted resin transfer molding // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2015. Vol. 34. P. 3–18.
17. Ricciardi M.R., Antonucci V., Durante M. et al. A new cost-saving vacuum infusion process for fiber-reinforced composites: Pulsed infusion // Journal of Composite Materials. 2014. Vol. 48 (11). P. 1365–1373.
18. Marques A.T. Fibrous materials reinforced composites production techniques // Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications. Woodhead Publishing, 2011. P. 191–215. DOI: 10.1533/9780857095583.3.191.
19. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
20. 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.
21. Терехов И.В., Ткачук А.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Технологические и эксплуатационные характеристики и области применения низковязкого эпоксидного связующего ВСЭ-62 с повышенной жизнеспособностью // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 05 URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-43-50.
22. Кладовщикова О.И., Тихонов Н.Н., Жданов И.А., Сутягина А.К., Нахаева А.В. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 3. № 6. С. 30–32.
23. Любин. Дж. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение, 1988. 348 с.

References

1. Kablov E.N. New generation Materials and technologies for their digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
2. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Timoshkov P.N. Modern polymer composite materials for use in aviation technology. *III All-Rus. sci.-tech. conf. "Polymer composite materials and production technologies of a new generation"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 40–56.
5. Mikhailin Yu.A. *Structural polymeric composite materials*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008, 822 p.
6. Kogan D.I. *Technology for the manufacture of polymer composite materials by the method of impregnation with film binders*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2011, 139 p.
7. Kudryavtseva A.N., Tkachuk A.I., Grigorieva K.N., Gurevich Ya.M. The use of epoxy resin system VSE-30, processed by the infusion technology, for the manufacture of low and medium loaded structural polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 12, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
8. Kryzhanovsky V.K., Kerber M.L., Burlov V.V. *Manufacture of products from polymeric materials*. St. Petersburg: Professionya, 2004, 464 p.
9. Vlasov S.V., Kandyrin L.B., Kuleznev A.V. et al. *Fundamentals of plastics processing technology*. Moscow: Khimiya, 2004, 600 p.
10. Kholodnikov Yu.V. Methods for manufacturing products from composites. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2016, no. 6, pp. 214–221.
11. Timoshkov P.N. Equipment and materials for the technology of automated calculations prepregs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 2, pp. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
12. Bratukhin A.G., Bogolyubov V.S., Sirotkin O.S. *Technology for the production of products and integral structures from composite materials in mechanical engineering*. Moscow: Gotika, 2003, 516 p.
13. Dushin M.I., Hrulkov A.V., Muhametov R.R. A choice of technological parameters of autoclave formation of details from polymeric composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 20–26.
14. Leshukova I.V. Principal technologies for the manufacture of aircraft structures from composite materials: RTM and autoclave molding. *Innovatsionnaya nauka*, 2018, no. 1, pp. 14–16.
15. Kolpachkov E.D., Petrova A.P., Kurnosov A.O., Sokolov I.I. Methods of molding aviation products from PCM (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
16. Arulappan C., Duraisamy A., Adhikari D., Gururaja S. Investigations on pressure and thickness profiles in carbon fiber-reinforced polymers during vacuum assisted resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, vol. 34, pp. 3–18.
17. Ricciardi M.R., Antonucci V., Durante M. et al. A new cost-saving vacuum infusion process for fiber-reinforced composites: Pulsed infusion. *Journal of Composite Materials*, 2014, vol. 48 (11), pp. 1365–1373.
18. Marques A.T. *Fibrous materials reinforced composites production techniques. Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*. Woodhead Publishing, 2011, pp. 191–215. DOI: 10.1533/9780857095583.3.191.

19. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
20. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
21. Terekhov I.V., Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Karavaev R.Yu. Technological and operational characteristics of the VSE-62 low-viscosity epoxy resin with increased pot life and its application. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-43-50.
22. Kladovshchikova O.I., Tikhonov N.N., Zhdanov I.A., Sutyagina A.K., Nakhaeva A.V. Composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. 3, no. 6, pp. 30–32.
23. Lubin. J. *Handbook of composite materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 348 p.

#### Информация об авторах

**Кузнецова Полина Андреевна**, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ткачук Анатолий Иванович**, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Любимова Анастасия Сергеевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Эльдяева Галина Борисовна**, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Polina A. Kuznetsova**, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Anatoly I. Tkachuk**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Anastasia S. Lyubimova**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Galina B. Eldjaeva**, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.01.2023.

The article was submitted 10.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 11.01.2023.