

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82

## ФОТООТВЕРЖДАЕМЫЕ АКРИЛАТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ (обзор)

И.А. Сарычев<sup>1</sup>, А.В. Бутузов<sup>1</sup>, Е.А. Серкова<sup>1</sup>, Е.В. Долгова<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.** Проведен обзор фотоотверждаемых акрилатных композиций, которые могут быть применены для широкого круга задач, в том числе и для 3D-печати. Рассмотрены основные (мет)акрилатные мономеры, олигомеры и разбавители, сомономеров и специальные добавки. Описано влияние структуры мономеров и активных разбавителей на свойства полимера. Приведены механизмы фотоинициирования и механизмы агентов переноса цепи. Обозначено влияние введения эпоксидных смол в состав фотоотверждаемых акрилатных композиций. Сделан вывод о возможностях широкой модификации таких композиций.

**Ключевые слова:** композиция, акрилат, мономер, олигомер, активный разбавитель, фотополимеризация, усадка, 3D-печать

**Для цитирования:** Сарычев И.А., Бутузов А.В., Серкова Е.А., Долгова Е.В. Фотоотверждаемые акрилатные композиции (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82.

Scientific article

## PHOTOCURABLE ACRYLATE COMPOSITIONS (review)

I.A. Sarychev<sup>1</sup>, A.V. Butuzov<sup>1</sup>, E.A. Serkova<sup>1</sup>, E.V. Dolgova<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.** A review of photocurable acrylate compositions, which can be used for a wide range of tasks, including 3D printing, has been carried out. The main (meth)acrylate monomers, oligomers and diluents, comonomers and special additives are considered. The influence of the structure of monomers and active diluents on the properties of the polymer is described. The mechanisms of photoinitiation and the mechanisms of chain transfer agents are presented. The influence of the introduction of epoxy resins into the composition of photocurable acrylate compositions is indicated. The conclusion is made about the possibilities of wide modification of such compositions.

**Keywords:** composition, acrylate, monomer, oligomer, active diluent, photopolymerization, shrinkage, 3D printing

**For citation:** Sarychev I.A., Butuzov A.V., Serkova E.A., Dolgova E.V. Photocurable acrylate compositions (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82.

### Введение

В настоящее время фотоотверждаемые акрилатные мономеры и олигомеры практически полностью заняли место основного и часто используемого класса соединений

с кратной связью для изготовления покрытий широкого спектра применения, заливочных составов, а также в качестве связующих для реставрационных материалов в стоматологии и для 3D-печати (прототипировании) [1].

Мировой рынок УФ-отверждаемых смол и композиций на их основе (включая олигомеры, мономеры, фотоинициаторы и различные добавки) оценивался в 2019 г. в 4,27 млрд долл. США и по прогнозам достигнет к 2027 г. 8,66 млрд долл. США [2]. Поэтому интерес исследователей к области фотоотверждаемых смол постоянно возрастает.

На протяжении последних лет большое количество научных работ посвящено разработке и модификации фотоотверждаемых акрилатных композиций для применения в области аддитивных технологий [3, 4]. Фотоотверждаемые акрилатные композиции содержат в своем составе акриловые или метакриловые мономеры, активные разбавители, различные добавки и, наконец, фотоинициатор, который и позволяет реализовать отверждение композиции [5].

Фотополимеризация – метод отверждения жидкой акрилатной композиции за короткий промежуток времени при воздействии на нее электромагнитного излучения (чаще всего ультрафиолетового света) [6]. Фотополимеризация, по сравнению с другими методами превращения мономеров в высокомолекулярные соединения, применяемыми в химии полимеров [7], отличается рядом важных преимуществ. Энергия  $6,022 \cdot 10^{23}$  фотонов (эквивалент 1 моль вещества) при длине волны в 365 нм в 130 раз больше, чем тепловая энергия, которую может дать отверждение при комнатной температуре (25 °C) [8]. Процесс расщепления связи с образованием радикалов и полимеризация мономеров происходят сразу же после облучения даже при комнатной температуре. Кроме того, энергия фотонов может быть сообщена только определенным светоабсорбирующим молекулам (хромофорам), в отличие от тепловой энергии конвекционного нагрева, которая передается всей реакционной смеси [9]. Это ключевое свойство обеспечивает возможность контролировать процесс полимеризации путем избирательной засветки части фотоотверждаемой композиции, что широко используется в области аддитивных технологий [10–12].

Другим важным свойством фотоотверждаемых акрилатных композиций является их низкая вязкость, которая позволяет исключить из состава композиции органические растворители, а отсутствие необходимости нагрева в процессе фотополимеризации снижает количество выделяющихся летучих органических соединений в атмосферу, тем самым повышая гигиену труда и снижая негативное влияние на экологию [13].

Работа выполнена в рамках комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» комплексной научной проблемы 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

### Мономеры и активные разбавители

Фотоотверждаемые композиции на основе акриловых и метакриловых мономеров могут отверждаться различными источниками светового облучения. Такие композиции применяются во многих областях – например, для трехмерной печати изделий с памятью формы [15], получения силиоксансодержащих полимеров с гибридной органико-неорганической сеткой [16], высокоэластичных полимеров [17], в медицине, а также в качестве других материалов с уникальными свойствами для широкого спектра применения [18–20].

В состав фотоотверждаемых акрилатных композиций входят: мономеры и активные разбавители, обеспечивающие реологические свойства неотвержденной смолы

и физико-механические свойства отвержденной композиции; фотоинициаторы, позволяющие отверждать композицию с заданной скоростью и глубиной конверсии; сомономеры, которые используют при необходимости получения материалов с улучшенными свойствами, а также специальные добавки, продлевающие срок хранения композиций.

На рис. 1 приведены наиболее распространенные в 3D-печати метакриловые мономеры и олигомеры: полиэтиленгликоль диакрилат (PEGDA) [21, 22], уретандиметакрилат (UDMA) [23, 24], триэтиленгликоль диметакрилат (TEGDMA) [25, 26], бисфенол А глицидил метакрилат (Bis-GMA) [25, 26], диакрилат этоксилата бисфенола А (Bis-EDA) [27] и уретандиметакрилат диглицидилового эфира бисфенола А (U-DMA) [28].

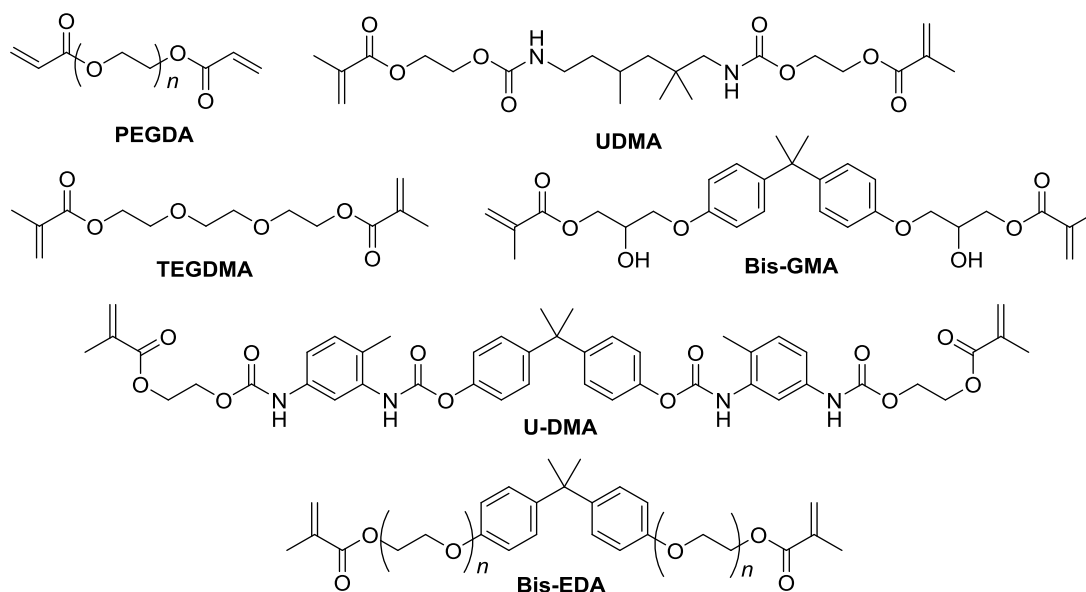


Рис. 1. Структурные формулы (мет)акриловых мономеров и олигомеров, используемых в аддитивном производстве

Хотя метакриловые мономеры в присутствии инициаторов без особых проблем отверждаются под действием светового облучения с образованием трехмерной сетки, они обладают определенными недостатками. Одним из недостатков является то, что такие связующие склонны к образованию значительной усадки после полимеризации [29]. Индивидуальные фотоотверждаемые (мет)акрилатные смолы склонны к гелеобразованию при достаточно низкой конверсии, которая зависит, в том числе, и от функциональности мономера. Быстрое гелеобразование и наступающие вследствие него стерические затруднения приводят к блокированию внутри сетки полимера значительного количества неотвержденной смолы, а последующая фотополимеризация за пределами точки гелеобразования приводит к росту усадочного напряжения [30].

Величина усадки полимера варьируется в зависимости от выбранных мономеров и олигомеров и их молекулярной структуры. Акрилаты с циклоалифатическими и ароматическими фрагментами в своей структуре имеют меньшую усадку в сравнении с алифатическими акрилатами, например TEGDMA [31]. Связанные с усадкой остаточные напряжения приводят к деформации изделия в процессе аддитивного производства. Однако выработано несколько подходов, позволяющих уменьшить усадку при фотополимеризации. Одним из таких решений может быть использование олигомерных или высокомолекулярных акрилатов с небольшим количеством реакционных групп, введение которых в состав фотоотверждаемой композиции позволяет снизить усадку

при фотополимеризации [32]. С другой стороны, введение в состав композиции высокомолекулярных смол влечет за собой увеличение ее вязкости, что, в свою очередь, требует наличия подогрева связующего в процессе аддитивного производства.

В виду высокой вязкости базовых акрилатных мономеров вязкость фотоотверждаемых композиций может быть неподходящей для определенного применения – например, для высокоточной 3D-печати. С целью снижения вязкости фотоотверждаемых композиций и ее регулирования в их состав вводят различные активные разбавители [33].

Благодаря хорошей механической прочности наиболее часто используемые фотоотверждаемые связующие базируются на метакрилатных смолах на основе уретанакрилатов (UDMA) и диглицидилового эфира бисфенола А (Bis-GMA), которые синтезируют из олигомерных прекурсоров, а вязкость фотоотверждаемой композиции зачастую оказывается слишком высока для 3D-печати. Кроме того, высокая вязкость акрилатной композиции при фотополимеризации не позволяет быстро достичь гелеобразования, что также является негативным фактором. Для ускорения процесса фотополимеризации и снижения вязкости композиций используют следующие низковязкие алифатические активные разбавители, такие как дипропиленгликоля диакрилат (DPGDA), триметилпропан триакрилат (ТТА), пентаэритрит тетраакрилат (PETA), дициклопентадиена диакрилат (DCPDA), гександиол диакрилат (HDDA) и трис[2-(акрилоил)этил]изоцианурат (ТАЕИ). Структурные формулы активных разбавителей показаны на рис. 2 [33].

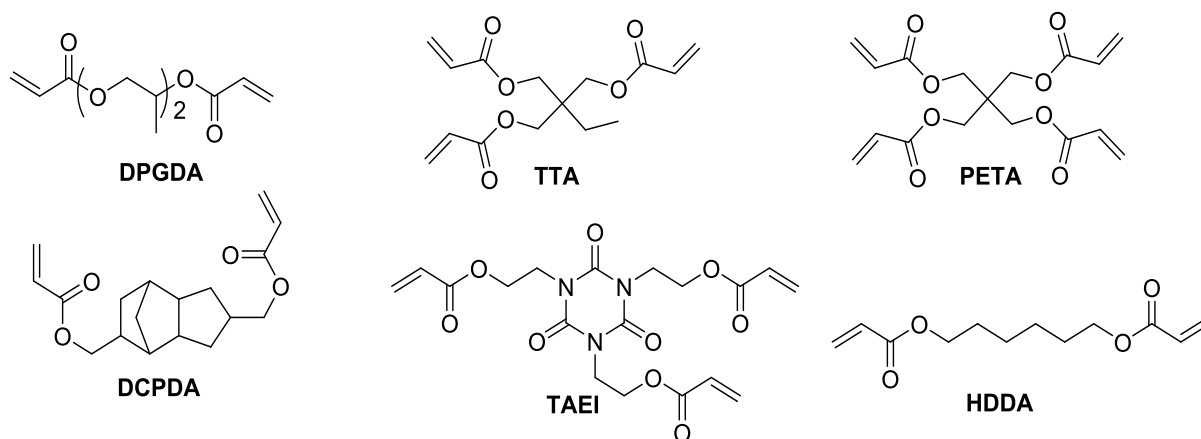


Рис. 2. Структурные формулы наиболее часто используемых в 3D-печати активных разбавителей

Активные разбавители способны не только регулировать вязкость фотоотверждаемых композиций, но и увеличивать механические свойства полимера [34]. Так, активный разбавитель (ТАЕИ), содержащий гетероцикл в своей структуре, улучшает механические свойства (ударную вязкость и модуль упругости) [35], а разбавитель DCPDA уменьшает усадку полимера [36], тогда как добавление активного разбавителя TEGDMA в фотоотверждаемую композицию на основе диметакрилата бисфенола А, наоборот, приводит к увеличению усадки в полимере [31].

В качестве активного разбавителя высоковязких метакрилатных смол могут быть использованы N-винилпирролидон [37], который в процессе фотополимеризации реагирует с метакрилатной мономерной основой по кратной связи, или тетрагидрофуруриловый метакрилат [38].

### Сомомеры фотоотверждаемых акрилатных композиций

Большинство фотоотверждаемых композиций базируются на использовании в качестве основы многофункциональных (мет)акрилатов – например, три- и тетраакрилатов, которые характеризуются наличием автоускорения в начале фазы роста цепи при свободнорадикальной полимеризации. Большая длина кинетической цепи способствует получению хрупкой и неоднородносшитой сетки, а полученный полимер будет обладать низкими эксплуатационными свойствами [30].

Использование различных типов смол в составе светоотверждаемых композиций с разной скоростью полимеризации является удобным способом снижения усадки и повышения прочности полимера. Известно, что фотоотверждаемые композиции, содержащие высокореакционноспособные акрилаты, могут претерпевать большие деформации из-за неравномерной усадки. Светоотверждаемые акрилатные композиции с менее реакционноспособными мономерами (например, метакрилатами) обладают значительно более низкими деформациями после отверждения [22].

Перспективным подходом к снижению усадки полимера является введение в состав акрилатной композиции эпоксидных смол. Составы на основе акрилатов и эпоксидов полимеризуются по различным механизмам и практически не реагируют друг с другом, а полученные эпоксиакрилатные полимеры не являются сополимерами, обладая структурой с взаимопроникающими сетками [39], в отличие от составов на основе акрилатов и метакрилатов.

Исследование композиции, состоящей из диакрилата диглицидилового эфира бисфенола А и циклоалифатической эпоксидной смолы Araldite CY-179 с радикальным и катионным фотоинициаторами, показало, что полимеризация значительной части эпоксидного компонента композиции протекает гораздо позже времени непосредственного облучения светом за счет индуцированной катионной полимеризации [39]. Преимуществом таких гибридных фотоотверждаемых эпоксиакрилатных композиций является значительное снижение негативного ингибирования радикалов кислородом, образующихся при световом облучении.

Фотоотверждаемые акрилатные композиции также могут содержать гибридные эпоксиакрилатные момеры – глицидилметакрилат (GMA) и 3,4-эпоксициклогексилметилметакрилат (ЕСМА) [40].

### Инициаторы

В процессе полимеризации под действием светового облучения реакции протекают по радикальному или катионному механизмам в зависимости от выбранного типа фотоинициатора. Выбор инициатора, в свою очередь, зависит от типа мономерной основы композиции и требуемой скорости фотополимеризации. Инициирование происходит посредством энергии светового облучения, после поглощения которого фотоинициатор или фотоиницирующая система образуют реакционноспособные химические соединения [41]. Источниками света могут быть различные устройства – ртутные и ксеноновые лампы, лазеры или светодиодные источники. Длины волн их фотонов могут находиться в УФ-области (190–400 нм), в области видимого света (400–700 нм) или инфракрасном диапазоне (700–1000 нм) [42].

При распаде фотоинициаторов происходит достаточно быстрое образование радикалов, вследствие чего радикальные фотоинициаторы нашли широкое применение в стереолитографии. Они могут быть отнесены к двум типам по классификации Норриша [43]. Инициаторы I типа представляют собой индивидуальные соединения, которые под световым облучением соответствующей длины волны расщепляются на фрагменты радикалов. Бензилкетали являются типичными инициаторами I типа, работающими при

длине волны  $\sim(350\text{--}360)$  нм. На рис. 3 показан механизм фоторасщепления 2-бензоил-2-пропанола – распространенного инициатора I типа.

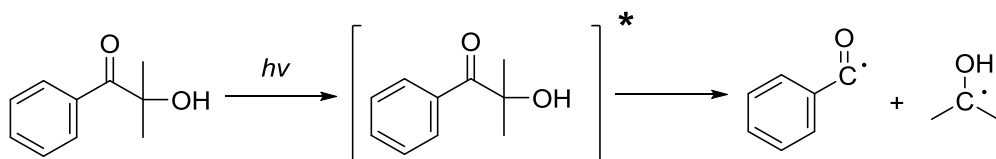


Рис. 3. Механизм фоторасщепления 2-бензоил-2-пропанола

Другие фотоинициаторы I типа (рис. 4) подвергаются аналогичным реакциям расщепления под действием света – например, такие как Irgacure 369, Irgacure 184, Irgacure 651 и др. [44].

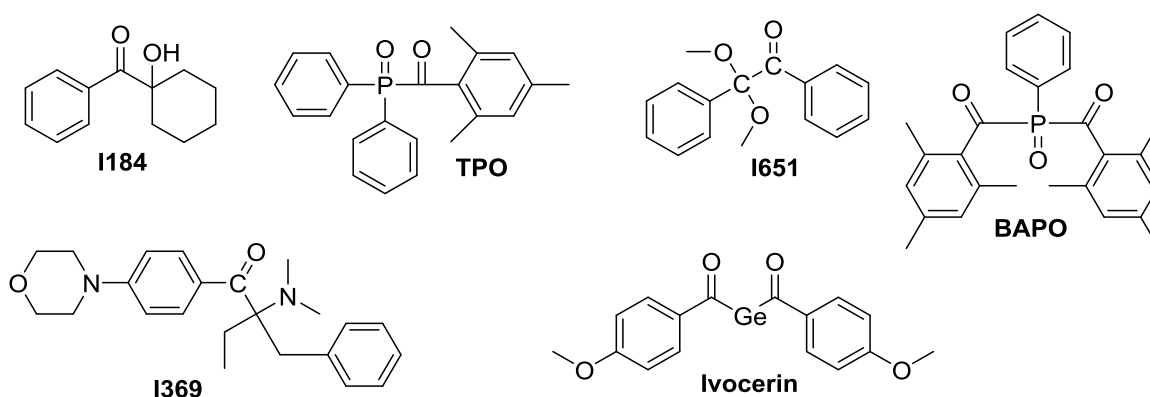


Рис. 4. Структурные формулы наиболее часто используемых фотоинициаторов I типа

Оксиды ацилфосфинов BAPO и TPO на рис. 4 представляют собой другой класс радикальных фотоинициаторов I типа и используются для фотоотверждения акрилатных композиций устройствами, генерирующими более длинноволновый свет – например, они используются в аддитивном производстве по технологии DLP ( $\sim 400$  нм) [45]. Новое поколение длинноволновых германиевых фотоинициаторов типа Ivocerin (рис. 4) обладает хорошими иницирующими свойствами, поскольку под действием света атом германия отщепляется от карбонильной группы, позволяя отвердить даже высоконаполненные акрилатные композиции [46].

Фотоинициаторы II типа представляют собой двухкомпонентные системы, состоящие из светопоглощающей молекулы (сенсбилизатора) с соинициатором (синергистом). Механизм образования радикалов фотоинициаторов II типа показан на рис. 5.

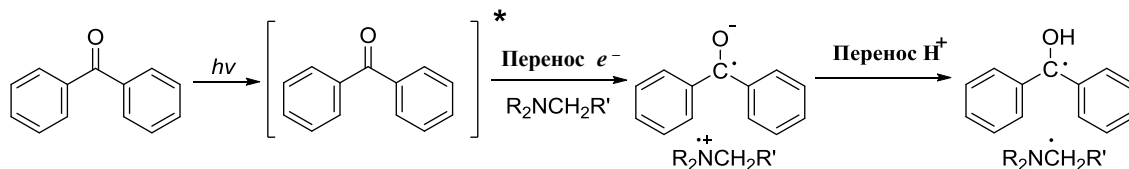


Рис. 5. Механизм образования радикалов фотоинициаторов II типа

При световом облучении синергист отдает атом водорода сенсбилизатору, образуя в результате иницирующий радикал. В качестве синергистов инициаторов II типа

чаще всего используют третичные амины с одним или более алкильным заместителем [47]. Третичные амины реагируют с сенсibilизатором, перенося электрон от неподеленной пары амина к кетону, после чего следует перенос протона от аминорадикала-катиона к радикалу-аниону инициатора. Последняя стадия является лимитирующей, поскольку перенос электрона является обратимой реакцией.

Фотополимеризация под действием катионных инициаторов известна с 1970-х гг. Разработки в этой области были предложены с целью нивелировать недостатки, присущие радикальным инициаторам. Первыми катионными фотоинициаторами были соли иодония с ненуклеофильными противоионами ( $\text{BF}_4^-$ ,  $\text{PF}_6^-$ ,  $\text{AsF}_6^-$  и  $\text{SbF}_6^-$ ) (рис. 6) [48].

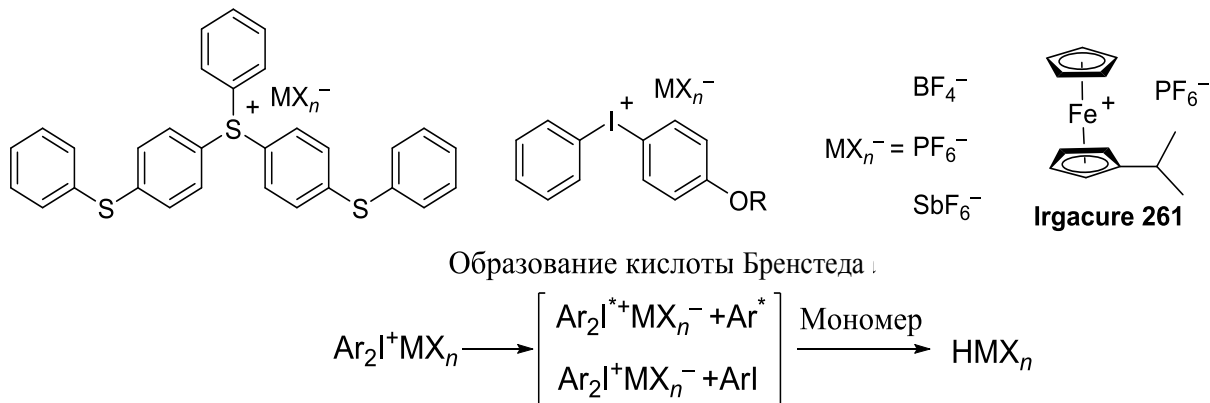


Рис. 6. Химические структуры катионных фотоинициаторов и схема получения кислоты Бренстеда

Эти соединения термически стабильны, но под действием УФ-излучения распадаются, образуя смеси катионов, радикалов-катионов, а также интермедиатных радикалов. В дальнейшем реакции этих продуктов с растворителем или мономером приводят к получению суперкислоты  $\text{HMX}_n$  (рис. 6), которая действует как основной инициатор катионной полимеризации [49]. Вскоре после открытия диарилйодониевых фотоинициаторов были синтезированы соли триарилсульфония, которые проявляют аналогичную способность инициировать фотополимеризацию [50].

Вместе с инициаторами катионного типа возможно использование инициаторов I типа. При совместном использовании радикальные интермедиаты вторых могут прореагировать с сульфониевыми или йодониевыми инициаторами, и в результате реакции образуются инициирующие радикал-катионы. Катионную полимеризацию можно индуцировать даже при помощи видимого света, используя в составе композиции металлоценовый инициатор Irgacure 261.

### Специальные добавки

Введение в состав полимерных связующих и композиций различных функциональных добавок позволяет регулировать их свойства [51].

Фотоотверждаемые акрилатные композиции содержат в своем составе различные добавки. Для увеличения срока хранения композиций и предотвращения быстрого гелеобразования при фотополимеризации требуется введение ингибиторов радикалов (стабилизаторов), среди которых наиболее часто используемыми являются бутилгидрокситолуол (ВНТ) и монометилловый эфир гидрохинона (МЕНQ), структурные формулы которых показаны на рис. 7.

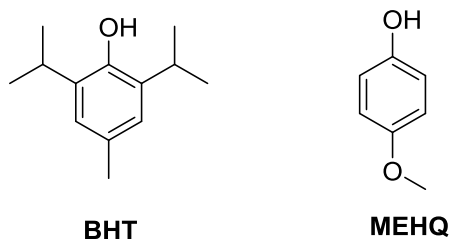


Рис. 7. Структурные формулы наиболее часто используемых стабилизаторов

Эти стабилизаторы обычно используются в концентрации от 50 до 200 миллионных долей [52].

Поскольку фотоотвержденные композиции на основе (мет)акрилатов обладают высокой хрупкостью (из-за неоднородной структуры и высокосшитой сетки), были предприняты усилия для улучшения ее однородности.

Регулировать строение образующегося при фотополимеризации полимера можно с помощью агентов передачи цепи, которые широко используются для различных линейных полимеров [53]. Введение в состав фотоотверждаемой акрилатной композиции агентов переноса цепи показало способность управлять плотностью сшитой сетки полимера, средней длиной кинетической цепи и распределением поперечных связей вдоль полимерной цепи, что в конечном счете позволяет получить более однородную структуру полимера с пониженной хрупкостью [54]. Добавление в состав фотоотверждаемого связующего  $\beta$ -аллилсульфона позволяет регулировать длину цепи посредством реакции передачи цепи (рис. 8).

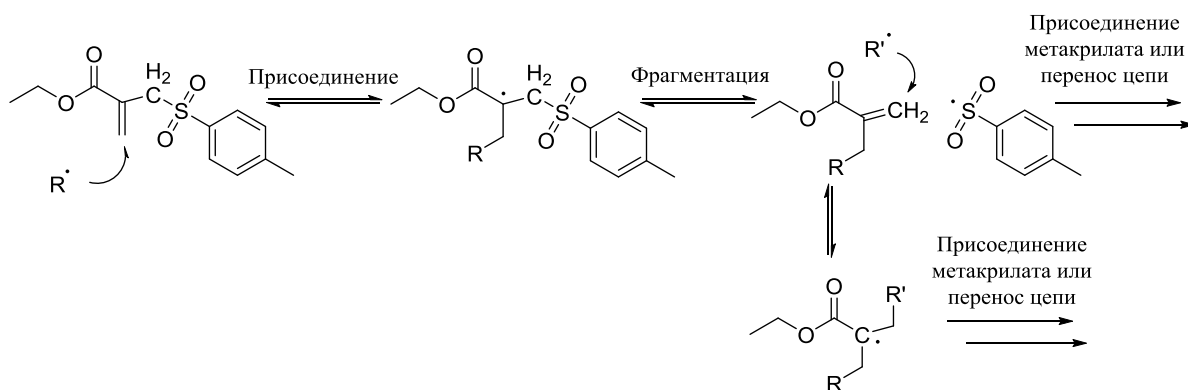


Рис. 8. Механизм переноса цепи для активированного этиловым эфиром  $\beta$ -аллилсульфона

Использование механизма «присоединения–фрагментации» приводит к образованию однородносшитой сетки, а полученный из таких фотоотверждаемых композиций полимер обладает повышенной прочностью. Передача цепи по данному механизму уменьшает напряжение усадки, наблюдаемое при свободнорадикальной фотополимеризации [55]. Добавление  $\beta$ -аллилсульфонов в (мет)акрилатные композиции не приводит к сокращению срока хранения связующего. Однако при добавлении таких соединений и особенностей механизма полимеризации общая продолжительность отверждения связующего оказывается больше, что может быть нежелательно для 3D-печати, которая требует высокой скорости фотополимеризации. Для решения этой проблемы синтезирован другой агент передачи цепи – этил-2-(тозилокси)акрилатвинилсульфонат, активированный этиловым эфиром. Добавление в состав фотоотверждаемой композиции на

основе диметакрилатов UDMA и 1,10-декандиолдиметакрилата с фотоинициатором Ivocerin привело к образованию прочных полимеров при высокой скорости полимеризации при 3D-печати [56].

Известно, что кислород оказывает ингибирующее действие на свободнорадикальную полимеризацию фотоотверждаемых (мет)акрилатных композиций [57]. Решить эту проблему можно при помощи различных добавок – например, третичных аминов или трифенилфосфина [58]. Однако добавление третичных аминов не подходит для фотоотверждаемых акрилатных связующих, содержащих в своем составе эпоксидные смолы, из-за ингибирующего действия третичного амина на катионную полимеризацию [56].

### Заключения

Фотоотверждаемые акрилатные композиции – это сложные по составу системы, содержащие различные функциональные добавки. Среди многообразия реакционно-способных акрилатных соединений наиболее часто используемыми являются акрилаты на основе диглицидилового эфира бисфенола А и различных гликолей, а также акрилаты на основе уретанов, которые образуют межмолекулярные водородные связи, а полимеры на их основе обладают повышенной прочностью при растяжении. Полимеры на основе олигомерных и разветвленных акрилатов характеризуются меньшей усадкой при отверждении и повышенной ударной вязкостью по сравнению с композициями, основанными на мономерах с небольшой молекулярной массой.

Введение в состав акрилатных композиций активных разбавителей позволяет снизить вязкость и повысить механические свойства полимера. Высокая скорость полимеризации (мет)акрилатных композиций требует тщательного подхода к выбору фотоинициатора или фотоиницирующей системы для достижения требуемой скорости фотополимеризации и молекулярной структуры полимера, принимая во внимание длину волны доступного источника светового облучения. С помощью введения сомономеров и специальных добавок в состав акрилатных композиций также можно влиять на структуру полимера и получать полимеры с заданными свойствами. Например, агенты переноса цепи могут эффективно регулировать строение акрилатного полимера при фотополимеризации, обеспечивая получение более однородного полимера с высокой ударной вязкостью и модулем упругости, так же как и полимеры на основе эпоксиакрилатных фотоотверждаемых композиций с взаимопроникающими сетками.

Таким образом, выбор мономерной основы, фотоинициаторов и специальных добавок для создания фотоотверждаемых акрилатных композиций зависит от области предполагаемого использования полимера, и их состав может варьироваться в широких пределах.

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

### Список источников

1. Внук В.В., Камаев С.В., Марков М.А., Черобыло С.А. Особенности изготовления моделей из многокомпонентных фотополимеров методом лазерной стереолитографии // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 31–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-31-36.
2. UV Curable Resins&Formulated Products Market Size | Share | Forecast. URL: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/uv-curable-resins-formulated-products-market> (дата обращения: 07.06.2022).
3. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.

4. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
5. Bednarczyk P., Irska I., Gziut K., Ossowicz-Rupniewska P. Novel Multifunctional Epoxy (Meth)Acrylate Resins and Coatings Preparation via Cationic and Free-Radical Photopolymerization // *Polymers*. 2021. No. 13. P. 1718. DOI: 10.3390/polym13111718.
6. Manmeet K., Srivastava A.K. Photopolymerization: A review // *Journal of Macromolecular Science. Part C*. 2002. No. 42 (4). P. 481–512. DOI: 10.1081/MC-120015988.
7. 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.
8. Chatani S., Kloxin C.J., Bowman C.N. The power of light in polymer science: Photochemical processes to manipulate polymer formation, structure, and properties // *Polymer Chemistry*. 2014. No. 5. P. 2187–2201. DOI: 10.1039/C3PY01334K.
9. Corrigan N., Yeow J., Judzewitsch P., Xu J., Boyer C. Seeing the light: Advancing materials chemistry through photopolymerization // *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. No. 58. P. 5170–5189. DOI: 10.1002/anie.201805473.
10. Photopolymer composition for 3D printing: pat. 9902860 US; filed 30.08.16; publ. 01.03.18.
11. Photocurable resin composition for Stereolithography 3D printing: pat. 101980037 KR; filed 14.03.17; publ. 29.08.19.
12. Photocurable material composition and cured product thereof: pat. 20200157258 US; filed 09.08.13; publ. 10.02.14.
13. Sandmeier M., Paunović N., Conti R. et al. Solvent-Free Three-Dimensional Printing of Biodegradable Elastomers Using Liquid Macrophotoinitiators // *Macromolecules*. 2021. No. 54 (17). P. 7830–7839. DOI: 10.1021/acs.macromol.1c00856.
14. 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.
15. Zarek M., Layani M., Cooperstein I. et al. 3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices // *Advance Materials*. 2016. No. 28. P. 4449–4454. DOI: 10.1002/adma.201503132.
16. Palaganas J., de Leon A.C., Mangadlao J. et al. Facile Preparation of Photocurable Siloxane Composite for 3D Printing // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017. No. 302 (5). P. 1–9. DOI: 10.1002/mame.201600477.
17. Patel D.K., Sakhaei A.H., Layani M. et al. Highly Stretchable and UV Curable Elastomers for Digital Light Processing Based 3D Printing // *Advance Materials*. 2017. No. 29. P. 1–7. DOI: 10.1002/adma.201606000.
18. Stassi S., Fantino E., Calmo R. et al. Polymeric 3D Printed Functional Microcantilevers for Biosensing Applications // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. No. 9 (22). P. 19193–19201. DOI: 10.1021/acsami.7b04030.
19. Gou M., Qu X., Zhu W. et al. Bio-Inspired Detoxification Using 3D-Printed Hydrogel Nanocomposites // *Nature Communications*. 2014. No. 5. P. 3774. DOI: 10.1038/ncomms4774.
20. Каблов Е.Н., Яковлев Н.О., Харитонов Г.М., Мекалина И.В. Особенности релаксационного поведения полимерных стекол на основе полиметилметакрилата и их учет при прочностном расчете авиационного остекления // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. № 9. С. 2–9.
21. Chiappone A., Fantino E., Roppolo I. et al. 3D Printed PEG-Based Hybrid Nanocomposites Obtained by Sol–Gel Technique // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. No. 8. P. 5627–5633. DOI: 10.1021/acsami.5b12578.
22. Warner J., Soman P., Zhu W. et al. Design and 3D Printing of Hydrogel Scaffolds with Fractal Geometries // *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2016. No. 2. P. 1763–1770. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.6b00140.

23. Liska R., Schuster M., Inführ R. et al. Photopolymers for Rapid Prototyping // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2007. No. 4. P. 505–510. DOI: 10.1007/s11998-007-9059-3.
24. Yue J., Zhao P., Gerasimov J.Y. et al. 3D-Printable Antimicrobial Composite Resins // *Advanced Functional Materials*. 2015. No. 25. P. 6756–6767. DOI: 10.1002/adfm.201502384.
25. Al Mousawi A., Dumur F., Garra P. et al. Carbazole Scaffold Based Photoinitiator/Photoredox Catalysts: Toward New High-Performance Photoinitiating Systems and Application in LED Projector 3D Printing Resins // *Macromolecules*. 2017. No. 50. P. 2747–2758. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b00210.
26. Al Mousawi A., Garra P., Schmitt M. et al. 3-Hydroxyflavone and N-Phenylglycine in High Performance Photoinitiating Systems for 3D Printing and Photocomposites Synthesis // *Macromolecules*. 2018. No. 51. P. 4633–4641. DOI: 10.1021/acs.macromol.8b00979.
27. Credi C., Fiorese A., Tironi M. et al. 3D Printing of Cantilever-Type Microstructures by Stereolithography of Ferromagnetic Photopolymers // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. No. 8. P. 26332–26342. DOI: 10.1021/acsami.6b08880.
28. (Meth)Acrylates Containing Urethane Groups: pat. 5658712 US; filed 09.08.93; publ. 19.08.97.
29. Boddapati A., Rahane S.B., Slopek R.P. et al. Gel Time Prediction of Multifunctional Acrylates Using a Kinetics Model // *Polymer*. 2011. No. 52. P. 866–873. DOI: 10.1016/j.polymer.2010.12.024.
30. Ligon-Auer S.C., Schwentenwein M., Gorsche C. et al. Toughening of Photo-Curable Polymer Networks: A Review // *Polymer Chemistry*. 2016. No. 7. P. 257–286. DOI: 10.1039/C5PY01631B.
31. Kim L.U., Kim J.W., Kim C.K. Effects of Molecular Structure of the Resins on the Volumetric Shrinkage and the Mechanical Strength of Dental Restorative Composites // *Biomacromolecules*. 2006. No. 7. P. 2680–2687. DOI: 10.1021/bm060453h.
32. Moraes R.R., Garcia J.W., Barros M.D. et al. Control of Polymerization Shrinkage and Stress in Nanogel-Modified Monomer and Composite Materials // *Dental Materials*. 2011. No. 27. P. 509–519. DOI: 10.1016/j.dental.2011.01.006.
33. Liquid, Radiation-Curable Composition, Especially for Stereolithography: pat. 5972563 US; filed 29.07.96; publ. 26.10.99.
34. 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: 07.06.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
35. Stereolithography Resin Compositions and Three-Dimensional Objects Made Therefrom: pat. 8980971 US; filed 21.05.13; publ. 28.11.13.
36. Photosensitive Compositions: pat. 5476748 US; filed 14.12.93; publ. 19.12.95.
37. Method of Forming a Three-Dimensional Object by Stereolithography and Composition Therefore: pat. 4942001 US; filed 31.10.89; publ. 17.07.90.
38. Zhang Y., Li Y., Thakur V.K. et al. Bio-based reactive diluents as sustainable replacements for styrene in MAESO resin // *RSC Advances*. 2018. No. 8. P. 13780. DOI: 10.1039/c8ra00339d.
39. Decker C., Viet T.T., Decker D., Weber-Koehl E. UV-radiation curing of acrylate/epoxide systems // *Polymer*. 2001. No. 42. P. 5531–5541. DOI: 10.1016/S0032-3861(01)00065-9.
40. Cai Y., Jessop J.L.P. Decreased Oxygen Inhibition in Photopolymerized Acrylate/Epoxy Hybrid Polymer Coatings as Demonstrated by Raman Spectroscopy // *Polymer*. 2006. No. 47. P. 6560–6566. DOI: 10.1016/j.polymer.2006.07.031.
41. Lalevé J., Tehfe M.A., Dumur F. et al. Light-Harvesting Organic Photoinitiators of Polymerization // *Macromolecular Rapid Communications*. 2013. No. 34. P. 239–245. DOI: 10.1002/marc.201200578.
42. Wiersma D. The Smallest Random Laser // *Nature*. 2000. No. 406. P. 133–135. DOI: 10.1038/35018184.
43. Green W.A. *Industrial Photo initiators: A Technical Guide*. CRC Press: Boca Raton, 2010. 302 p.
44. Rapid Prototyping Resin Compositions: pat. 8293810 US; filed 29.08.05; publ. 23.10.12.

45. Photopolymerizable Compositions Containing an Alkylbisacylphosphine Oxide: pat. 5472992 US; filed 28.04.94; publ. 05.12.95.
46. Fodran E., Koch M., Menon U. Mechanical and Dimensional Characteristics of Fused Deposition Modeling Build Styles // SFF Symposium Proceedings. 1996. P. 419–442.
47. Wayner D.D.M., Clark K.B., Rauk A., Yu D., Armstrong D.A. C–H Bond Dissociation Energies of Alkyl Amines: Radical Structures and Stabilization Energies // Journal of the American Chemical Society. 1997. No. 119. P. 8925–8932. DOI: 10.1021/ja971365v.
48. Crivello J.V. The Discovery and Development of Onium Salt Cationic Photoinitiators // Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry. 1999. No. 37. P. 4241–4254. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0518(19991201)37:23<4241::AID-POLA1>3.0.CO;2-R.
49. Fouassier J.-P., Lalevée J. Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity, and Efficiency. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012. 490 p.
50. Crivello J.V., Lam J.H.W. Photoinitiated Cationic Polymerization with Triarylsulfonium Salts // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition. 1996. No. 34. P. 32331–3253. DOI: 10.1002/pola.1996.873.
51. Застрогина О.Б., Серкова Е.А., Сарычев И.А., Вавилова М.И. Влияние винифлекса российского и китайского производства на свойства связующего ВФТ и стеклотекстолита на его основе // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
52. Curable Composition: pat. 8362148 US; filed 12.03.08; publ. 29.01.13.
53. Peer G., Eibel A., Gorsche C. et al. Ester-Activated Vinyl Ethers as Chain Transfer Agents in Radical Photopolymerization of Methacrylates // Macromolecules. 2019. No. 52 (7), pp. 2691–2700.
54. Gorsche C., Koch T., Moszner N., Liska R. Exploring the Benefits of  $\beta$ -Allyl Sulfones for More Homogeneous Dimethacrylate Photopolymer Networks // Polymer Chemistry. 2015. No. 6. P. 2038–2047. DOI: 10.1039/C4PY01582G.
55. Gauss P., Ligon-Auer S.C., Griesser M. et al. The Influence of Vinyl Activating Groups on  $\beta$ -Allyl Sulfone-Based Chain Transfer Agents for Tough Methacrylate Networks // Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry. 2016. No. 54. P. 1417–1427. DOI: 10.1002/pola.27993.
56. Gorsche C., Seidler K., Knaack P. et al. Rapid Formation of Regulated Methacrylate Networks Yielding Tough Materials for Lithography-Based 3D Printing // Polymer Chemistry. 2016. No. 7. P. 2009–2014. DOI: 10.1039/C5PY02009C.
57. Yagci Y., Jockusch S., Turro N.J. Photoinitiated Polymerization: Advances, Challenges, and Opportunities // Macromolecules. 2010. No. 43. P. 6245–6260. DOI: 10.1021/ma1007545.
58. Photosensitive Compositions Useful in Three-Dimensional Part-Building and Having Improved Photospeed: pat. 5418112 US; filed 10.11.93; publ. 23.05.95.

### References

1. Vnuk V.V., Kamayev S.V., Markov M.A., Cherebylo S.A. Features of parts fabrication by using multicomponent resins by laser stereolithography. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 31–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-31-36.
2. UV Curable Resins&Formulated Products Market Size | Share | Forecast. Available at: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/uv-curable-resins-formulated-products-market> (accessed: June 07, 2022).
3. Kablov E.N. Additive technologies – the dominant of the national technological initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
4. Kablov E.N. Present and future of additive technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
5. Bednarczyk P., Irska I., Gziut K., Ossowicz-Rupniewska P. Novel Multifunctional Epoxy (Meth)Acrylate Resins and Coatings Preparation via Cationic and Free-Radical Photopolymerization. *Polymers*, 2021, no. 13, pp. 1718. DOI: 10.3390/polym13111718.
6. Manmeet K., Srivastava A.K. Photopolymerization: A review. *Journal of Macromolecular Science. Part C*, 2002, no. 42 (4), pp. 481–512. DOI: 10.1081/MC-120015988.
7. 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.

8. Chatani S., Kloxin C.J., Bowman C.N. The power of light in polymer science: Photochemical processes to manipulate polymer formation, structure, and properties. *Polymer Chemistry*, 2014, no. 5, pp. 2187–2201. DOI: 10.1039/C3PY01334K.
9. Corrigan N., Yeow J., Judzewitsch P., Xu J., Boyer C. Seeing the light: Advancing materials chemistry through photopolymerization. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, no. 58, pp. 5170–5189. DOI: 10.1002/anie.201805473.
10. *Photopolymer composition for 3D printing*: pat. 9902860 US; filed 30.08.16; publ. 01.03.18.
11. *Photocurable resin composition for Stereolithography 3D printing*: pat. 101980037 KR; filed 14.03.17; publ. 29.08.19.
12. *Photocurable material composition and cured product thereof*: pat. 20200157258 US; filed 09.08.13; publ. 10.02.14.
13. Sandmeier M., Paunović N., Conti R. et al. Solvent-Free Three-Dimensional Printing of Biodegradable Elastomers Using Liquid Macrophotoinitiators. *Macromolecules*, 2021, no. 54 (17), pp. 7830–7839. DOI: 10.1021/acs.macromol.1c00856.
14. 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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
15. Zarek M., Layani M., Cooperstein I. et al. 3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices. *Advance Materials*, 2016, no. 28, pp. 4449–4454. DOI: 10.1002/adma.201503132.
16. Palaganas J., de Leon A.C., Mangadlao J. et al. Facile Preparation of Photocurable Siloxane Composite for 3D Printing. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, no. 302 (5), pp. 1–9. DOI: 10.1002/mame.201600477.
17. Patel D.K., Sakhaei A.H., Layani M. et al. Highly Stretchable and UV Curable Elastomers for Digital Light Processing Based 3D Printing. *Advance Materials*, 2017, no. 29, pp. 1–7. DOI: 10.1002/adma.201606000.
18. Stassi S., Fantino E., Calmo R. et al. Polymeric 3D Printed Functional Microcantilevers for Biosensing Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, no. 9 (22), pp. 19193–19201. DOI: 10.1021/acsami.7b04030.
19. Gou M., Qu X., Zhu W. et al. Bio-Inspired Detoxification Using 3D-Printed Hydrogel Nanocomposites. *Nature Communications*, 2014, no. 5, pp. 3774. DOI: 10.1038/ncomms4774.
20. Kablov E.N., Yakovlev N.O., Kharitonov G.M., Mekalina I.V. Features of the relaxation behavior of polymer glasses based on polymethyl methacrylate and their consideration in the strength calculation of aviation glazing. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 9, pp. 2–9.
21. Chiappone A., Fantino E., Roppolo I. et al. 3D Printed PEG-Based Hybrid Nanocomposites Obtained by Sol–Gel Technique. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, no. 8, pp. 5627–5633. DOI: 10.1021/acsami.5b12578.
22. Warner J., Soman P., Zhu W. et al. Design and 3D Printing of Hydrogel Scaffolds with Fractal Geometries. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2016, no. 2, pp. 1763–1770. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.6b00140.
23. Liska R., Schuster M., Inführ R. et al. Photopolymers for Rapid Prototyping. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2007, no. 4, pp. 505–510. DOI: 10.1007/s11998-007-9059-3.
24. Yue J., Zhao P., Gerasimov J.Y. et al. 3D-Printable Antimicrobial Composite Resins. *Advanced Functional Materials*, 2015, no. 25, pp. 6756–6767. DOI: 10.1002/adfm.201502384.
25. Al Mousawi A., Dumur F., Garra P. et al. Carbazole Scaffold Based Photoinitiator/Photoredox Catalysts: Toward New High-Performance Photoinitiating Systems and Application in LED Projector 3D Printing Resins. *Macromolecules*, 2017, no. 50, pp. 2747–2758. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b00210.
26. Al Mousawi A., Garra P., Schmitt M. et al. 3-Hydroxyflavone and N-Phenylglycine in High Performance Photoinitiating Systems for 3D Printing and Photocomposites Synthesis. *Macromolecules*, 2018, no. 51, pp. 4633–4641. DOI: 10.1021/acs.macromol.8b00979.

27. Credi C., Fiorese A., Tironi M. et al. 3D Printing of Cantilever-Type Microstructures by Stereolithography of Ferromagnetic Photopolymers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, no. 8, pp. 26332–26342. DOI: 10.1021/acsami.6b08880.
28. *(Meth)Acrylates Containing Urethane Groups*: pat. 5658712 US; filed 09.08.93; publ. 19.08.97.
29. Boddapati A., Rahane S.B., Slopek R.P. et al. Gel Time Prediction of Multifunctional Acrylates Using a Kinetics Model. *Polymer*, 2011, no. 52, pp. 866–873. DOI: 10.1016/j.polymer.2010.12.024.
30. Ligon-Auer S.C., Schwentenwein M., Gorsche C. et al. Toughening of Photo-Curable Polymer Networks: A Review. *Polymer Chemistry*, 2016, no. 7, pp. 257–286. DOI: 10.1039/C5PY01631B.
31. Kim L.U., Kim J.W., Kim C.K. Effects of Molecular Structure of the Resins on the Volumetric Shrinkage and the Mechanical Strength of Dental Restorative Composites. *Biomacromolecules*, 2006, no. 7, pp. 2680–2687. DOI: 10.1021/bm060453h.
32. Moraes R.R., Garcia J.W., Barros M.D. et al. Control of Polymerization Shrinkage and Stress in Nanogel-Modified Monomer and Composite Materials. *Dental Materials*, 2011, no. 27, pp. 509–519. DOI: 10.1016/j.dental.2011.01.006.
33. *Liquid, Radiation-Curable Composition, Especially for Stereolithography*: pat. 5972563 US; filed 29.07.96; publ. 26.10.99.
34. 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: July 6, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
35. *Stereolithography Resin Compositions and Three-Dimensional Objects Made Therefrom*: pat. 8980971 US; filed 21.05.13; publ. 28.11.13.
36. *Photosensitive Compositions*: pat. 5476748 US; filed 14.12.93; publ. 19.12.95.
37. *Method of Forming a Three-Dimensional Object by Stereolithography and Composition Therefore*: pat. 4942001 US; filed 31.10.89; publ. 17.07.90.
38. Zhang Y., Li Y., Thakur V.K. et al. Bio-based reactive diluents as sustainable replacements for styrene in MAESO resin. *RSC Advances*, 2018, no. 8, pp. 13780. DOI: 10.1039/c8ra00339d.
39. Decker C., Viet T.T., Decker D., Weber-Koehl E. UV-radiation curing of acrylate/epoxide systems. *Polymer*, 2001, no. 42, pp. 5531–5541. DOI: 10.1016/S0032-3861(01)00065-9.
40. Cai Y., Jessop J.L.P. Decreased Oxygen Inhibition in Photopolymerized Acrylate/Epoxy Hybrid Polymer Coatings as Demonstrated by Raman Spectroscopy. *Polymer*, 2006, no. 47, pp. 6560–6566. DOI: 10.1016/j.polymer.2006.07.031.
41. Lalevée J., Tehfe M.A., Dumur F. et al. Light-Harvesting Organic Photoinitiators of Polymerization. *Macromolecular Rapid Communications*, 2013, no. 34, pp. 239–245. DOI: 10.1002/marc.201200578.
42. Wiersma D. The Smallest Random Laser. *Nature*, 2000, no. 406, pp. 133–135. DOI: 10.1038/35018184.
43. Green W.A. *Industrial Photoinitiators: A Technical Guide*. CRC Press: Boca Raton, 2010, 302 p.
44. *Rapid Prototyping Resin Compositions*: pat. 8293810 US; filed 29.08.05; publ. 23.10.12.
45. *Photopolymerizable Compositions Containing an Alkylbisacylphosphine Oxide*: pat. 5472992 US; filed 28.04.94; publ. 05.12.95.
46. Fodran E., Koch M., Menon U. Mechanical and Dimensional Characteristics of Fused Deposition Modeling Build Styles. *SFF Symposium Proceedings*, 1996, pp. 419–442.
47. Wayner D.D.M., Clark K.B., Rauk A., Yu D., Armstrong D.A. C–H Bond Dissociation Energies of Alkyl Amines: Radical Structures and Stabilization Energies. *Journal of the American Chemical Society*, 1997, no. 119, pp. 8925–8932. DOI: 10.1021/ja971365v.
48. Crivello J.V. The Discovery and Development of Onium Salt Cationic Photoinitiators. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 1999, no. 37, pp. 4241–4254. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0518(19991201)37:23<4241::AID-POLA1>3.0.CO;2-R.
49. Fouassier J.-P., Lalevée J. *Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity, and Efficiency*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012, 490 p.

50. Crivello J.V., Lam J.H.W. Photoinitiated Cationic Polymerization with Triarylsulfonium Salts. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 1996, no. 34, pp. 32331–3253. DOI: 10.1002/pola.1996.873.
51. Zastrogina O.B., Serkova E.A., Sarychev I.A., Vavilova M.I. Influence of Russian and Chinese vinylflex on the properties of the VFT binder and fiberglass based on it. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
52. *Curable Composition*: pat. 8362148 US; filed 12.03.08; publ. 29.01.13.
53. Peer G., Eibel A., Gorsche C. et al. Ester-Activated Vinyl Ethers as Chain Transfer Agents in Radical Photopolymerization of Methacrylates. *Macromolecules*, 2019, no. 52 (7), pp. 2691–2700.
54. Gorsche C., Koch T., Moszner N., Liska R. Exploring the Benefits of  $\beta$ -Allyl Sulfones for More Homogeneous Dimethacrylate Photopolymer Networks. *Polymer Chemistry*, 2015, no. 6, pp. 2038–2047. DOI: 10.1039/C4PY01582G.
55. Gauss P., Ligon-Auer S.C., Griesser M. et al. The Influence of Vinyl Activating Groups on  $\beta$ -Allyl Sulfone-Based Chain Transfer Agents for Tough Methacrylate Networks. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2016, no. 54, pp. 1417–1427. DOI: 10.1002/pola.27993.
56. Gorsche C., Seidler K., Knaack P. et al. Rapid Formation of Regulated Methacrylate Networks Yielding Tough Materials for Lithography-Based 3D Printing. *Polymer Chemistry*, 2016, no. 7, pp. 2009–2014. DOI: 10.1039/C5PY02009C.
57. Yagci Y., Jockusch S., Turro N.J. Photoinitiated Polymerization: Advances, Challenges, and Opportunities. *Macromolecules*, 2010, no. 43, pp. 6245–6260. DOI: 10.1021/ma1007545.
58. *Photosensitive Compositions Useful in Three-Dimensional Part-Building and Having Improved Photospeed*: pat. 5418112 US; filed 10.11.93; publ. 23.05.95.

**Информация об авторах**

**Сарычев Игорь Анатольевич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Бутузов Александр Владимирович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Серкова Евгения Алексеевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Долгова Елена Владимировна**, заместитель начальника лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Igor A. Sarychev**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexander V. Butuzov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Evgenia A. Serkova**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Elena V. Dolgova**, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.07.2022.

The article was submitted 27.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 05.07.2022.