

DOI: <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2022-26-2-163-170>

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ



К вопросу о механизме световой полимеризации композитов

Г.Е. Бордина¹, Н.П. Лопина¹, Г.С. Паршин¹, А.А. Андреев¹, И.А. Некрасов²¹ Тверской государственный медицинский университет, г. Тверь, Российская Федерация;² Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор химических аспектов реакции световой полимеризации композитов в стоматологической практике. Данная реакция относится к реакциям свободной радикальной полимеризации, и ее активатором выступают фотоны. Композиты в стоматологии классифицируются на химически отверждаемые, светоотверждаемые, двойного механизма отверждения и теплового отверждения. Это зависит от происхождения энергии активации свободнорадикальной полимеризации метакрилатов. Стоматологические композиты с химической точки зрения обычно представляют собой смесь четырех главных компонентов: органическую полимерную матрицу, неорганический наполнитель, аппрет — соединение, связующее матрицу и наполнитель, а также систему «инициатор — ускоритель». Процесс радикальной полимеризации включает в себя четыре основные стадии. Первой стадией является активация, в случае светоотверждаемых стоматологических композитов — фотоактивация. При этом происходит возбуждение молекулы фотоинициатора, например, камфорохинона, который широко применяется при производстве стоматологических композитных материалов. Следует отметить, что если свободный радикал образован, то процесс полимеризации аналогичен для всех композитных материалов, основанных на метакрилатной органической матрице. Единственная разница заключается в том, как именно образуются свободные радикалы, и в скорости, с которой они образуются. Под воздействием квантов света атом углерода кетонной группы камфорохинона переходит в возбужденное состояние, что позволяет возбужденной молекуле фотоинициатора взаимодействовать с двумя молекулами метакрилатов по двойной связи. Двойная связь отдает один электрон возбужденной молекуле камфорохинона, а второй электрон действует в качестве свободного радикального агента. Другими словами, образуется макрорадикал — молекула мономера, которая способна присоединять к себе другие молекулы мономеров.

Ключевые слова: композиты; световая полимеризация; фотоинициатор; соинициатор; камфорохинон.

Как цитировать:

Бордина Г.Е., Лопина Н.П., Паршин Г.С., Андреев А.А., Некрасов И.А. К вопросу о механизме световой полимеризации композитов // Российский стоматологический журнал. 2022. Т. 26, № 2. С. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2022-26-2-163-170>

DOI: <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2022-26-2-163-170>

REVIEW ARTICLE

Mechanism of light polymerization of composites

Galina E. Bordina¹, Nadezhda P. Lopina¹, Gleb S. Parshin¹, Alexey A. Andreev¹, Ilya A. Nekrasov²

¹ Tver State Medical University, Tver, Russian Federation;

² RUDN University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The article presents a review of the chemical aspects of the reaction of light polymerization of composites in dental practice. This reaction refers to free radical polymerization reactions, with photons as activators. In dentistry, composites are classified as chemically cured, light cured, doubly cured, and thermally cured. This depends on the origin of the activation energy of free radical polymerization of methacrylates. Chemically, dental composites are usually a mixture of four main components: an organic polymer matrix, an inorganic filler, an appret compound, a binder matrix and filler, and an initiator–accelerator system. The radical polymerization process includes four main stages. The first stage is activation; in the case of light cured dental composites, it is photoactivation. In this case, a photoinitiator molecule is excited, for example, camphorquinone, which is widely used in the production of dental composite materials. If a free radical is formed, the polymerization process is similar for all composite materials based on a methacrylate organic matrix. The only difference is exactly how free radicals are formed and the rate of their formation. Under the influence of light quanta, the carbon atom of the ketone group of camphorquinone passes into an excited state, which allows the excited photoinitiator molecule to interact with two methacrylate molecules by a double bond. The double bond gives one electron to the excited camphorquinone molecule, and the second electron acts as a free radical agent; in other words, a macroradical is formed—a monomer molecule that can attach other monomer molecules to itself.

Keywords: composites; light polymerization; photoinitiator; coinitiator; camphorquinone.

To cite this article:

Bordina GE, Lopina NP, Parshin GS, Andreev AA, Nekrasov IA. Mechanism of light polymerization of composites. *Russian Journal of Dentistry*. 2022;26(2):163–170. DOI: <https://doi.org/10.17816/1728-2802-2022-26-2-163-170>

Received: 05.01.2022

Accepted: 16.02.2022

Published: 15.07.2022

АКТУАЛЬНОСТЬ

На сегодняшний день композиты являются тем реставрационным материалом, который используется в каждом стоматологическом кабинете [1, 2]. Серебряная амальгама и неорганические цементы были заменены композитными материалами в качестве наиболее частых материалов прямой реставрации. Помимо эстетической привлекательности композитов, подобная замена также объясняется недостаточной биосовместимостью [3, 4] амальгамы и спорными физико-механическими свойствами неорганических цемента [3].

На сегодняшний день разработка наполнителей, адгезивных систем и новых технологий в отрасли эстетических реставрационных стоматологических материалов идет полным ходом [5]. Композитные смолы имеют изначально тестобразную консистенцию и затвердевают в ходе реакции полимеризации. Стоматологические композиты с химической точки зрения обычно представляют собой смесь четырех главных компонентов: органическую полимерную матрицу, неорганический наполнитель, аппрет (связующее соединение) и систему «инициатор — ускоритель». На данный момент в качестве инициатора наиболее широко используется камфорохинон [6–8]. Он применяется в сочетании с соинициатором, который также является ускорителем полимеризации, обычно третичным амином. Третичный амин по своей химической структуре является органическим основанием. Однако у третичных аминов основные свойства выражены слабее, чем у первичных и вторичных аминов. Это объясняется затрудненным доступом реагента к нуклеофильному азоту из-за наличия трех объемных радикалов. Амин не поглощает свет, но необходим для образования молекулой

камфорохинона, активированной светом, свободных радикалов и, следовательно, инициирования радикальной полимеризации [9–11].

Самые распространенные в стоматологической практике мономеры в составе композитов — сложные эфиры метакриловой кислоты, метакрилаты Bis-GMA (бисфенол-А-глицидилметакрилат) и UDMA (уретандиметакрилат), но также применяются и другие мономеры, представленные на рис. 1 [12].

Композиты в стоматологии классифицируются на химически отверждаемые, светоотверждаемые, двойного механизма отверждения и теплового отверждения в зависимости от происхождения энергии активации свободнорадикальной полимеризации метакрилатов [5, 13]. Если свободный радикал образован, процесс полимеризации аналогичен для всех композитных материалов, основанных на метакрилатной органической матрице.

Процесс радикальной полимеризации включает в себя четыре основные стадии. Первой стадией является активация, в случае светоотверждаемых композитов — фотоактивация с возбуждением молекулы фотоинициатора камфорохинона, который наиболее широко применяется для этих целей в стоматологии. Камфорохинон имеет диапазон поглощения света от 400 до 500 нм с максимумом при длине волны в 468 нм [14, 15]. Под воздействием фотонов атом углерода кетонной группы камфорохинона переходит в возбужденное состояние, что позволяет молекуле фотоинициатора взаимодействовать с двумя молекулами метакрилатов по каждой из метакрилатных двойных связей (рис. 2).

Двойная связь отдает один электрон возбужденной молекуле камфорохинона, а второй электрон действует в качестве свободного радикального агента, другими

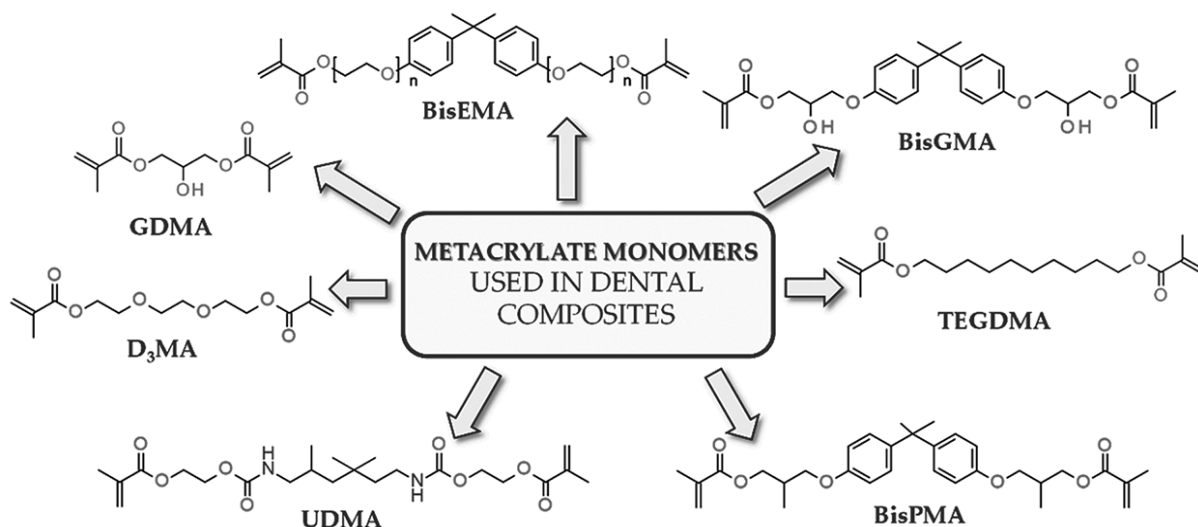


Рис. 1. Метакрилатные мономеры, входящие в состав стоматологических композитов [12]

Fig. 1. Methacrylate monomers included in dental composites [12]

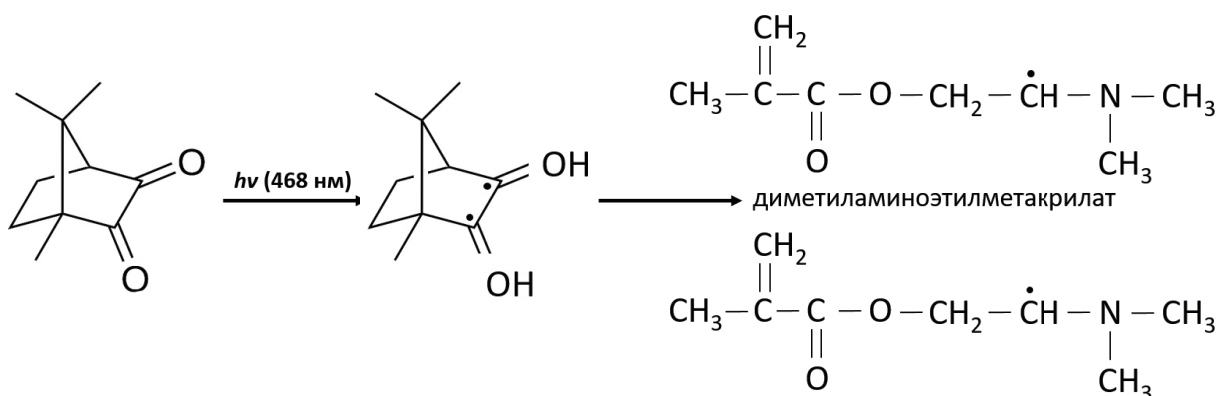


Рис. 2. Возбуждение молекулы камфорохинона и дальнейшее образование двух метакрилатных монорадикалов
Fig. 2. Excitation of the camphoroquinone molecule and further formation of two methacrylate monoradicals

словами, образуется макрорадикал — молекула мономера, которая способна присоединять к себе другие молекулы мономеров. Однако без участия третичного амина в качестве соинициатора реакция протекает медленно [16–18]. При этом коэффициент молярной экстинкции камфорохинона в диапазоне излучения в 400–500 нм составляет всего $40 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [19, 20], т. е. можно сказать, что камфорохинон слабо поглощает свет данной длины волны. Следовательно, системы инициации, основывающиеся только на камфорохиноне без соинициаторов, имеют низкий коэффициент полезного действия при активации стоматологическими светодиодными полимеризационными лампами с длиной волны излучения в 420–515 нм, так как большая часть энергии излучения лампы рассеивается в виде тепла. Следовательно, эффективность полимеризации метакрилатов в присутствии только камфорохинонов недостаточна для полноценного применения *in vivo*. Тем не менее скорость полимеризации значительно возрастает, когда третичные амины добавляются в состав композита в качестве соинициатора камфорохинона.

В качестве соинициатора камфорохинона используются такие амины, как этил-4-диметиламинобензоат и 2-диметиламиноэтилметакрилат [21, 22]. Наиболее популярным соинициатором в составе стоматологических композитов является этил-4-диметиламинобензоат из-за своей высокой эффективности и низкой основности, так как композиты более прочны и долговечны в условиях кислой и нейтральных сред [23].

На стадии образования радикалов в ходе фотолиза молекула амина взаимодействует с возбужденной молекулой камфорохинона. Это взаимодействие включает перенос электрона от амина к карбонильной группе с последующим отщеплением протона [24]: имеет место фотоиндуцированный протон-электронный перенос (рис. 3).

Еще одним механизмом, влияющим на эффективность аминов в качестве соинициаторов камфорохинона, является способность аминов поглощать кислород с образованием свободных радикалов: кислород, который присутствует в мономере, может реагировать с аминами с образованием перекисного радикала [25]. Данный

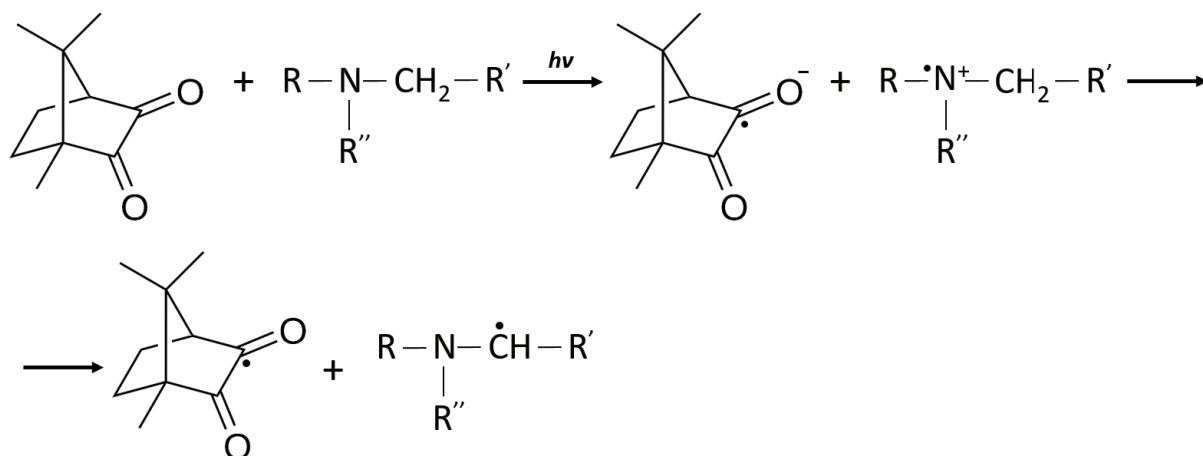


Рис. 3. Механизм бимолекулярной фотоиницирующей системы, содержащей камфорохинон и третичный амин
Fig. 3. Mechanism of a bimolecular photoinitiating system containing camphoroquinone and tertiary amine

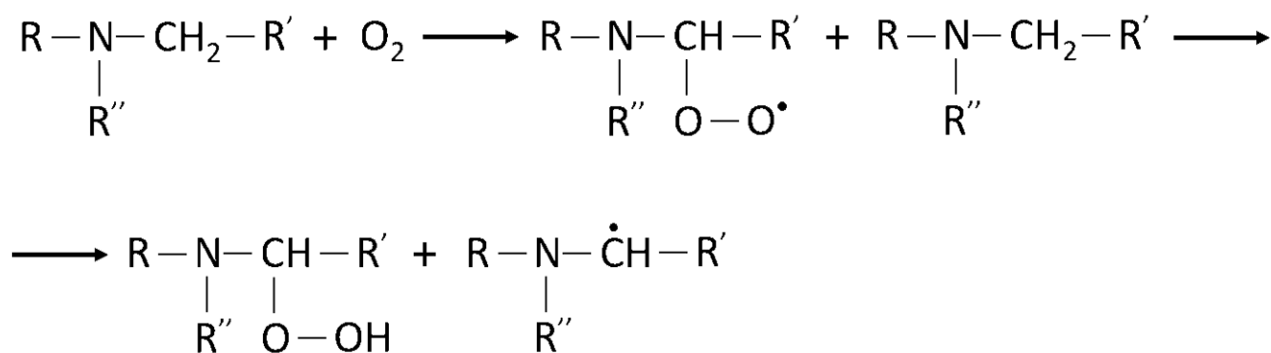
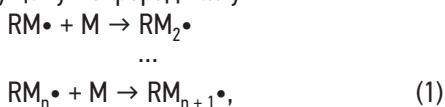


Рис. 4. Механизм реакции третичного амина с кислородом.
Fig. 4. Mechanism of reaction of tertiary amine with oxygen.

перекисный радикал, в свою очередь, может реагировать с другой молекулой амина с образованием нового свободного радикала (рис. 4). Также перекисные радикалы могут инициировать свободную радикальную полимеризацию подобно свободным радикалам перекиси бензоила в композитах химического отверждения [26].

У камфороксинона имеются две карбонильные группы, каждая из которых реагирует так, как показано на схеме (рис. 5), — с образованием радикальных центров. Из одной молекулы камфороксинона образуется 4 радикальных центра — две в одной молекуле камфороксинона и по одному центру в двух молекулах третичных аминов. Это является причиной того, что оптимальное соотношение камфороксинона и амина составляет 1 : 2 по количеству вещества, и именно это соотношение обычно включается в композитный состав [25]. Этап реакции свободной радикальной полимеризации, описанный выше, является первым и называется инициацией. В общем же виде его можно представить так (см. рис. 5).

Следующей является стадия роста цепи, которая заключается в последовательном присоединении молекул мономера к растущему макрорадикалу:



где RM^\bullet — макрорадикал, M — молекула метакрилата.

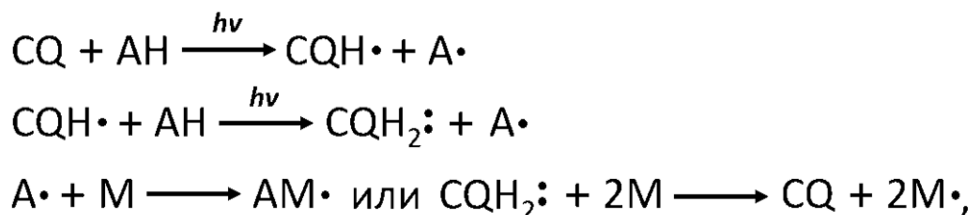


Рис. 5. Образование четырех радикальных центров, где CQ — камфороксинон, AH — протонированный амин, M — метакрилат
Fig. 5. Formation of four radical centers, where CQ — camphoroquinone, AH — protonated amine, M — methacrylate

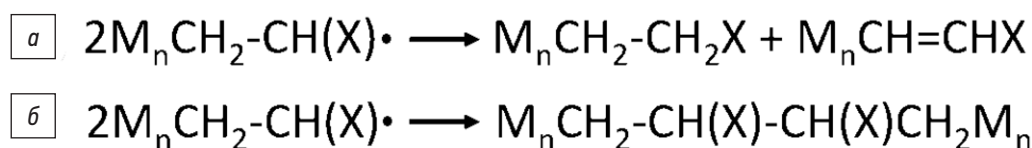


Рис. 6. Два механизма третьей завершающей стадии полимеризации: а) реакция диспропорционирования; б) реакция рекомбинации

Fig. 6. Two mechanisms of the third final stage of polymerization: a) disproportionation reaction; b) recombination reaction

в растворе (мономер, полимер, инициатор и др.). Если новый радикал малоактивен, то либо скорость полимеризации замедляется, либо процесс останавливается. При этом макромолекула теряет возможность дальнейшего роста:



где $M_n\cdot$ — макрорадикал, U — иная молекула.

Большинство стоматологических композитов также содержит в своем составе мономерные единицы, такие как TEGDMA, Bis-EMA и пр., которые имеют две и более двойные связи, позволяющие «сшивать» две соседние полимерные цепи [29], для улучшения рабочих свойств композитного материала и возникновения эффекта «сшивания» полимерных цепей:



где $M_n\cdot$ — макрорадикал, B — «сшивающий» мономер.

«Сшивание» цепей для стоматологических композитов является благоприятным явлением, так как композиты, в которых цепи макромолекул «сшиты» во множестве участков, более прочны на разрыв, более жесткие, менее гибкие и упругие, а также более устойчивые к высоким температурам [30]. Стоит заметить, что использование различных режимов световой полимеризации или источников излучения может обуславливать различное количество мест «сшиваний» в идентичном композитном составе. Этот эффект обуславливает тот факт, что различные растворители, пища и ферменты могут по-разному влиять на пломбу

из композита в полости рта в зависимости от того, как именно полимеризовался данный композит светового отверждения [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на особенности образования радикалов, с точки зрения классической химии все три этапа фотохимической свободнорадикальной цепной полимеризации присутствуют при световой полимеризации стоматологических композитов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / ADDITIONAL INFO

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции в равных долях.

Author contribution. All authors have made a significant contribution to the development of the concept in equal parts.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лалатович А.М., Ваниев М.А., Сидоренко Н.В., и др. Фотополимеризующие композиции и источники света для стоматологической практики (обзор) // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 12 (259). С. 7–22. doi: 10.35211/1990-5297-2021-12-259-7-22
2. Riva Y.R., Rahman S.F. Dental composite resin: A review // AIP Conf Proc. 2019. Vol. 2193, N 1. P. 020011. doi: 10.1063/1.5139331
3. Kim D.H., Sung A.Y. Photopolymerization and Characterization of Dental Resin Cement Containing Nano Material // J Nanosci Nanotechnol. 2018. Vol. 18, N 9. P. 6122–6126. doi: 10.1166/jnn.2018.15605
4. Буркова А.А., Щербакова С.Б. Выбор стоматологической полимеризационной лампы для светоотверждаемого композиционного материала Filtek Ultimate // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2018. Т. 8, № 7. С. 260.
5. Zhou X., Huang X., Li M., et al. Development and status of resin composite as dental restorative materials // J Appl Polym Sci. 2019. Vol. 136, N 44. P. 48180. doi: 10.1002/app.48180
6. Байт Саид О.М., Разумова С.Н., Величко Э.В. К вопросу о композитных материалах // Российский стоматологический журнал. 2020. Т. 24, № 4. С. 278–282. doi: 10.17816/1728-2802-2020-24-4-278-282
7. Lima A.F., Salvador M.V.O., Dressano D., et al. Increased rates of photopolymerisation by ternary type II photoinitiator systems in dental resins // J Mech Behav Biomed Mater. 2019. Vol. 98. P. 71–78. doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.06.005

8. Kim D.H., Lee M.J., Sung A.Y. Preparation and Characterization of Novel Dental Material with High Shear Bond Strength // *J Nanosci Nanotechnol*. 2018. Vol. 18, N 9. 6355–6359. doi: 10.1166/jnn.2018.15654
9. Бобылева Ю.В., Петрова А.П., Коротков М.М. Оценка физико-технических характеристик фотополимеризующих устройств в стоматологии // *Евразийское научное объединение*. 2018. № 1–2 (35). С. 96–98.
10. Koulaouzidou E.A., Roussou K., Sidiropoulos K., et al. Investigation of the chemical profile and cytotoxicity evaluation of organic components eluted from pit and fissure sealants // *Food Chem Toxicol*. 2018. Vol. 120. P. 536–543. doi: 10.1016/j.fct.2018.07.042
11. Fugolin A.P.P., Pfeifer C.S. New Resins for Dental Composites // *J Dent Res*. 2017. Vol. 96, N 10. P. 1085–1091. doi: 10.1177/0022034517720658
12. Топа М. Light cured dental composite resins [Internet]. Encyclopedia [дата обращения: 7.06.2022]. Режим доступа: <https://encyclopedia.pub/item/revision/cc56ab086bd8c94dd72116f4b2e9eb6d>.
13. Le Gars M., Bras J., Salmi-Mani H., et al. Polymerization of glycidyl methacrylate from the surface of cellulose nanocrystals for the elaboration of PLA-based nanocomposites // *Carbohydr Polym*. 2020. Vol. 234. P. 115899. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.115899
14. Rueggeberg F.A., Giannini M., Arrais C.A.G., Price R.B.T. Light curing in dentistry and clinical implications: a literature review // *Braz Oral Res*. 2017. Vol. 31, suppl. 1. P. e61. doi: 10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0061
15. Palialol A.R., Martins C.P., Dressano D., et al. Improvement on properties of experimental resin cements containing an iodonium salt cured under challenging polymerization conditions // *Dent Mater*. 2021. Vol. 37, N 10. P. 1569–1575. doi: 10.1016/j.dental.2021.08.006
16. Гуцин А.А., Адамчик А.А. Способы улучшения физико-механических и химических свойств композитных пломбирочных материалов // *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. 2020. Т. 22, № 2. С. 36–41. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-2-36-41
17. Favarão J., Oliveira D.C.R.S., Rocha M.G., et al. Solvent Degradation and Polymerization Shrinkage Reduction of Resin Composites Using Isobornyl Methacrylate // *Braz Dent J*. 2019. Vol. 30, N 3. P. 272–278. doi: 10.1590/0103-6440201802525
18. Albuquerque P.P.A.C., Rodrigues E.C., Schneider L.F., et al. Effect of an acidic sodium salt on the polymerization behavior of self-adhesive resin cements formulated with different adhesive monomers // *Dent Mater*. 2018. Vol. 34, N 9. P. 1359–1366. doi: 10.1016/j.dental.2018.06.022
19. Wang R., Li Y., Hass V., et al. Methacrylate-functionalized proanthocyanidins as novel polymerizable collagen cross-linkers — Part 2: Effects on polymerization, microhardness and leaching of adhesives // *Dent Mater*. 2021. Vol. 37, N 7. P. 1193–1201. doi: 10.1016/j.dental.2021.04.010
20. Kruly P.C., Giannini M., Pascotto R.C., et al. Meta-analysis of the clinical behavior of posterior direct resin restorations: Low polymerization shrinkage resin in comparison to methacrylate composite resin // *PLoS One*. 2018. Vol. 13, N 2. P. e0191942. doi: 10.1371/journal.pone.0191942
21. Inami C., Shimizu H., Suzuki S., et al. Study on the performance of methyl methacrylate polymerization: Comparison of partially oxidized tri-n-butylborane and benzoyl peroxide with aromatic tertiary amines // *Dent Mater J*. 2019. Vol. 38, N 3. P. 430–436. doi: 10.4012/dmj.2018-166
22. He J., Garoushi S., Säilynoja E., et al. The effect of adding a new monomer “Phene” on the polymerization shrinkage reduction of a dental resin composite // *Dent Mater*. 2019. Vol. 35, N 4. P. 627–635. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.006
23. Yoshihara K., Nagaoka N., Benino Y., et al. Touch-Cure Polymerization at the Composite Cement-Dentin Interface // *J Dent Res*. 2021. Vol. 100, N 9. P. 935–942. doi: 10.1177/00220345211001020
24. Fugolin A.P., de Paula A.B., Dobson A., et al. Alternative monomer for BisGMA-free resin composites formulations // *Dent Mater*. 2020. Vol. 36, N 7. P. 884–892. doi: 10.1016/j.dental.2020.04.009
25. Fugolin A.P.P., Costa A.R., Correr-Sobrinho L., et al. Toughening and polymerization stress control in composites using thio-urethane-treated fillers // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11, N 1. P. 7638. doi: 10.1038/s41598-021-87151-9
26. Fugolin A.P., Dobson A., Ferracane J.L., Pfeifer C.S. Effect of residual solvent on performance of acrylamide-containing dental materials // *Dent Mater*. 2019. Vol. 35, N 10. P. 1378–1387. doi: 10.1016/j.dental.2019.07.003
27. Sprick E., Becht J.M., Graff B., et al. New hydrogen donors for amine-free photoinitiating systems in dental materials // *Dent Mater*. 2021. Vol. 37, N 3. P. 382–390. doi: 10.1016/j.dental.2020.12.013
28. Amiri P., Talebi Z., Semnani D., et al. Improved performance of Bis-GMA dental composites reinforced with surface-modified PAN nanofibers // *J Mater Sci Mater Med*. 2021. Vol. 32, N 7. P. 82. doi: 10.1007/s10856-021-06557-z
29. Salvador M.V., Fronza B.M., Pecorari V.G.A., et al. Physicochemical properties of dental resins formulated with amine-free photoinitiation systems // *Dent Mater*. 2021. Vol. 37, N 9. P. 1358–1365. doi: 10.1016/j.dental.2021.06.005
30. Fugolin A.P., Dobson A., Mbiya W., et al. Use of (meth)acrylamides as alternative monomers in dental adhesive systems // *Dent Mater*. 2019. Vol. 35, N 5. P. 686–696. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.012
31. Sinha J., Dobson A., Bankhar O., et al. Vinyl sulfonamide based thermosetting composites via thiol-Michael polymerization // *Dent Mater*. 2020. Vol. 36, N 2. 249–256. doi: 10.1016/j.dental.2019.11.012

REFERENCES

1. Lalatovich AM, Vaniev MA, Sidorenko NV, et al. Photopolymerizable compositions and light sources for dental practice (review). *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;(12):7–22. (In Russ). doi: 10.35211/1990-5297-2021-12-259-7-22
2. Riva YR, Rahman SF. Dental composite resin: A review. *AIP Conf Proc*. 2019;2193(1):020011. doi: 10.1063/1.5139331
3. Kim DH, Sung AY. Photopolymerization and Characterization of Dental Resin Cement Containing Nano Material. *J Nanosci Nanotechnol*. 2018;18(9):6122–6126. doi: 10.1166/jnn.2018.15605
4. Burkova AA, Shcherbakova SB. Choice of dental curing lamp for Filtek Ultimate light-curing composite material. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2018;8(7):260. (In Russ).
5. Zhou X, Huang X, Li M, et al. Development and status of resin composite as dental restorative materials. *J Appl Polym Sci*. 2019;136(44):48180. doi: 10.1002/app.48180
6. Bait Said OM, Razumova SV, Velichko EV. On the issue of composite materials. *Russian Journal of Dentistry*. 2020;24(4):278–282. (In Russ). doi: 10.17816/1728-2802-2020-24-4-278-282

7. Lima AF, Salvador MVO, Dressano D, et al. Increased rates of photopolymerisation by ternary type II photoinitiator systems in dental resins. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2019;98:71–78. doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.06.005
8. Kim DH, Lee MJ, Sung AY. Preparation and Characterization of Novel Dental Material with High Shear Bond Strength. *J Nanosci Nanotechnol*. 2018;18(9):6355–6359. doi: 10.1166/jnn.2018.15654
9. Bobyleva YuV, Petrova AP, Korotkov MM. Evaluation of the physical and technical characteristics of photopolymerizing devices in dentistry. *Eurasian Scientific Association*. 2018;(1–2):96–98. (In Russ).
10. Koulaouzidou EA, Roussou K, Sidiropoulos K, et al. Investigation of the chemical profile and cytotoxicity evaluation of organic components eluted from pit and fissure sealants. *Food Chem Toxicol*. 2018;120:536–543. doi: 10.1016/j.fct.2018.07.042
11. Fugolin APP, Pfeifer CS. New Resins for Dental Composites. *J Dent Res*. 2017;96(10):1085–1091. doi: 10.1177/0022034517720658
12. Topa M. Light cured dental composite resins [Internet]. Encyclopedia [cited 2022 June 7]. Available from: <https://encyclopedia.pub/item/revision/cc56ab086bd8c94dd72116f4b2e9eb6d>.
13. Le Gars M, Bras J, Salmi-Mani H, et al. Polymerization of glycidyl methacrylate from the surface of cellulose nanocrystals for the elaboration of PLA-based nanocomposites. *Carbohydr Polym*. 2020;234:115899. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.115899
14. Rueggeberg FA, Giannini M, Arrais CAG, Price RBT. Light curing in dentistry and clinical implications: a literature review. *Braz Oral Res*. 2017;31(Suppl. 1):e61. doi: 10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0061
15. Palialol AR, Martins CP, Dressano D, et al. Improvement on properties of experimental resin cements containing an iodonium salt cured under challenging polymerization conditions. *Dent Mater*. 2021;37(10):1569–1575. doi: 10.1016/j.dental.2021.08.006
16. Gushchin AA, Adamchik AA. Methods for improving the physico-mechanical and chemical properties of composite filling materials. *Medical and Pharmaceutical Journal "Pulse"*. 2020;22(2):36–41. (In Russ). doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-2-36-41
17. Favarão J, Oliveira DCRS, Rocha MG, et al. Solvent Degradation and Polymerization Shrinkage Reduction of Resin Composites Using Isobornyl Methacrylate. *Braz Dent J*. 2019;30(3):272–278. doi: 10.1590/0103-6440201802525
18. Albuquerque PPAC, Rodrigues EC, Schneider LF, et al. Effect of an acidic sodium salt on the polymerization behavior of self-adhesive resin cements formulated with different adhesive monomers. *Dent Mater*. 2018;34(9):1359–1366. doi: 10.1016/j.dental.2018.06.022
19. Wang R, Li Y, Hass V, et al. Methacrylate-functionalized proanthocyanidins as novel polymerizable collagen cross-linkers — Part 2: Effects on polymerization, microhardness and leaching of adhesives. *Dent Mater*. 2021;37(7):1193–1201. doi: 10.1016/j.dental.2021.04.010
20. Kruly PC, Giannini M, Pascotto RC, et al. Meta-analysis of the clinical behavior of posterior direct resin restorations: Low polymerization shrinkage resin in comparison to methacrylate composite resin. *PLoS One*. 2018;13(2):e0191942. doi: 10.1371/journal.pone.0191942
21. Inami C, Shimizu H, Suzuki S, et al. Study on the performance of methyl methacrylate polymerization: Comparison of partially oxidized tri-n-butylborane and benzoyl peroxide with aromatic tertiary amines. *Dent Mater J*. 2019;38(3):430–436. doi: 10.4012/dmj.2018-166
22. He J, Garoushi S, Säilynoja E, et al. The effect of adding a new monomer “Phene” on the polymerization shrinkage reduction of a dental resin composite. *Dent Mater*. 2019;35(4):627–635. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.006
23. Yoshihara K, Nagaoka N, Benino Y, et al. Touch-Cure Polymerization at the Composite Cement-Dentin Interface. *J Dent Res*. 2021;100(9):935–942. doi: 10.1177/00220345211001020
24. Fugolin AP, de Paula AB, Dobson A, et al. Alternative monomer for BisGMA-free resin composites formulations. *Dent Mater*. 2020;36(7):884–892. doi: 10.1016/j.dental.2020.04.009
25. Fugolin APP, Costa AR, Correr-Sobrinho L, et al. Toughening and polymerization stress control in composites using thiourethane-treated fillers. *Sci Rep*. 2021;11(1):7638. doi: 10.1038/s41598-021-87151-9
26. Fugolin AP, Dobson A, Ferracane JL, Pfeifer CS. Effect of residual solvent on performance of acrylamide-containing dental materials. *Dent Mater*. 2019;35(10):1378–1387. doi: 10.1016/j.dental.2019.07.003
27. Sprick E, Becht JM, Graff B, et al. New hydrogen donors for amine-free photoinitiating systems in dental materials. *Dent Mater*. 2021;37(3):382–390. doi: 10.1016/j.dental.2020.12.013
28. Amiri P, Talebi Z, Semnani D, et al. Improved performance of Bis-GMA dental composites reinforced with surface-modified PAN nanofibers. *J Mater Sci Mater Med*. 2021;32(7):82. doi: 10.1007/s10856-021-06557-z
29. Salvador MV, Fronza BM, Pecorari VGA, et al. Physico-chemical properties of dental resins formulated with amine-free photoinitiation systems. *Dent Mater*. 2021;37(9):1358–1365. doi: 10.1016/j.dental.2021.06.005
30. Fugolin AP, Dobson A, Mbiya W, et al. Use of (meth)acrylamides as alternative monomers in dental adhesive systems. *Dent Mater*. 2019;35(5):686–696. doi: 10.1016/j.dental.2019.02.012
31. Sinha J, Dobson A, Bankhar O, et al. Vinyl sulfonamide based thermosetting composites via thiol-Michael polymerization. *Dent Mater*. 2020;36(2):249–256. doi: 10.1016/j.dental.2019.11.012

ОБ АВТОРАХ

* **Бордина Галина Евгеньевна**, канд. биол. наук, доцент;
адрес: Россия, 170000, Тверь, ул. Советская, д. 4;
e-mail: gbordina@yandex.ru

Лопина Надежда Петровна, канд. хим. наук, профессор;
e-mail: nadezhda_lopina@mail.ru

Паршин Глеб Сергеевич, студент;
e-mail: gleb180699@gmail.com

Андреев Алексей Алексеевич, студент;
e-mail: aandreev01@yandex.ru

Некрасов Илья Алексеевич, студент;
e-mail: ilya.nekrasov.01@bk.ru

AUTHORS INFO

* **Galina E. Bordina**, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor;
address: 4, Sovetskaya St., Tver, 170000, Russia;
e-mail: gbordina@yandex.ru

Nadezhda P. Lopina, Cand. Sci. (Chem.), Professor;
e-mail: nadezhda_lopina@mail.ru

Parshin Gleb Sergeevich, Student;
e-mail: gleb180699@gmail.com

Alexey A. Andreev, Student;
e-mail: aandreev01@yandex.ru

Ilya A. Nekrasov, Student;
e-mail: ilya.nekrasov.01@bk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author