

## Управление технологическими процессами фотополимеризации

Н. Г. Филиппенко<sup>1</sup>✉, Т. Т. Чумбадзе<sup>1</sup>, А. А. Беломестных<sup>1</sup>, Т. В. Пискажова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ ifpi@mail.ru

### Резюме

В данной статье исследуется понятие фотополимера, его ультрафиолетовое излучение зоны А и зоны С. Общий механизм полимеризации фотоотверждаемых композиций. Изучен фотополимер ROEHM R-50, его достоинства и недостатки. По недостаткам фотополимера ставится задача, направленная на разработку методики получения композиционно-конструкционных фотополимеров. На основе этого рассматривается терминологическая особенность понятия композиционных материалов (композит). На базе данного способа упрочнения изделий машиностроения, используемого на железной дороге, так называемого наклепа, его понятия, получения в процессе пластической деформации дается графическая иллюстрация наклепа в разрезе. Также показывается изменение им механических характеристик исходного материала. Рассматривается физика процесса формирования наклепного слоя на поверхности изделия. На основе анализа неклепного упрочнения предложена методика упрочнения изделий из фотополимера с использованием раstra (растровое упрочнение), что, в свою очередь, идентично процессу наклепа. Показан процесс изготовления изделий из фотополимера с растром (растровым упрочнением), дается описание процессов полимеризации фотополимера с растром (растровым упрочнением). Приводятся показатели твердости по результатам экспериментов фотополимера и фотополимера с растром (растровым упрочнением). Проведенный анализ данных позволил подтвердить предложенную методику по увеличению твердости за счет раstra (растрового упрочнения), способного устранить один из недостатков фотополимера. Для устранения других выявленных недостатков фотополимера в статье были поставлены задачи и определены направления изучения композиционного материала (композита) – полиакрилата, что является целью дальнейших исследований.

### Ключевые слова

фотополимер, полимеризация, наклеп, растр, растровое упрочнение

### Для цитирования

Филиппенко Н. Г. Управление технологическими процессами фотополимеризации / Н. Г. Филиппенко, Т. Т. Чумбадзе, А. А. Беломестных, Т. В. Пискажова // Современная технология. Системный анализ. Моделирование. - 2021. - 3 (71). - С. 19-24. - DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).19-24

### Информация о статье

поступила в редакцию: 14.08.2021, поступила после рецензирования: 26.08.2021, принята к публикации: 29.08.2021

## Management of technological processes of photopolymerization

N. G. Filippenko<sup>1</sup>✉, T. T. Chumbadze<sup>1</sup>, A. A. Belomestnykh<sup>1</sup>, T. V. Piskazhova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ ifpi@mail.ru

### Abstract

In the article the concept of photopolymer is studied, as well as its UV radiation of zone A and zone C and the general mechanism of polymerization of photocurable compositions. Advantages and flaws of a Photopolymer ROEHM R-50 were studied. As to the photopolymer's flaws, the task was to develop a method for obtaining composite structural photopolymers. Based on this, the terminological specifics of the concept of composite materials (composite) are considered. One of the methods of product strengthening in mechanical engineering used on the railway, the so-called work hardening is considered as well as its concept and production in the process of plastic deformation and its graphic illustration is shown in cross section. Also, the change in the mechanical characteristics of the initial material is shown. Formation of a hardened layer on the surface of the product is also considered. The technique for photopolymer product hardening is proposed based on the analysis of the work hardening, using raster (raster hardening), which in turn is identical to the work hardening process. A process of manufacturing of photopolymer products with a raster (raster hardening) is shown with a description of the polymerization processes of a photopolymer with a raster (raster hardening). Hardness indicators are given based on the experiments with photopolymer and photopolymer with a raster (raster hardening). The data analysis given made it possible to confirm the proposed technique of hardening due to raster (raster hardening), capable of eliminating one of the photopolymer's flaws. To eliminate other identified flaws of the photopolymer, the tasks were set and directions determined for the study a composite material (composite) - polyacrylate which is to be the goal of further research.

**Keywords**

photopolymer, polymerization, work hardening, raster, raster hardening

**For citation**

Filippenko N.G., Chumbadze T.T., Belomestnykh . . ., Piskazhova T.V. Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami fotopolimerizatsii [Management of technological processes of photopolymerization]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3(71), pp. 19–24. -DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).19-24

**Article Info**

Received: 14.08.2021, Revised: 26.08.2021, Accepted: 29.08.2021

**Введение**

Фотополимеры – общее название группы полимеров и полимеризационно-способных соединений, отверждение которых осуществляется световым облучением. Они отверждаются светом, при этом не выделяя побочных веществ, не изменяясь визуально (только твердеют), проявляя завидные прочностные и стойкостные характеристики. К примеру, если прочность при сжатии стандартной эпоксидной пластмасы (одной из наиболее прочных и поэтому применяемых в промышленности и быту) – 140–160 МПа, то прочность фотополимерных композитов – 180–300 МПа, т. е. на 30–80 % выше (рис. 1).

Ультрафиолетовые (УФ) излучения зоны А (315–380 нм) примерно 360 нм и источник УФ-излучения зоны С (200–280 нм) – 256 нм. Финишнинг необходим для закрытия пор [1].

Для исследований нами был использован фотополимер ROEHM R-50, производство США (рис. 2).

имеет ряд преимуществ:

- быстрота затвердевания (минимальное время засветки 30 с, что ускоряет время работы);
- универсальность (пригодный для работы с любой моделью экспонирующей камеры);
- высокая текучесть и средняя вязкость;
- срок годности (значительно дольше, чем у других видов жидких полимеров, что актуально при оптовой закупке материала) [2, 3].



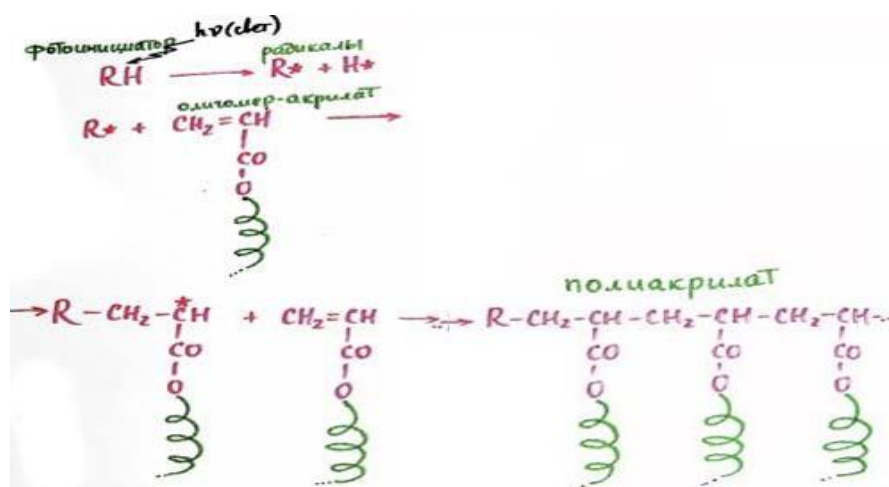
**Рис. 2.** Фотополимер ROEHM R-50

**Fig. 2.** Photopolymer ROEHM R-50

По сравнению с другими фотополимерами, он Так же нами были изучены технологии изготовления изделий из фотополимера, по которым мы сделали вывод, что полученные изделия имеют:

- низкую ударопрочность и износостойкость;
- недостаточную твердость;
- недостаточную пластичность материала.

Устранение указанных недостатков изделий из фотополимера, сдерживающих их широкое использование на транспорте, нам видится при решении задачи, направленной на разработку методики получения композиционно-конструкционных фото-



**Рис. 1.** Общий механизм полимеризации фотоотверждаемых композиций

**Fig. 1.** General mechanism of polymerisation of photocured compositions

полимеров.

Композитный материал (композит) – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, отличающихся как химическими, так и физическими свойствами, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующие), обеспечивающие совместимую работу армирующих элементов. В результате соединения этих материалов с уникальными свойствами получается композит с характеристиками, которыми каждый материал в отдельности обладать не может [4, 5].

Несмотря на достоинства, описанная технология не всегда позволяет получить материалы с локально или поверхностно измененными свойствами. В изделиях из металлов эту задачу решает термообработка, физико-химическая обработка, жеробейка (при литье). Также одним из способов упрочнения изделий является наклеп (рис. 3).

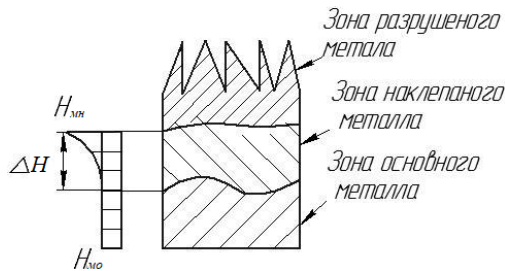


Рис. 3. Наклеп – вид в разрезе  
Fig. 3. Work hardening, cross section view

Наклеп – это упрочнение металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазного состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации [6–10]. Деформирование в процессе наклепа приводит к изменению как внутренней структуры, так и фазного состава металла. В результате таких изменений в кристаллической решетке возникают дефекты, которые выходят на поверхность деформируе-

мого изделия. Естественно эти процессы приводят и к изменению механических характеристик металла. В частности, с ними происходит следующее:

- повышение твердости и прочности;
- снижение пластичности и ударной вязкости, а также сопротивляемости к деформациям, имеющим противоположный знак;
- ухудшение устойчивости к коррозии.

Наклепанный слой на поверхности изделия может быть сформирован неумышленно, тогда такой процесс является вредным. Процесс считается полезным, если наклеп получили специально [6–8]. При наклепе незначительно меняются геометрические размеры изделия.

Для обработки полимеров данная технология не применима [11], поэтому нами впервые была предложена методика упрочнения изделий из фотополимера с использованием растра (растровое упрочнение) [1], что по нашей гипотезе идентично процессу наклепа.

Растривание или разложение изображения, представляет собой микровозвышение на материале не вызывающее изменений его номинального размера (рис. 4).

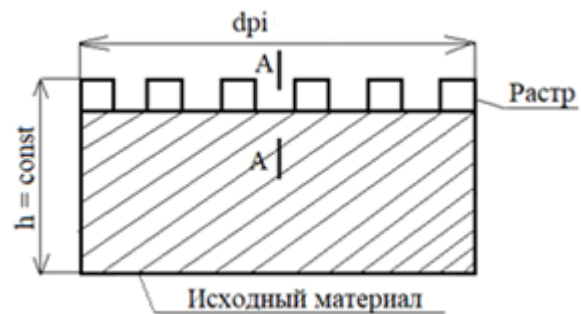


Рис. 4. Растр (растровое упрочнение)  
Fig. 4. Raster (raster hardening)

Растр измеряется в dpi (dpi – количество точек на 1 дюйм). Как было сказано ранее, было выдвинуто предположение, что с помощью растриро-

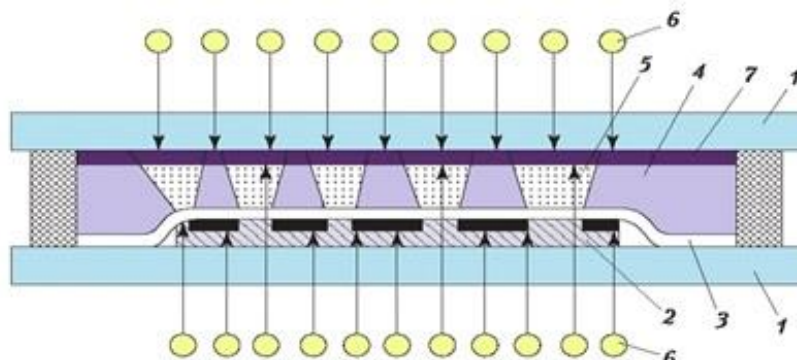
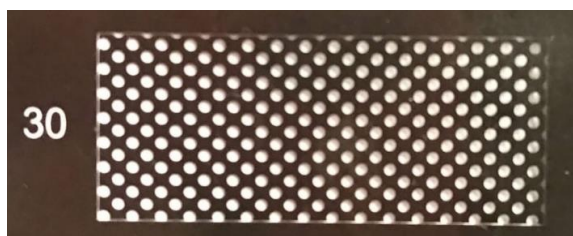


Рис. 5. Полимеризация фотополимера с растром (растровое упрочнение)  
Fig. 5. Photopolymer polymerisation with raster (raster hardening)

вания происходит упрочнение, увеличивается твердость изделия. Количество и форма точек растрового изображения планируется и рассчитывается заранее, создавая точки жесткости, при этом высота изделия сохраняется.

Изготовление изделий из фотополимера с растром (рис. 5) заключается в следующем. Растр (растровое изображение) 2 укладывается на стекло в сторону жидкой композиции, накрывают тонкой (6–12 мкм) защитной пленкой 3 во избежание контакта с жидкой композицией 4, нагретой до определенной температуры [12]. При экспонировании поток ультрафиолетовых излучений люминесцентных или газоразрядных ламп 6, проходящий через прозрачные участки негатива, полимеризует жидкую композицию на элементах 5, превращая ее в твердый полимер. На пробельных участках, где свет не действовал, композиция остается в первоначальном жидком состоянии. Для создания основы формы изделия композицию освещают такими же лампами с обратной стороны, что приводит к образованию прочной твердой основы 7. После экспонирования жидкую композицию удаляют с пробельных участков сжатым воздухом или вымывают [13–20].

Нами использовались растры с 30 и 100 dpi, что является максимальной разрешающей способностью используемого фотополимера (рис. 6 и 7).



**Рис. 6.** Растровое изображение с разрешающей способностью 30 dpi  
**Fig. 6.** Raster image with resolution of 30 dpi



**Рис. 7.** Растровое изображение с разрешающей способностью 100 dpi  
**Fig. 7.** Raster image with resolution of 100 dpi

Проведенные экспериментальные исследования показывали, что твердость готового изделия из фотополимера с растровой точкой круглого сечения разрешением 30 dpi уменьшается на 10–15 %, с растром 100 dpi увеличивается на 5–9 %. Экспериментальные данные, представлены в таблице.

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования подтверждают выдвинутую гипотезу об увеличении твердости изделий из фотополимера методом нанесения растровой точки. Причем твердость зависит от разрешения растра. Преимуществом данной методики является то, что твердость изделия можно планировать в зависимости от конструкционной необходимости, а нанесение упрочняющего слоя не оказывает влияния на геометрические размеры изделия.

Расширение возможности варьирования твердостью готового изделия из фотополимеров было определено, как сочетание изделий с растром и композитами, поэтому задачей следующих исследований и экспериментов является выбор и изучение композиционных материалов (композита) на основе полиакрилата.

Результаты экспериментов (твердость при 30 и 100 dpi, НЛ)  
Experimental results (hardness at 30 and 100 dpi, HL)

Эксперимент	Фотополимер	Фотополимер с растром (растровым упрочнением) 30 dpi	Фотополимер с растром (растровым упрочнением) 100 dpi
	HL	HL	HL
1	581	457	633
2	637	585	640
3	609	560	636
4	589	507	601
5	606	554	632

## Список литературы

1. Соколов Л.Б. Основы синтеза полимеров методом поликонденсации. М. : Химия, 1979. 264 с.
2. Фотополимер фирмы Roehm R-50 // Old4.ru : сайт. URL: [http // www.old4.ru / catalog / rashodnye\\_materialy / polimery / djiddkii\\_polimer\\_roehm](http://www.old4.ru/catalog/rashodnye_materialy/polimery/djiddkii_polimer_roehm) (дата обращения: 28.07.2021).
3. Фотополимер PHOTOPOLYMER R-50 // САМФО : сайт. URL: <http://samfo.ru/products/fotopolimer-r-50> (дата обращения: 28.07.2021).
4. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение : учеб. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
5. Мэттьюс Ф., Роллингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М. : Техносфера, 2004. 408 с.
6. Основы материаловедения (металлообработка) : учеб. для студентов сред. проф. образования / В.Н. Заплатин, Ю.И. Сапожников, А.В. Дубов и др. М. : Академия, 2017. 272 с.
7. Пат. 2571305. Рос. Федерация. Способ определения толщины наклёпанного слоя / В.И. Болобов, В.С. Бочков. № 2014142856/28 ; заявл. 23.10.2014 ; опубл. 20.12.2015. Бюл. № 35.
8. Пат. 2018124439 Рос. Федерация. Способ кавитационного наклепа и передвижное устройство для его осуществления / Д.Г. Сандерс, А.Г. Торсон, Х.Т. Дип. № 2018124439 ; заявл. 04.07.2018 ; 13.01.2020. Бюл. № 2.
9. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах // Автоматизация. Современные технологии. 2017. № 71. Ч. 4. С. 171–175.
10. Пат. 132209. Рос. Федерация. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов / А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов. № 2013115531/28 ; заявл. 05.04.2013 ; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.
11. Высококачественная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, А.Г. Ларченко и др. // Наука и образование. 2014. № 6. С. 55–65.
12. Laser alloying of wear surfaces with metal components / S.K. Kargapol'tsev, V.I. Shastin, V.E. Gozbenko, A.V. et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6499–6503.
13. Полимеризация. Большая российская энциклопедия // Большая российская энциклопедия : сайт. URL: <https://bigenc.ru/chemistry/text/3153477> (Дата обращения: 28.07.2021).
14. Основы технологического процесса [Электронный ресурс]. URL: <http://www.prepress-book.narod.ru/Oborudovanie-dlja-izgotovlenija-form-vysokoj-i-fleksografskoj-pechati/Osnovy-tehnologicheskogo-processa.htm> (дата обращения: 28.07.2021).
15. Ляпков А.А. Полимерные аддитивные технологии: учеб. пособие. Томск : изд-во Томск. политехн. ун-та, 2016. 114 с.
16. Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Технологии и материалы 3D-печати. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
17. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Технология полимеров : учеб. для вузов. М. : Высшая школа, 1980. 303 с.
18. Сутягин В.М., Бондалетова Л.И. Химия и физика полимеров : учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2003. 208 с.
19. Зуев В.В., Успенская М.В., Олехнович А.О. Физика и химия полимеров. учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. 45 с.
20. Пат. 2722902. Рос. Федерация. Способ формирования трехмерного изделия из жидкого фотополимера с применением преобразования волнового фронта актиничного излучения и устройство для его осуществления / О.Ю. Халип. № 2018139765 ; заявл. 01.09.2016. ; опубл. 04.06.2020. Бюл. № 16.

## References

1. Sokolov L.B. Osnovy sinteza polimerov metodom polikondensatsii [Fundamentals of polymer synthesis by polycondensation]. Moscow: Khimiya, 1979. 264 p.
2. Fotopolimer firmy Roehm R-50 [Photopolymer of firm Roehm R-50]. URL: [http // www.old4.ru / catalog / rashodnye\\_materialy / polimery / djiddkii\\_polimer\\_roehm](http://www.old4.ru/catalog/rashodnye_materialy/polimery/djiddkii_polimer_roehm) (Accessed 28.07.21).
3. Fotopolimer PHOTOPOLYMER R-50 [Photopolymer PHOTOPOLYMER R-50]. URL: <http://samfo.ru/products/fotopolimer-r-50> (Accessed 28.07.21).
4. Bataev A.A., Bataev V.A. Kompozitsionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye [Composite materials: structure, production, application]. Textbook. Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2002. 384 p.
5. Matthews F., Rollings R. Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya [Composite materials. Mechanics and Technology]. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 408 p.
6. Zaplatin V.N., Sapozhnikov Yu.I., Dubov A.V. (eds). Fundamentals of materials science (metalworking): textbook for students of environments. prof. Education; edited by Zaplatina V.N. 8th ed., Erased. Moscow: Akademiya, 2017. 272 p.
7. Pat. 2571305. Rus. Federation. Sposob opredeleniya tolshhiny naklyopannogo sloya [Method for determining the thickness of the hardened layer]. Bolobov V.I., Bochkov V.S., bull. No. 35.
8. Pat. 2018124439. Rus. Federation. Sposob kavitatsionnogo naklepa i peredvizhnoye ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya [The method of cavitation work hardening and a mobile device for its implementation]. D.G. Sanders, A.G. Thorson, H.T. Deep. Bull. No 2.
9. Filipenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V. Opredelenie fazovykh i relaksatsionnykh perekhodov v polimernykh materialakh [Determination of phase and relaxation transitions in polymeric materials]. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii [Automation. Modern technologies]*, 2017, No 71, P. 4, pp. 171–175.
10. Pat. 132209. Rus. Federation. Ustrojstvo diagnostiki detalej iz poliamidnykh materialov [Device for diagnostics of parts made of polyamide materials]. A.G. Larchenko, A.V. Livshits, N.G. Filipenko, S.I. Popov. Bull. No 25.

11. Livshits A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya ehlektrotermicheskaya obrabotka nemetallichesкого вторичного syr'ya [High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2014, No. 6, pp. 55–65.
12. Kargapol'tsev S.K., Shastin V.I., Gozbenko V.E., Livshits A.V., Filippenko N.G. Laser alloying of wear surfaces with metal components. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, Vol. 12, No. 17, pp. 6499–6503.
13. Polimerizatsiya. Bol'shaya rossijskaya ehntsiklopediya [Polymerization. The Great Russian Encyclopedia]. URL: <https://bigenc.ru/chemistry/text/3153477> (Accessed 28.07.21).
14. Osnovy tekhnologicheskogo protsessa [Fundamentals of the technological process]. URL: <http://www.prepress-book.narod.ru/Oborudovanie-dlja-izgotovlenija-form-vysokoj-i-fleksografskoj-pechati/Osnovy-tekhnologicheskogo-processa.htm> (Accessed 28.07.21).
15. Lyapkov A.A. Polimernye additivnye tekhnologii [Polymer additive technologies]. Textbook. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta, 2016. 114 p.
16. Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Tekhnologii i materialy 3D-pechati [Technologies and materials for 3D printing]. Textbook. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo gosudarstvennogo lesotekhnicheskogo universiteta, 2017. 1 electron. wholesale disc (CD-ROM).
17. Vorobiev V.A., Andrianov R.A. Tekhnologiya polimerov [Polymer technology]. Textbook for universities. Moscow: Vyshaya Shkola Publ., 1980. 303 p.
18. Sutyagin V.M., Bondaletova L.I. KHimiya i fizika polimerov [Chemistry and Physics of Polymers]. Textbook. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta, 2003. 208 p.
19. Zuev V.V., Uspenskaya M.V., Olekhovich A.O. Fizika i khimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Textbook. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki, 2010. 45 p.
20. Pat. 2722902. Rus. Federation. Sposob formirovaniya trekhmernogo izdeliya iz zhidkogo fotopolimera s primeneniem preobrazovaniya volnovogo fronta aktinichnogo izlucheniya i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya [A method of forming a three-dimensional product from a liquid photopolymer using the transformation of the wavefront of actinic radiation and a device for its implementation] / O.Yu. Khalip, bull. No. 16.

#### Информация об авторах

**Филиппенко Николай Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ifpi@mail.ru.

**Чумбадзе Тамара Темуриевна** – аспирант, кафедра автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tamriko98@yandex.ru.

**Беломестных Артем Александрович** – аспирант, кафедра автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: artiom.belomestnyh@yandex.ru.

**Пискажова Татьяна Валериевна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: TPiskazhova@sfu-kras.ru.

#### Information about the authors

**Nikolay G. Filippenko** – Ph.D. in Engineering Sciences, associate Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ifpi@mail.ru.

**Tamara T. Chumbadze** – Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tamriko98@yandex.ru.

**Artem A. Belomestnykh** – Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: artiom.belomestnyh@yandex.ru.

**Tatyana V. Piskazhova** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes in Metallurgy, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: TPiskazhova@sfu-kras.ru.