



## РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)  
УДК 678.6

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.014



### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ОБРАБОТКИ БАЗАЛЬТОНАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА

Екатерина Юрьевна Васинкина <sup>1</sup>, Светлана Геннадьевна Калганова <sup>2</sup>,  
Юлия Александровна Кадыкова <sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

<sup>1</sup> vasinkina1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

<sup>2</sup> s.kalganova2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

<sup>3</sup> 79053818212@yandex.ru, , <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

**Аннотация.** В работе исследовано воздействие СВЧ электромагнитного поля на физико-химические и механические характеристики эпоксидбазальтопластика. Доказано термическое действие СВЧ электромагнитного поля в диапазоне 100–700 Вт, что связано с химическим составом базальта, а именно с содержанием оксидов металлов. Исследование кинетики отверждения показало, что воздействие СВЧ ЭМП на эпоксидный олигомер снижает время гелеобразования и отверждения по сравнению с немодифицированным олигомером, что связано со снижением вязкости олигомера. Выбраны оптимальные параметры СВЧ обработки эпоксидного олигомера, обеспечивающие улучшение всего комплекса характеристик. Отмечено возрастание разрушающего напряжения при изгибе на 65 %, ударной вязкости на 14 %, твердости на 11 %.

**Ключевые слова:** эпоксидный олигомер, базальтовый наполнитель, СВЧ электромагнитное поле, мощность и продолжительность СВЧ обработки, физико-химические и механические свойства.

---

**Для цитирования:** Васинкина, Е. Ю., Калганова, С. Г., Кадыкова, Ю. А. Выбор параметров базальтонаполненного эпоксидного олигомера // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 102 - 107. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.014. EDN: <https://elibrary.ru/jxsxen>.

---

Original article

## SELECTION OF PARAMETERS OF MICROWAVE PROCESSING OF BASALT-FILLED EPOXY OLIGOMER

Ekaterina Yu. Vasinkina <sup>1</sup>, Svetlana G. Kalganova <sup>2</sup>, Yulia A. Kadykova <sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

<sup>1</sup> vasinkina1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

<sup>2</sup> s.kalganowa2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

<sup>3</sup> 79053818212@yandex.ru, , <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

**Abstract.** *The effect of the microwave electromagnetic field on the physicochemical and mechanical characteristics of epoxybasaltoplastics is investigated in this work. The thermal effect of the microwave electromagnetic field in the range of 100-700 W has been proved, which is due to the chemical composition of basalt, namely, the content of metal oxides. The study of the kinetics of curing showed that the effect of microwave EMF on the epoxy oligomer reduces the gelation and curing time compared to the unmodified oligomer, which is associated with a decrease in the viscosity of the oligomer. Optimal parameters of microwave processing of the epoxy oligomer have been selected, ensuring the improvement of the entire complex of characteristics. There was an increase in the destructive stress during bending by 65%, impact strength by 14%, hardness by 11%.*

**Keywords:** epoxy oligomer, basalt filler, microwave electromagnetic field, power and duration of microwave treatment, physico-chemical and mechanical properties.

**For citation:** Vasinkina, E. Yu., Kolganova, S. G. & Kadykova, Yu. A. (2022). The choice of parameters of a basalt-filled epoxy oligomer. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 102-107. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.014.

### ВВЕДЕНИЕ

В СГТУ имени Гагарина Ю.А. разработана специализированная конвейерная СВЧ установка для нетепловой модификации полимерных материалов [1, 2], отличающаяся возможностью регулирования уровня генерируемой мощности в диапазоне от 100 до 3000 кВт и продолжительности процесса обработки объекта от 6 до 100 с в методическом режиме работы установки. Установлено, что СВЧ электромагнитное поле оказывает нетепловое воздействие на термореактивные и термопластичные полимеры, при этом улучшая физико-механические свойства, что свидетельствует о модифицирующем воздействии СВЧ электромагнитных колебаний на структуру полимеров.

Так как эпоксидный полимер практически не применяется в «чистом» виде, для снижения хрупкости в его состав вводят пластифицирующие добавки, для уменьшения горючести – антипирены [3], для повышения всего комплекса физико-механических характеристик и снижения стоимости – различные волокнистые или дисперсные наполнители [4–6]. Поэтому в данной работе для электрофизической модификации СВЧ ЭМП использо-

ван ранее разработанный состав [7, 9], содержащий 70 масс.ч. ЭД-20, 30 масс.ч. пластификатора ТХЭФ и 50 масс.ч. базальтового наполнителя.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выбора параметров электрофизической модификации СВЧ электромагнитным полем (ЭМП) базальтонаполненного эпоксидного олигомера на начальном этапе осуществляли выбор СВЧ мощности в интервале от 100 до 500 Вт при продолжительности обработки 31 сек.

В СВЧ установке задается генерируемая мощность, часть которой переотражается от стенок волновода по пути в рабочую камеру. В рабочей камере оставшаяся часть энергии поглощается образцом, а часть энергии уходит в балластную нагрузку. В исследовательских целях перспективно определить поглощенную мощность (таблица 1), т.е. мощность, поглощенную образцом в процессе воздействия СВЧ ЭМП. В результате с увеличением СВЧ мощности возрастают поглощенная мощность от 13 до 19 % и температура базальтонаполненного эпоксидного олигомера.

Таблица 1 – Зависимость поглощённой мощности и температуры от генерируемой мощности

Table 1 - Dependence of absorbed power and temperature on the generated power

$P_{СВЧ}, \text{Вт}$	$P_{\text{полн}}, \text{Вт/см}^3 \pm 7$	$T, \text{°C} \pm 3$	Взаимодействие
–	–	21	Нетепловое воздействие
100	17	25	
200	28	123	Термическое воздействие
300	46	163	
400	54	186	
500	98	202	Деструкция
600	103	209	
700	130	217	

Примечание: время обработки – 31 с;  $P_{СВЧ}, \text{Вт}$  – генерируемая СВЧ мощность,  $P_{\text{полн}}, \text{Вт/см}^3$  – мощность, поглощённая образцом.

Определены (рисунок 1) три характерные области, соответствующие температуре наполненного эпоксидного олигомера, а именно область так называемого «нетеплового» воздействия, при нагреве эпоксидбазальтового олигомера на 3–4 °С при низком уровне поглощенной СВЧ мощности 17 Вт/см<sup>3</sup>. Вторая характерная область при уровне поглощенной мощности базальтонаполненного эпоксидного олигомера от 28 Вт/см<sup>3</sup> до 54 Вт/см<sup>3</sup> – это область термического воздействия, для данной области характерен резкий рост температуры, когда температура значительно повышается на 165 °С, и третья область, когда температура приближается к температуре разложения олигомера – область деструкции при уровне поглощенной мощности более 98 Вт/см<sup>3</sup> и повышения температуры свыше 200 °С.

Таким образом, при введении в пластифицированный эпоксидный олигомер базальтового наполнителя наблюдается термическое воздействие СВЧ ЭМП в диапазоне 100–700 Вт, что, по-видимому, связано с химическим составом базальта, а именно с содержанием оксидов металлов (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.) [10], что приводит к нагреву базальтонаполненного эпоксидного материала под действием СВЧ ЭМП.

Так как СВЧ воздействие способно изменять процессы структурообразования в наполненном эпоксидном олигомере и тем

самым влиять на структуру и свойства композиционного материала, изучено влияние СВЧ модификации на кинетику отверждения (таблица 2) [11].

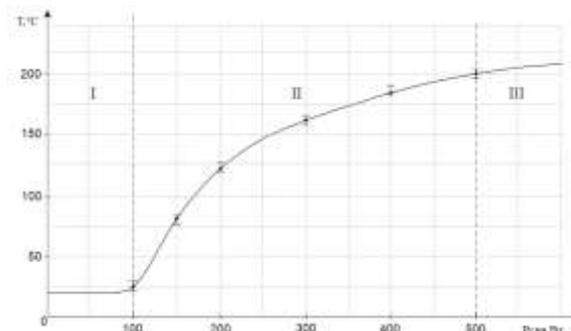


Рисунок 1 – Влияние поглощенной мощности на температуру наполненного эпоксидного композита

Figure 1 - The effect of absorbed power on the temperature of the filled epoxy composite

Таблица 2 – Кинетика отверждения эпоксидных композиций

Table 2 - Kinetics of curing of epoxy compositions

Кинетические параметры	Без модификации	Модификация базальтонаполненного эпоксидного олигомера в СВЧ ЭМП
Время гелеобразования, $T_{\text{гел.}}$ , МИН	70	42
Время отверждения, $T_{\text{отв.}}$ , МИН	82	61
Максимальная температура отверждения, $T_{\text{макс.}}$ , °С	85	87

Примечание: состав композиции, масс.ч.: 70ЭД-20+30ТХЭФ+50базальт+15ПЭПА; мощность СВЧ обработки – 400 Вт.

Исследование кинетики отверждения показало, что для модифицированного наполненного эпоксидного олигомера разветвленные макромолекулы при отверждении формируются в течение 42 мин с завершённостью реакции отверждения при 87 °С. Воздействие СВЧ ЭМП на эпоксидный олигомер снижает время гелеобразования и отверждения по сравнению с немодифицированным олигомером, что связано, в том числе и со снижением вязкости олигомера. Так, при СВЧ

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ОБРАБОТКИ БАЗАЛЬТОНАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА

мощности 400 Вт вязкость уменьшается более чем в три раза (таблица 4).

Таблица 4 – Вязкость эпоксидных композиций состава, масс.ч.: 70ЭД-20+30ТХЭФ+50базальт+15ПЭПА

Table 4 - Viscosity of epoxy compositions of the composition, wt.h.: 70 ET-20+30THEF+50bazalt+15PEP

Р <sub>свч</sub> , Вт	Динамическая вязкость, Па·с
–	1,4
100	1,2
200	0,9
300	0,6
400	0,4
500	0,4
600	0,4

Примечание: состав композиции, масс.ч.: 70ЭД-20+30ТХЭФ+50базальт+15ПЭПА; Р<sub>свч</sub>, Вт – мощность СВЧ обработки.

Степень отверждения для всех модифицированных ПКМ высокая и составляет более 97 %, что свидетельствует о полной сшивке эпоксидного композита.

При исследовании воздействия СВЧ мощности на физико-механические свойства эпоксидбазальтопластика отмечено возрастание разрушающего напряжения при изгибе с 80 до 132 МПа, ударной вязкости с 13 до 19 кДж/м<sup>2</sup>, твердости с 250 до 298 МПа (таблица 5).

Таким образом, наиболее перспективна обработка базальтонаполненного эпоксидного олигомера СВЧ электромагнитным полем при мощности 400 Вт, т.к. при этом достигаются наиболее высокие значения механических свойств при неизменности физико-химических характеристик.

СВЧ конвейерная установка для модифицирующего СВЧ воздействия на диэлектрические объекты имеет возможность регулирования не только мощности, но и уровня продолжительности процесса обработки объекта. Поэтому целесообразно было выбрать продолжительность обработки базальтонаполненного эпоксидного олигомера СВЧ электромагнитным полем.

Таблица 5 – Зависимость физико-механических свойств эпоксидной композиции состава, масс.ч.: 70ЭД-20+30ТХЭФ+50базальт+15ПЭПА от мощности СВЧ электромагнитного поля

Table 5 - Dependence of the physico-mechanical properties of the epoxy composition, wt.h.: 70ED-20+30THEF+50bazalt+15PEP on the power of the microwave electromagnetic field

Р <sub>свч</sub> , Вт	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа
–	13	80	250
100	18	100	262
200	22	119	275
300	24	126	284
400	27	132	295
500	24	124	279
600	18	120	263

На основании анализа физико-механических свойств наиболее высокие характеристики достигаются при продолжительности СВЧ обработки в течение 24 с (таблица 6).

Таблица 6 – Влияние напряженности электрического поля на физико-механические свойства эпоксидной композиции состава, масс.ч.: 70ЭД-20+30ТХЭФ+50базальт+15ПЭПА

Table 6 - Influence of the electric field strength on the physico-mechanical properties of the epoxy composition of the composition, wt.h.: 70ED-20+30THEF+50bazalt+15PEP

Продолжительность СВЧ воздействия, с	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа
31	27	143	298
27	29	152	306
24	33	168	314
21	30	163	310
19	28	154	309

## ВЫВОДЫ

Таким образом, доказана целесообразность воздействия СВЧ электромагнитного поля на базальтонаполненный эпоксидный олигомер:

- установлены оптимальные режимы СВЧ модификации базальтонаполненного эпоксидного олигомера: СВЧ мощность – 400 Вт; продолжительности обработки – 24 с.

- выявлено термическое действие СВЧ ЭМП в диапазоне 100–700 Вт, что связано с химическим составом базальта, а именно с содержанием оксидов металлов;

- исследование кинетики отверждения показало, что воздействие СВЧ ЭМП на эпоксидный олигомер снижает время гелеобразования и отверждения по сравнению с немодифицированным олигомером, что связано со снижением вязкости олигомера;

- доказана эффективность и целесообразность использования СВЧ электромагнитного поля для модификации базальтонаполненного эпоксидного олигомера, т.к. улучшаются физико-химические и механические характеристики композиционного материала на его основе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбинированная установка для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами : пат. 86373 U1 Рос. Федерация № 2009100389/22; опуб. 27.08.2009, Бюл. №6/64. 10 с.
2. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. 2009. 32 с.
3. Высокоэффективные пластификаторы-антипирены для эпоксидных полимеров / А.С. Мостовой [и др.] // Перспективные материалы. 2019. № 2. С. 36–43.
4. Мостовой А.С., Курбатова Е.А. Направленное регулирование свойств эпоксидных композитов, наполненных кирпичной пылью // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90. № 2. С. 246–256.
5. Мостовой А.С., Леденев А.Н. Модификация эпоксидных полимеров гексагональным нитридом бора // Вопросы материаловедения. 2017. № 1 (89). С. 147–154.
6. Исследование влияния тонкоизмельченного хромита на физико-химические и механические свойства модифицированных эпоксидных композитов / А.С. Мостовой [и др.] // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. № 11. С. 1549–1558.
7. Мостовой А.С., Нуртазина А.С., Кадыкова Ю.А. Эпоксидные композиты с повышенными эксплуатационными характеристиками, наполненные дисперсными минеральными наполнителями // Вестник Воронежского государственного универ-

ситета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 3 (77). С. 330–335.

8. Кадыкова Ю.А., Улегин С.В. Направленное регулирование свойств эпоксиднобазальтопластиков // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 7 (164). С. 130–131.

9. BASALT-FILLED EPOXY COMPOSITE MATERIALS / S.V. Ulegin [и др.] // International Polymer Science and Technology. 2014. Т. 41. № 5. С. 57–60.

10. Кадыкова Ю.А. Физико-химические закономерности создания полимерматричных композитов функционального назначения на основе базальтовых дисперсно-волоконистых наполнителей, углеродных и стеклянных волокон : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. С., 2013. 42 с.

11. Калганова С.Г., Архангельский Ю.С. Нетепловое воздействие СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические объекты // Электротехнологические СВЧ установки. 2000. С. 53–56.

## Информация об авторах

Е. Ю. Васинкина – ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.».

С. Г. Калганова – д.т.н., доцент кафедры, «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.», заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника».

Ю. А. Кадыкова – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.».

## REFERENCES

1. Arkhangelsk, Yu.S., Kalganova, S.G., Grishina, E.M. & Lavrentiev, V.A. (2009). Combined installation for microwave processing of materials with various dielectric properties *Pat. RU 86373 U1. Russian Federation, published on 27.08.2009.* Bull. No. 6/64. (In Russ.).
  2. Kalganova, S.G. (2009). Electrotechnology of non-thermal modification of polymer materials in a microwave electromagnetic field. Doctoral Dissertation Saratov. (In Russ.).
  3. Mostovoy, A.S., Nurtazina, A.S., Kadykova, Yu.A. & Bekeshev, A.Z. (2019). Highly effective plasticizers-flame retardants for epoxy polymers *Promising materials* (2) 36-43. (In Russ.).
  4. Mostovoy, A.S. & Kurbatova, E.A. (2017). Directional regulation of the properties of epoxy composites filled with brick dust. *Journal of Applied Chemistry* 90(2), 246-256. (In Russ.).
  5. Mostovoy, A.S. & Ledenev, A.N. (2017). Modification of epoxy polymers with hexagonal boron nitride *Questions of material science.* (1) 147-154 (In Russ.).
  6. Mostovoy, A.S., Nurtazina, A.S., Burmistrov, I.N. & Kadykova, Yu.A. (2018). Investigation of the effect of finely ground chromite on the physico-
- ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2022

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СВЧ ОБРАБОТКИ БАЗАЛЬТОНАПОЛНЕННОГО ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА

chemical and mechanical properties of modified epoxy composites. *Journal of Applied Chemistry*, 91 (11), 1549-1558. (In Russ.).

7. Mostovoy, A.S., Nurtazina, A.S. & Kadykova, Yu.A. (2018). Epoxy composites with increased operational characteristics filled with dispersed mineral fillers. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 3 (77), 330-335. (In Russ.).

8. Kadykova, Yu.A. & Ulegin, S.V. (2015). Directional regulation of the properties of epoxybasaltoplastics. *Izvestiya Volgograd State Technical University*, 7 (164), 130-131. (In Russ.).

9. Ulegin, S.V., Kadykova, Y.A., Artemenko, S.E. & Demidova, S.A. (2014). BASALT-FILLED EPOXY COMPOSITE MATERIALS *International Polymer Science and Technology*, 41(5), 57-60.

10. Kadykova, Yu.A. (2013). Physico-chemical laws of the creation of polymer matrix composites of functional purpose based on basalt dispersed-fibrous fillers, carbon and glass fibers. Extended abstract of Doctors thesis. Saratov. (In Russ.).

11. Kalganova, S.G. & Arkhangelsky, Yu.S. (2000). Nonthermal effect of the microwave electro-

magnetic field on dielectric objects *Electrotechnological microwave installations*, 53-56. (In Russ.).

### **Information about the authors**

*E. Yu. Vasinkina - assistant of the Department "Electric Power Engineering and Electrical Engineering". FGBOU VO "Gagarin State Technical University Yu.A."*

*S. G. Kalganova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, "Electric Power Engineering and Electrical Engineering". FGBOU VO "Gagarin State Technical University named after Yu.A.", Head of the Department "Electro-power Engineering and Electrical Engineering".*

*Yu. A. Kadykova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Electric Power Engineering and Electrical Engineering", FGBOU VO "Gagarin State Technical University Yu.A."*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 06.05.2022; принята к публикации 17.05.2022.*

*The article was received by the editorial board on 28 Mar 22; approved after reviewing on 6 May 22; accepted for publication on 17 May 22.*