

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ В СВЧ КАМЕРЕ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

Е.Ю. Васинкина, С.Г. Калганова, С.В. Тригорлый, А.С. Сивак, А.С. Яковлев, Ю.А. Кадыкова

Кафедра «Электроэнергетика и электротехника» Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Политехническая, 77, Саратов, Российская Федерация, 410054

E-mail: vasinkina1987@mail.ru, s.kalganowa2016@yandex.ru, trigorly55@mail.ru, pktrial@mail.ru, red.and2012@yandex.ru, 79053818212@yandex.ru

*Для модификации полимерных материалов широко используют различные электрофизические методы, в частности обработку полимеров в СВЧ электромагнитном поле. В данной работе с помощью математического моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics установлены максимальная температура нагрева дисперсно-наполненного эпоксидного полимера, а также разброс температур по объему композита. Для моделирования проводили исследования диэлектрических параметров с применением эпоксидной смолы марки ЭД20 с различными поглощающими СВЧ энергию дисперсными наполнителями с равномерным их распределением по всему объему связующего. Для измерения диэлектрических параметров использовался волноводный метод с полным заполнением сечения волновода. При моделировании СВЧ нагрева материалов эпоксидные дисперсно-наполненные полимеры нагревались в СВЧ камере с бегущей волной при мощности СВЧ генератора 2500 Вт на частоте 2450 МГц. Максимальное время нагрева образца с наполнителем принималось 76 с для обеспечения темпа нагрева наполнителя 5 °С/с.*

*В результате экспериментальных исследований определены электрофизические свойства поглощающих СВЧ энергию материалов для использования в качестве наполнителей эпоксидной смолы. Наибольшие изменения диэлектрических показателей наблюдаются при наполнении эпоксидной смолы графитом, который относится к полупроводниковым материалам.*

*В результате математического моделирования установлена перспективность использования поглощающих минеральных наполнителей для интенсификации СВЧ нагрева. Исследуемые наполнители позволяют повысить температуру нагрева эпоксидного связующего, тем самым оказывая модифицирующее действие на композиционный материал. Для получения заданного распределения температуры в эпоксидном композиционном материале в дальнейшем необходимо в СВЧ камере волноводного типа изменить мощность СВЧ генератора с варьированием времени нагрева дисперсно-наполненного эпоксидного связующего.*

**Ключевые слова:** СВЧ нагрев, эпоксидный полимерный материал, наполнители, графит, базальт, магнетит, хромит, диэлектрические свойства, математическое моделирование

## SIMULATION OF HEATING OF DISPERSED-FILLED EPOXY COMPOSITES IN A TRAVELING WAVE MICROWAVE CHAMBER

E.Y. Vasinkina, S.G. Kalganova, S.V. Trigorly, A.S. Sivak, A.S. Yakovlev, Yu.A. Kadykova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Politechnicheskaya str. 77, Saratov, Russia, 410054

E-mail: vasinkina1987@mail.ru, s.kalganowa2016@yandex.ru, trigorly55@mail.ru, pktrial@mail.ru, red.and2012@yandex.ru, 79053818212@yandex.ru

*Various electrophysical methods are widely used to modify polymer materials, in particular the processing of polymers in a microwave electromagnetic field. In this work, using mathematical modeling in the COMSOL Multiphysics software environment, the maximum heating temperature*

of a dispersed-filled epoxy polymer, as well as the temperature spread over the volume of the composite, are established. For modeling, dielectric parameters were studied using ED20 grade epoxy resin with various dispersed fillers absorbing microwave energy with their uniform distribution over the entire volume of the binder. To measure the dielectric parameters, a waveguide method with a full filling of the waveguide section was used. When modeling microwave heating of materials, epoxy dispersed-filled polymers were heated in a microwave chamber with a traveling wave at a microwave generator power of 2500 watts at a frequency of 2450 MHz. The maximum heating time of the sample with filler was taken 76 s to ensure the heating rate of the filler of 5 °S/s.

As a result of experimental studies, the electrophysical properties of materials absorbing microwave energy for use as epoxy resin fillers have been determined. The greatest changes in dielectric parameters are observed when filling epoxy resin with graphite, which belongs to semiconductor materials.

As a result of mathematical modeling, the prospects of using absorbing mineral fillers for the intensification of microwave heating have been established. The studied fillers allow to increase the heating temperature of the epoxy binder, thereby having a modifying effect on the composite material. In order to obtain a given temperature distribution in an epoxy composite material, it is further necessary to change the power of a microwave generator in a waveguide-type microwave chamber with varying the heating time of a dispersed-filled epoxy binder.

**Key words:** Microwave heating, epoxy polymer material, fillers, graphite, basalt, magnesite, chromite, dielectric properties, mathematical modeling

#### Для цитирования:

Васинкина Е.Ю., Калганова С.Г., Тригорлый С.В., Сивак А.С., Яковлев А.С., Кадыкова Ю.А. Моделирование нагрева дисперсно-наполненных эпоксидных композитов в СВЧ камере с бегущей волной. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 2. С. 16–21. DOI: 10.6060/rcj.2022662.3.

#### For citation:

Vasinkina E.Y., Kalganova S.G., Trigorry S.V., Sivak A.S., Yakovlev A.S., Kadykova Yu.A. Simulation of heating of dispersed-filled epoxy composites in a traveling wave Microwave chamber. *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. 66. N 2. P. 16–21. DOI: 10.6060/rcj.2022662.3.

## ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эксплуатационных свойств полимерных материалов в настоящее время широко применяют такой метод электрофизической модификации [1–5], как обработка полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле [6–13], в котором полимеры являются средой, поглощающей СВЧ электромагнитную энергию. Актуальной проблемой является разработка установки СВЧ нагрева, позволяющей обеспечить равномерное распределение температурного поля внутри полимерных материалов при высоком темпе возрастания температуры. Использование такой установки позволит проводить модификацию материалов при условиях СВЧ тепловых воздействий, нереализуемых при использовании традиционных теплообменных методов нагрева [14]. Однако для математического моделирования СВЧ нагрева полимерных материалов необходимы данные о диэлектрических параметрах дисперсно-наполненных полимеров, которые в литературе практически отсутствуют. Поэтому в данной работе изучены диэлек-

трическая проницаемость  $\epsilon'$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  для наполненных полимерных материалов на основе эпоксидного связующего (ЭД-20), а также проведено моделирование СВЧ нагрева полимерных материалов в программной среде COMSOL Multiphysics.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования диэлектрических параметров проводили с применением эпоксидной смолы марки ЭД20 с различными поглощающими СВЧ энергию дисперсными наполнителями, наполнитель вводился в эпоксидное связующее в количестве 5% по массе с равномерным распределением по всему объему связующего. Для измерения диэлектрических параметров использовался волноводный метод с полным заполнением сечения волновода [15, 16].

При моделировании СВЧ нагрева материалов эпоксидные дисперсно-наполненные полимеры размером  $\text{Ø}40 \times 40$  мм нагревались в СВЧ камере волноводного типа при мощности СВЧ генератора 2500 Вт на частоте 2450 МГц. Максималь-

ное время нагрева образца с наполнителем принималось 76 с для обеспечения темпа нагрева наполнителя 5 °С/с.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных измерений электрофизических свойств и литературных источников [17, 18] были получены исходные данные для математического моделирования и проведения испытаний в СВЧ нагревательной установке. В табл. 1 приведены физические свойства эпоксидной смолы ЭД20 без наполнителя, а в табл. 2 – данные об электрофизических свойствах эпоксидной

смолы ЭД20 с различными поглощающими СВЧ энергию наполнителями.

При наполнении эпоксидной смолы графитом значительно изменяются диэлектрические показатели:

- повышается тангенс угла диэлектрических потерь, свидетельствующий о том, что в данном композите больше рассеивается СВЧ мощность [19];

- изменяется диэлектрическая проницаемость, свидетельствующая об изменении проницаемости среды, т.е. о структурных изменениях полимерного материала [19].

Таблица 1

**Физические свойства эпоксидной смолы без наполнителя**

Диэлектрические параметры			Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	Удельная проводимость, сим/м	теплопроводность, λ, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость с, Дж/(кг·К)	Плотность ρ, кг/м <sup>3</sup>
tgδ	ε'	ε''	ρ <sub>3</sub>	σ			
0,039	13,279	0,517881	(1-320)·10 <sup>12</sup>	3,125·10 <sup>-15</sup>	0,17...2,92	460...2930	1200

Таблица 2

**Электрофизические параметры эпоксидной смолы ЭД20 с поглощающими наполнителями**

Полимерный композиционный материал	Тангенс угла диэлектрических потерь, tgδ	Действительная часть диэлектрической проницаемости ε'	Мнимая часть диэлектрической проницаемости ε''
ЭД20 с графитом	0,46	2,151	0,98946
ЭД20 с базальтом	0,016	27,11	0,43376
ЭД20 с магнезитом	0,014	27,263	0,38168
ЭД20 с хромитом	0,009	26,961	0,24265

Это, в свою очередь, влияет и на коэффициент диэлектрических потерь - величину, равную произведению относительной диэлектрической проницаемости на тангенс угла диэлектрических потерь.

По-видимому, это связано, со строением графита, который в отличие от других наполнителей относится к полупроводниковым материалам [20–21].

При наполнении минеральными наполнителями (базальтом, магнезитом и хромитом) эпоксидного полимера диэлектрическая проницаемость повышается практически в 2 раза, а tg δ снижается в ~ 3 раза.

Результаты моделирования приведены на рисунках 1, 2 и в табл. 3.

Максимальная температура нагрева 802 °С за 76 с наблюдается для ЭД20 с графитовым наполнителем, также очень большой разброс температур в объеме эпоксидного композита – 736 °С. Это связано с тем, что использование поглощающих

наполнителей в небольших объемах по массе образца (до 5 %) лишь в небольшой степени позволяют изменить распределение электрического и температурного полей [9]. К тому же такая высокая температура нагрева может приводить к локальным перегревам композита и, как следствие, к деформации эпоксидного материала.

Таким образом, в СВЧ камере с бегущей волной при использовании равномерно распределенного по объему графитового наполнителя можно обеспечить высокий темп нагрева образцов, но получить необходимую равномерность температуры по всему объему образцов не удастся.

При использовании качестве наполнителей базальта, магнезита и хромита максимальная температура СВЧ нагрева не высокая и в центре образца составляет соответственно 141, 126 и 93 °С, при этом равномерности температуры по всему объему композиционного также не происходит.

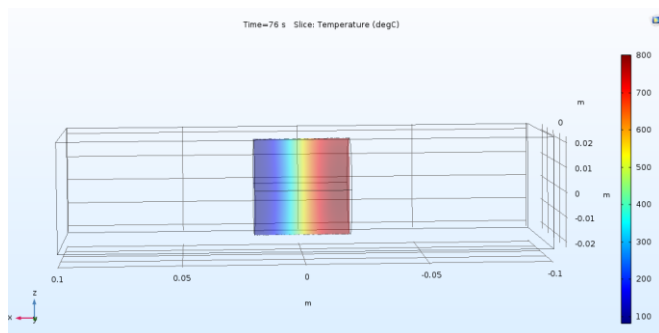


Рис. 1. Распределение температурного поля в сечении хz образца для момента времени 76 с (ЭД20 с графитовым наполнителем)

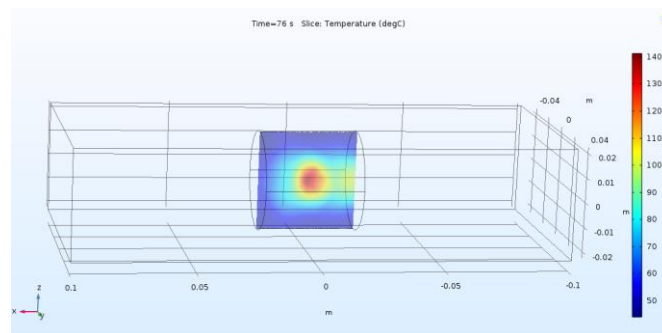


Рис. 2. Распределение температурного поля в сечении хz образца для момента времени 76 с (ЭД20 с базальтом)

Таблица 3

Результаты моделирования тепловых режимов образцов эпоксидной смолы ЭД20 с наполнителями в СВЧ камере с бегущей волной волноводного типа

Полимерный композиционный материал	Максимальная температура нагрева за время 76 с, $T_{\max}$ , °C	Максимальная разность температур в образце в момент времени 76 с, $\Delta T$ , °C
ЭД20 с графитом	802	736
ЭД20 с базальтом	141	102
ЭД20 с магнезитом	126	90
ЭД20 с хромитом	93	61

## ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований определены электрофизические свойства поглощающих СВЧ энергию материалов для использования в качестве наполнителей эпоксидной смолы. Наибольшие изменения диэлектрических показателей наблюдается при наполнении эпоксидной смолы графитом, который относится к полупроводниковым материалам.

Проведенные испытания дисперсно-наполненных эпоксидных материалов показали перспективность использования минеральных наполнителей для интенсификации СВЧ нагрева. Базальт,

магнезит и хромит позволяют повысить температуру нагрева эпоксидного связующего, тем самым оказывая модифицирующее действие на композиционный материал. Для получения заданного распределения температуры в эпоксидном композиционном материале в дальнейшем необходимо в СВЧ камере волноводного типа изменить мощность СВЧ генератора с варьированием времени нагрева дисперсно-наполненного эпоксидного связующего.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черемухина И.В. Классификация энергетических воздействий по влиянию на структуру и свойства армированных реактопластов. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 2 (88). С. 197–201.
2. Мостовой А.С., Кадькова Ю.А., Хазов К.Н., Титова А.Д., Соловьева Н.Д., Джумиева А.С. Электрохимическая модификация кремнистой породы, обеспечивающая повышение эксплуатационных характеристик наполненных эпоксидных композитов. Сб. тр. IV Международной научной конференции молодых ученых. К.: Изд-во. 2020. С. 139–143.
3. Черемухина И.В., Студенцов В.Н. Оценка физико-химической активности различных способов физической модификации. Фундаментальные исследования. 2016. № 2 (2). С. 299.

## REFERENCES

1. Cheremukhina I.V. Classification of energy impacts by their effect on the structure and properties of reinforced reactoplasts. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. V. 83. N 2 (88). P. 197–201. (in Russian).
2. Mostovoy A.S., Kadykova Yu.A., Khazov K.N., Titova A.D., Solovieva N.D., Dzhumieva A.S. Electrochemical modification of siliceous rock, providing an increase in the performance characteristics of filled epoxy composites. Sb.tr. IV International Scientific Conference of Young Scientists. K.: Publishing House. 2020. P. 139–143. (in Russian).
3. Cheremukhina I.V., Studentsov V.N. Evaluation of the physico-chemical activity of various methods of physical modification. Fundamental research. 2016. N 2 (2). P. 299. (in Russian).

4. Мостовой А.С., Кадыкова Ю.А., Неверная О.Г., Прохорова И.Е. Направленное регулирование структуры и физико-механических характеристик эпоксидных композитов с применением электрофизического метода модификации композиции. Вопросы электротехнологии. 2020. № 2 (27). С. 48–53.
5. Черемухина И.В., Студенцов В.Н., Ибаев М.О., Гильман А.А. Применение различных физических обработок в технологии наполненных реактопластов. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 4. № 1 (68). С. 113–117.
6. Кадыкова Ю.А., Мостовой А.С., Чапов И.Д. Исследование эффективности модификации охранаполненных эпоксидных полимеров в свч электромагнитном поле. Вопросы электротехнологии. 2020. № 4 (29). С. 86–90.
7. Толстов В.А., Мостовой А.С., Теслина Н.В., Кадыкова Ю.А. СВЧ-модификация наполненных эпоксидных композитов. Тез. докл X Международной научно-инновационной молодёжной конференции. Т.: Изд-во. 2018. С. 182–183.
8. Калганова С.Г., Сивяков Б.К., Сивяков Д.Б., Скрипкин А.А., Григорьян С.В. СВЧ технологические установки для нетепловой модификации свойств материалов в резонаторах со встречными бегущими волнами, образованных замкнутой самой на себя волноводной линией передачи. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 1 (49). С. 97–106.
9. Тригорлый С.В., Калганова С.Г., Кадыкова Ю.А., Кожевников В.Ю., Сивак А.С., Юдина В.О. Моделирование свч-нагрева диэлектриков с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями в камерах с бегущей волной. Вопросы электротехнологии. 2020. № 4 (29). С. 15–23.
10. Васинкина Е.Ю., Кадыкова Ю.А., Сивак А.С., Калганова С.Г. Исследование эффективности воздействия СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидных порошковых материалов. Сб.тр. IV Международной научной конференции молодых ученых. 2020. С. 143–148.
11. Васинкина Е.Ю., Кадыкова Ю.А., Сивак А.С., Калганова С.Г. Полимерные материалы на основе эпоксидной матрицы наполненной дисперсным базальтом. Сб.тр. VIII Всероссийской конференции, посвященной 60-летию ПАО «Химпром». 2020. С. 144–146.
12. Захаров В.В., Тригорлый С.В. Численные и экспериментальные исследования процессов СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны Вопросы электротехнологии. 2020. № 1 (26). С. 14–22.
13. Захаров В.В., Тригорлый С.В. Математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств Вопросы электротехнологии. 2020. № 3 (28). С. 5–12.
14. Тригорлый С.В., Калганова С.Г., Кадыкова Ю.А., Кожевников В.Ю., Сивак А.С., Юдина В.О. Моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков с поглощающими СВЧ-энергию наполнителями в камерах с бегущей волной Вопросы электротехнологии. 2020. № 4 (29). С. 15–23.
15. Сивак А.С., Калганова С.Г., Кадыкова Ю.А., Чермашеницева Т.П. Исследование диэлектрических свойств композиционных материалов Вопросы электротехнологии. 2021. № 4 (33). С. 23–28.
4. Mostovoy A.S., Kadykova Yu.A., Nevernaya O.G., Prokhorova I.E. Directional regulation of the structure and physico-mechanical characteristics of epoxy composites using the electrophysical method of composition modification. Questions of electrical technology. 2020. N 2 (27). P. 48–53. (in Russian).
5. Cheremukhina I.V., Studentsov V.N., Ibaev M.O., Gilman A.A. Application of various physical treatments in the technology of filled reactoplasts. Bulletin of the Saratov State Technical University. 2012. V. 4. N 1 (68). P. 113–117. (in Russian).
6. Kadykova Yu.A., Mostovoy A.S., Chapov I.D. Investigation of the effectiveness of modification of protected epoxy polymers in a microwave electromagnetic field. Questions of electrical technology. 2020. N 4 (29). P. 86–90. (in Russian).
7. Tolstov V.A., Mostovoy A.S., Teslina N.V., Kadykova Yu.A. Microwave modification of filled epoxy composites. Tez. dokl X International Scientific and Innovative Youth Conference. T.: Ed. 2018. P. 182–183. (in Russian).
8. Kalganova S.G., Sivyakov B.K., Sivyakov D.B., Skripkin A.A., Grigoryan S.V. Microwave technological installations for non-thermal modification of material properties in resonators with oncoming traveling waves formed by a self-closed waveguide transmission line. Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2021. V. 13. N 1 (49). P. 97–106. (in Russian).
9. Trigorly S.V., Kalganova S.G., Kadykova Yu.A., Kozhevnikov V.Yu., Sivak A.S., Yudina V.O. Modeling of microwave heating of dielectrics with microwave energy absorbing fillers in traveling wave chambers. Questions of electrical technology. 2020. N 4 (29). P. 15–23. (in Russian).
10. Vasinkina E.Yu., Kadykova Yu.A., Sivak A.S., Kalganova S.G. Investigation of the effectiveness of the effect of the microwave electromagnetic field on the curing process of epoxy powder materials. Sat.tr. IV International Scientific Conference of Young Scientists. 2020. P. 143–148. (in Russian).
11. Vasinkina E.Yu., Kadykova Yu.A., Sivak A.S., Kalganova S.G. Polymer materials based on an epoxy matrix filled with dispersed basalt. Sat.tr. VIII All-Russian Conference dedicated to the 60th anniversary of PJSC "Khimprom". 2020. P. 144–146. (in Russian).
12. Zakharov V.V., Trigorly S.V. Numerical and experimental studies of the processes of microwave heat treatment of dielectrics in traveling wave microwave chambers. Questions of electrotechnology. 2020. N 1 (26). P. 14–22. (in Russian).
13. Zakharov V.V., Trigorly S.V. Mathematical modeling of microwave heat treatment of dielectrics taking into account changes in their physical properties. Issues of electrotechnology. 2020. N 3 (28). P. 5–12. (in Russian).
14. Trigorly S.V., Kalganova S.G., Kadykova Yu.A., Kozhevnikov V.Yu., Sivak A.S., Yudina V.O. Modeling of microwave heating of dielectrics with absorbing microwave energy fillers in chambers with a traveling wave Questions of electrical technology. 2020. N 4 (29). P. 15–23. (in Russian).

16. Архангельский Ю.С., Калганова С.Г., Тригорлый С.В. Измерение диэлектрических параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ при высокой температуре. Вопросы электротехнологии. 2017. Вып. 2. С. 102–108.
17. Энциклопедия полимеров / Ред. коллегия: В. А. Кабанов (глав. ред.) и др. Т.3. П–Я. М., Сов. Энци. 1977. 1152 с.
18. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. 2020. 576 с.
19. Гороховатский Ю.А., Карулина Е.А., Темнов Д.Э. Физика полимерных диэлектриков. СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. 2013. 125 с.
20. Угольников А.В. Электротехническое и конструкционное материаловедение. Саратов: Ай Пи Ар Медиа. 2019. 188 с.
21. Беленков Е.А., Грешняков В.А. Классификация структурных разновидностей углерода. Физика твердого тела. 2013. Т. 55. Вып. 8. С. 1640–1650.
15. Sivak A.S., Kalganova S.G., Kadykova Yu.A., Chermashentseva T.P. Investigation of dielectric properties of composite materials. Questions of electrotechnology. 2021. N 4 (33). P. 23–28. (in Russian).
16. Arkhangelsky Yu.S., Kalganova S.G., Trigorry S.V. Measurement of dielectric parameters of dielectrics in the microwave range at high temperature. Questions of electrical technology. 2017. N 2. P. 102–108. (in Russian).
17. Encyclopedia of Polymers / Editorial Board: V. A. Kabanov (chap. ed.) and others. V. 3. P–Ya. M., Sov. Ents. 1977. 1152 p. (in Russian).
18. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Y. Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them. 2020. 576 p. (in Russian).
19. Gorokhovatsky Yu.A., Karulina E.A., Temnov D.E. Physics of polymer dielectrics. St. Petersburg: A.I. Herzen Russian State Pedagogical University. 2013. 125 p. (in Russian).
20. Ugolnikov A.V. Electrotechnical and structural materials science. Saratov: AI Pi Ar Media. 2019. 188 p. (in Russian).
21. Belenkov E.A., Greshnyakov V.A. Classification of structural carbon varieties. Solid state physics. 2013. T. 55. N 8. P. 1640–1650. (in Russian).

Поступила в редакцию 17.05.2022

Принята к опубликованию 09.06.2022

Received 17.05.2022

Accepted 09.06.2022