

water glass on the properties of microwave cured molding sands /K.Granat, D.Nowak, M.Piligieli, M.Stachowicz, R.Wikiera // Archives of foundry. –2008. –№ 1. –Рр. 123-126.

8.Stachowicz, M., Granat, K., Nowak, D. Studies on the possibility of more effective use of water glass thanks to application of selected methods of hardening / M.Stachowicz, K.Granat, D. Nowak // Archives of foundry engineering. –2010. –№ 2. –Рр. 135-140.

9. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідко скляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК В22С 9/10, 9/12. № а 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7с.

УДК 621.74

Л. І. Солоненко

Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), м. Дніпро

НАГРІВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ МІКРОХВИЛЬОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Питанням тепломасообміну та волопереносу при впливі мікрохвильового випромінювання на пористі матеріали та тіла, визначенню фундаментальних електромагнітних та електричних властивостей різних матеріалів присвячені праці багатьох вчених та дослідників, серед яких Л.Д. Ландау, О.М. Ліфшиц [1], А.В. Ликов [2], Г.А. Максимов, Г. Пюшнер [3], А.С. Метаксас, Р.Д. Мередіз [4], Х. Чао, І.В. Турнер [5], Л. Фелер [6], Н. Денеке [7] та інші. Тим не менш, відомі на сьогодні дані про величини ряду фундаментальних електричних параметрів матеріалів та виявлені закономірності їх зміни від температури, вологості, хімічного складу тощо носять суперечливий, а часом і сумнівний характер [8...14].

Теорія мікрохвильового нагріву базується на фундаментальних дослідженнях теорії тепломасоперенесення та електродинаміки, в основі якої лежить закон Джоуля-Ленца. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що потужність, що передається одиниці об'єму матеріалу при мікрохвильовому нагріві, розраховують за формулою [2, 15]:

$$N = E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

де E – напруга електричного змінного поля у даній речовині; f – частота хвилі; ε – діелектрична постійна; $\operatorname{tg}\delta$ – кут діелектричних втрат з якої впливає, що збільшення частоти прямо пропорційне потужності, що передається одиниці об'єму матеріалу. Тобто зі збільшенням частоти швидкість нагрівання матеріалу має збільшуватися.

Тим не менш, зі збільшенням частоти мікрохвильового випромінювання зменшується глибина його проникнення (S) у матеріал, яку розраховують за формулою [2, 15]:

$$S = \frac{1}{f\sqrt{\varepsilon\operatorname{tg}\delta}}. \quad (2)$$

Особливістю мікрохвильового нагріву є та обставина, що матеріали, що нагріваються, володіючи різною радіопрозорістю (коефіцієнтом діелектричних втрат) не тільки нагріваються з різною інтенсивністю, але і пропускають або відбивають від себе частину мікрохвильового випромінювання. В цьому випадку, величину відбитої потужності мікрохвильового випромінювання розраховують як різницю між прикладеною до матеріалу (P) і поглиненою ним ($P_{\text{по}}$) потужністю за формулою [16]:

$$P_B = P - P_{\text{по}}. \quad (3)$$

У цьому випадку, з урахуванням формули (3), коефіцієнт корисної дії мікрохвильової печі (η) розраховують за формулою:

$$\eta = \frac{P_{\text{по}}}{P}. \quad (4)$$

Виходячи з цього, автори роботи [16] для випробуваного матеріалу розраховують межу фактора, що відбиває матеріал:

$$R_o = \sqrt{\frac{P_B}{P}} = \sqrt{1-\eta}. \quad (5)$$

Виходячи з цього, в якості характеристики мікрохвильового випромінювання автори [16] використовують коефіцієнт стоячої хвилі (англ. Voltage Standing Wave

Ratio) [16], який розраховують за формулою:

$$k_{VSWR} = \frac{1 + R_O}{1 - R_O}. \quad (6)$$

Для будь-якої установки мікрохвильового нагріву величина k_{VSWR} завжди більша за 1. При цьому, чим ближче величина k_{VSWR} до 1, тим ефективніший і інтенсивніший процес нагрівання матеріалу (виробу).

Основною характеристикою діелектрика в умовах впливу на нього мікрохвильового випромінювання є величина діелектричної проникності ε . З метою визначення потужності теплових втрат, що виникають при поглинанні матеріалом мікрохвильового випромінювання, відносну діелектричну проникність розраховують за формулою [17]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - tg\delta_E), \quad (7)$$

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon'_a}{\varepsilon_0}, \quad \varepsilon'' = \frac{\varepsilon''_a}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0},$$

де ε'_a та ε''_a – дійсна та уявна частини абсолютної діелектричної проникності відповідно; σ – питома провідність середовища; $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ – електрична постійна; ω – кругова частота електромагнітного випромінювання; $tg\delta_E$ – тангенс кута діелектричних втрат.

$$tg\delta_E = tg\delta_{E1} + tg\delta_{E2} = \frac{\varepsilon''_a}{\varepsilon'_a} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'_a}, \quad (8)$$

або, прийнявши $\varepsilon''_b = \frac{\sigma}{\omega}$:

$$tg\delta_{E2} = \frac{\varepsilon''_b}{\varepsilon'_a}.$$

Справжню та уявну складові абсолютної діелектричної проникності також розраховують теоретично за формулами Дебая:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{(1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad (9)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{(1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad (10)$$

де ε_s – діелектрична проникність при $\omega \rightarrow 0$; ε_{∞} – діелектрична проникність при $\omega \rightarrow \infty$;
 τ – час релаксації.

Для твердих тіл, припустивши, що диполь має два стійкі положення, розділені бар'єром енергії W , час релаксації розраховують за формулою:

$$\tau = A \exp\left(\frac{-W}{kT}\right), \quad (11)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температури; k – стала Больцмана; T – температура.

З аналізу формул (7)...(11) випливає, що дійсна та уявна складові ε залежні від температури та від частоти мікрохвильового випромінювання і ця залежність має складний характер, що підтверджується експериментальними даними [18], та потребує подальших досліджень для більшості матеріалів, які за технологічними умовами обробляють мікрохвильовим випромінюванням.

Список літератури

1. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. – 532 с.
2. Лыков, А. В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Пюшнер, Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. С англ. / Г. Пюшнер. – М.: Энергия, 1968. – 312 с.
4. Metaxas, A. C. Industrial Microwave Heating / A.C. Metaxas, R.J. Meredith. – Power Engineering Series. London: Peter Peregrinus Ltd. On behalf of the JEE, 1983. – 357 p.
5. Zhao, H. An Analysis of the Finite-Difference Time-Domain Method for Modelling the Microwave Heating of Dielectric Materials with in a Three-Dimensional Cavity

- System / H. Zhao, I.W. Turner // Journal Microwave Power and Electromagnet. Energy. – 1996. – № 31. – P. 199-214.
6. Feher, L. Energy Efficient Microwave Systems / L. Feher // Springer Verlag. – 2009. – P. 1-9.
7. Daneke, N. Zur Anlagentechnik von multimoden Mikrowellen Sinteranlagen – von der Wellenausbreitung in Hohlleiter bis zum erwärmten Gut. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2001.
8. McGill, S. L. Microwave Power Electromagnet. Energy / S.L. McGilland, J.W. Walkiewich. – Symp. Summ, 1987. – P.175.
9. Schoenfeld, C. Microwave Synthesis Comes to the Academic Laboratory / C. Schoenfeld, L. Favretto, M. Loechner // American Laboratory. – November 2003.
10. Nimitz, G. Mikrowellen: Einführung in Theorie und Anwendungen. München; Bad Kissingen (u.a.): Richard Pflaum Verlag GmbH & Co KG, 2001.
11. Pohl, V. Messung von temperaturabhängigen Permittivitäten im Mikrowellenbereich. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 585. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996.
12. Хиппель, А. Р. Диэлектрики и волны. Пер. с англ./ А. Р. Хиппель. – М.: Изд. ин. лит., 1960. – 438 с.
13. Хиппель, А. Р. Диэлектрики и их применение, пер. с англ. / А.Р. Хиппель. – М.:Л., 1959. – 336 с;
14. Браун, В. Диэлектрики, пер. с англ. / В. Браун. – М.: Издатинлит, 1961. – 324 с.
15. Воронин, М. Я. Физика нагрева СВЧ-диэлектриков летательных аппаратов и их защита: монография / М.Я. Воронин, И.Н. Карманов, А.В. Кошелев и др.; Под общ. ред. М.Я. Воронина. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 156 с.
16. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/microwave_heating/Microwave_heating.pdf
17. Berteaud, A. J. Microwave Power / A.J. Berteaudand J.C. J. Badot. – 1976. – P.315.
18. Бикбулатов, И. Х. Применение электромагнитного излучения СВЧ диапазона в химической технологи / И.Х. Бикбулатов, Р.Р. Даминев, Н.С Шулаев // Бул-леровские сообщения. – 2009. – Т.18, №8. – С.1-28.