

5. Балденко Д. Ф., Балденко Ф. Д., Гноевых А. Н. Винтовые забойные двигатели. – М. : Недра, 1999.

6. Коротаев Ю. А. Технологическое обеспечение долговечности многозаходных винтовых героторных механизмов гидравлических забойных двигателей. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. – 260 с.

Yu. A. Korotaev, Doctor of Technical Sciences, LLC “VNIIBT “Drilling Tools”
V. A. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm State Technical University
D. A. Goldobin, LLC “VNIIBT “Drilling Tools”

Technology of Production of Downhole Screw Motor Power Sections Containing Light Rotors and Reinforced Stators

The design of light rotor and stator reinforced with thin-walled steel screw casing, their manufacturing techniques, high pressure chamber and die to punch thin-walled steel casings with screw teeth using high pressure liquid are described. An effect of inaccuracies of tube blank and die core manufacturing and residual deformation on accuracy of the punched casing geometrical parameters is determined. New methods of thin-walled tube gaging and die core teeth profile calculation are developed.

Key words: downhole screw motor, stator, rotor, die, mold, screw casing, power characteristic.

УДК 622.3.621.453/457+536.79+355.014.1

Л. Л. Хименко, кандидат технических наук, доцент, Научно-исследовательский институт полимерных материалов, Пермь
А. В. Кочергин, Научно-исследовательский институт полимерных материалов, Пермь
А. Н. Козлов, кандидат технических наук, доцент, Пермская государственная сельскохозяйственная академия
Н. А. Рыбаков, кандидат технических наук, Пермский государственный технический университет
А. П. Рыбаков, доктор физико-математических наук, профессор, Пермский государственный технический университет

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПОЛИМЕРНОГО СОСТАВА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Приводятся результаты измерения теплоемкости СВЧ-облученного конденсированного полимерного состава. Обсуждаются некоторые аспекты СВЧ-воздействия на полимерные составы.

Ключевые слова: энергетический полимерный состав, СВЧ-излучение, реакция состава на СВЧ-излучение, теплоемкость.

Данная работа является продолжением теоретико-экспериментальных частично опубликованных [1–5] исследований по изучению различных аспектов воздействия СВЧ-излучения на конденсированные высокоэнергетические полимерные составы. В экспериментах исследован высокоэнергетический полимерный состав на основе полидивинилового эпоксиуретанового каучука с плотностью $1,8 \cdot 10^3$ кг/м³ и модулем Юнга 2 МПа. Использованы образцы данного состава массами 0,12–0,15 г. Облучение образцов произведено с помощью СВЧ-генератора с параметрами: частота излучения 2,45 ГГц, мощность излучения 600 Вт. Генератор размещался на открытой площадке, размеры которой исключали влияние отраженного от окружающих предметов СВЧ-излучения на образцы. Использован контейнер в виде пенопластовой коробки с размерами 150×90×60 мм с плотно закрывающейся крышкой. Внутри контейнер разделен на секции, в которые помещались образцы таким образом, чтобы не затенять друг друга от СВЧ-излучения. Пенопластовый контейнер является прозрачным для СВЧ-излучения и исключает влияние посторонних внешних факторов. Расстояние между образцами и рупором генератора равно 40 мм. Три партии по

три образца в каждой подвергались облучению длительностью 0; 35 и 60 мин., что и отражено в табл. 1. Расчет плотности поглощенной энергии и скорости ввода энергии произведен так же, как и в работе [3].

Через сутки после облучения произведено измерение теплоемкости этих образцов с помощью дифференциального сканирующего калориметра ДСК-111. Образцы помещены в открытые керамические тигли и испытаны в динамическом режиме со скоростью нагрева $\nu = 5$ К/мин в температурном диапазоне 30–130 °С. Тигель с исследуемым веществом помещен в измерительную часть канала калориметра, во второй канал помещен тигель с эталонным веществом Al₂O₃. В процессе измерения основная часть теплового потока проходит в исследуемый образец через блок последовательно соединенных термопар, окружающих каналы. При этом суммарная термоЭДС, образующаяся на выходе термопар, пропорциональна разности тепловых потоков к образцу и эталону. Удельная теплоемкость описывается соотношением

$$C_p = \frac{\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_p}{m},$$

где C_p – удельная изобарная теплоемкость; m – масса образца; Q – тепло, поглощенное образцом; t – температура.

Преобразованное применительно к условиям ДСК-111 это соотношение принимает вид

$$C_p = \frac{60K_{ус}K_{пот}}{\nu mt} \frac{h}{H}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (1)$$

где $K_{ус}$ – коэффициент усиления калориметрического сигнала; $K_{пот}$ – чувствительность потенциометра; ν – скорость нагрева образца; μ – постоянная калориметра, изменяющаяся с температурой; H – ширина диаграммной бумаги; h – характеризует разность теплопоглощения тигля с образцом и ранее испытанного пустого тигля, берется из эксперимента.

Таблица 1. Данные по облучению образцов и изменению теплоемкости

Данные по образцам и их облучению				Теплоемкость, кДж/(кг · К)				Результаты аппроксимации			
№ партии	Время облучения, мин.	Плотность поглощенной энергии, Дж/м ³	Номер образца	Температура испытания, °С				a , кДж/кг·К	b , К ⁻¹	σ , кДж/кг·К	ε , %
				50	75	100	125				
I	0	0	1	1,182	1,227	1,256	1,284	1,1392	0,0011	0,0130	1,0
			2	1,199	1,245	1,274	1,303				
			3	1,209 (1,202)	1,256 (1,235)	1,289 (1,269)	1,309 (1,304)				
II	35	$5 \cdot 10^8$	4	1,207	1,265	1,287	1,317	1,1473	0,0012	0,0104	0,8
			5	1,212	1,267	1,285	1,330				
			6	1,215 (1,218)	1,268 (1,255)	1,305 (1,294)	1,344 (1,333)				
III	60	$8,5 \cdot 10^8$	7	1,210	1,271	1,313	1,331	1,1412	0,0013	0,0128	1,0
			8	1,206	1,274	1,312	1,342				
			9	1,213 (1,221)	1,279 (1,263)	1,320 (1,306)	1,347 (1,351)				

При расчете теплоемкости по соотношению (1) использованы следующие значения:

$$\mu_{50^\circ\text{C}} = 7,232 \text{ мкВ/мВт};$$

$$\mu_{100^\circ\text{C}} = 7,762 \text{ мкВ/мВт};$$

$$\mu_{75^\circ\text{C}} = 7,518 \text{ мкВ/мВт};$$

$$\mu_{125^\circ\text{C}} = 7,967 \text{ мкВ/мВт};$$

$$K_{ус} = 1 \text{ мВ};$$

$$K_{пот} = 0,25;$$

$$H = 250 \text{ мм};$$

$$\nu = 5 \text{ К/мин.}$$

Экспериментальные значения теплоемкости, полученные с помощью соотношения (1), приведены в табл. 1 жирным шрифтом. Затем экспериментальные значения по методу наименьших квадратов аппроксимированы экспоненциальной зависимостью

$$C_p = ae^{bt}, \quad (2)$$

где a и b – параметры; t – температура.

Получены три зависимости для трех значений времени облучения: 0; 35 и 60 мин. Для каждой кривой определены величины среднеквадратической ошибки σ вдоль кривой, а также значения коэффициента вариации ε . Значения a , b , σ и ε указаны в табл. 1. В табл. 1 приведены также значения теплоемкости, рассчитанные по соотношению (2). Эти величины набраны нежирным шрифтом в скобках.

Анализ результатов показывает незначительный, но различимый рост теплоемкости с увеличением времени облучения. Так, например, при температуре 125 °С превышение аппроксимационного значения теплоемкости при времени облучения 60 мин. над теплоемкостью необлученных образцов составляет 3,6 %, тогда как сумма коэффициентов вариации равна 1,8 %. При времени облучения 35 мин. эти величины равны 2,2 и 1,8 % соответственно.

Анализ имеющихся данных по воздействию СВЧ-излучения на полимерные материалы позволяет сделать следующие выводы.

1. В отличие от других видов воздействий в данном случае происходит объемное воздействие, то есть практически одновременно во всем объеме детали. Поясним. Даже для крупногабаритной детали, например длиной 3 м, при СВЧ-генераторе, установленном около одного из торцев, одновременность прихода фронта электромагнитной волны к поверхности торцев составляет $\Delta t \approx 3 \text{ м}/(3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) \approx 10 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, то есть не превышает 10 нс. Рассматриваемые материалы являются полупрозрачными для электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне. Скорость распространения электромагнитной волны

в таком материале равна $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$. При относительной магнитной проницаемости $\mu = 1$ и относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 8$ [1]

скорость $v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{8}} \approx 1,06 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, то есть почти

в три раза меньше скорости волны в вакууме. При радиусе детали 30 см время проникания поля на

такую глубину составляет примерно 3 нс. То есть через несколько наносекунд после включения СВЧ-генератора материал детали во всем ее объеме будет охвачен воздействием СВЧ-поля. При уменьшении размеров деталей, соответственно, уменьшается все время, и эффект объемного одновременного воздействия проявляется в большей степени.

2. Для описания процесса поглощения полимерным материалом энергии СВЧ-излучения, по-видимому, целесообразно использовать два параметра. Во-первых, это интегральная энергетическая характеристика, то есть суммарная энергия, поглощенная единицей объема за все время облучения W , Дж/м³. По своей сущности этот параметр есть объемная плотность поглощенной энергии. Во-вторых, это дифференциальная энергетическая характеристика, то есть скорость поглощения энергии, скорость ввода энергии в единицу объема $\frac{dW}{dt}$, Дж/(м³·с).

О совокупном влиянии этих двух параметров и в особенности о влиянии скорости ввода энергии проследим на конкретном примере. В работе [2] описано применение СВЧ-генератора (далее Г1), с параметрами: частота генерации 2,7 ГГц; мощность в импульсе 0,7–54 МВт. Описанный в данной статье генератор обозначим Г2. Сравнительные данные и результаты см. в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные данные двух СВЧ-генераторов

	Г1	Г2
Время облучения, с	0,29	2100
W , Дж/м ³	$4,9 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
$\frac{dW}{dt}$, Дж/(м ³ ·с)	$1,67 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^5$
Эффект воздействия	Образцы состава на основе ПХА, октогена и поливинил-эпоксидуретанового каучука загорелись	Образцы состава, исследуемого в данной работе, не загорелись

Возможное влияние других (кроме скорости поглощения энергии) причин, приводящих к различным указанным в табл. 2 исходам, обсудим далее.

3. При облучении СВЧ-импульсами большой длительности и при больших скоростях облучения происходит закачка большой плотности энергии. В предельном случае этой энергии достаточно для испарения и разлета вещества. Для типичных высокоэнергетических составов значение энергии разрыва связей составляет несколько электрон-вольт на связь [6] или не менее (10^9 – 10^{10}) Дж/м³. Этому соответствуют напряженности поля внутри детали $> 10^7$ В/м [4, 5]. При таких и больших напряженностях в материале детали реализуется состояние перехода его из твердого состояния в газообразное и разлет этого сублимированного материала.

Однако это достаточно экзотический случай. Реализация его возможна либо при действии излучения

высотного ядерного взрыва, либо при работе весьма громоздкого и дорогостоящего СВЧ-генератора.

4. Рассмотрим случай кратковременного импульсного воздействия микросекундного диапазона, когда время облучения составляет $t = 10^{-6}$ сек. при большой скорости введения энергии в материал $\frac{dW}{dt} \approx 10^9$ Дж/(м³·с). Вследствие кратковременности процесса влияние теплоотода практически не сказывается. В деталях разных размеров реализуются разные эффекты. В крупногабаритных деталях происходит заметное неравномерное поглощение энергии поля [4, 5], то есть в разных местах по объему детали вдоль направления распространения поля объемная плотность поглощенной энергии различна. Она уменьшается в направлении вглубь детали. Поэтому вводят параметр, характеризующий это уменьшение, а именно l_0 – длину свободного пробега излучения. На этой длине интенсивность фронта электромагнитной волны уменьшается в e раз. Типичное значение для рассматриваемых материалов $l_0 \approx (0,2-0,3)$ м. По своему происхождению и по своей природе поглощенная энергия является тепловой [3]. В физике конденсированных тел для состояния при высоких давлениях и температурах используют различные уравнения состояния [7]. Однако во всех уравнениях используют параметр Грюнайзена γ , представляющий собой отношение теплового давления к плотности тепловой энергии. Для рассматривания полимерных материалов параметр Грюнайзера равен (1,1–1,2). Тогда $p = \gamma W$. Следовательно, с точностью до значения параметра Грюнайзера (≈ 10 – 20 %) тепловое давление численно будет равно объемной плотности поглощенной энергии. При напряженностях электрической составляющей электромагнитного поля в полимерном материале $10^3 < E < 10^7$ В/м значение объемной плотности поглощенной энергии во фронте электромагнитной волны, составляет $10^{-1} < W < 10^7$ Дж/м³. Следовательно, амплитудное значение теплового давления может принимать значения от единиц Паскаля до нескольких мегаПаскалей в зависимости от величины поглощенной энергии. В соответствии с возросшими значениями P и W возрастает и температура материала. Таким образом, в результате воздействия СВЧ-импульса на крупногабаритную деталь ($l \approx m$) распределение давления имеет следующий характер. Снаружи детали давление равно атмосферному, внутри детали непосредственно у свободной поверхности детали давление резко возрастает на несколько порядков и затем постепенно снижается. Это является причиной возникновения волновых течений, то есть волны сжатия и расширения циркулируют по детали [4, 5]. Это кратковременные, быстротекающие процессы. Скорости волн равны нескольким километрам в секунду. Результатом действия этих волновых процессов являются различные виды разрушения детали, а при слабых волнах – колебательные процессы детали как целого.

В малогабаритных деталях с размерами до нескольких сантиметров неравномерность прогрева, и волновые процессы не реализуются. Здесь проявляется следующий эффект. При напряженностях поля $10^6 < E < 10^7$ В/м объемная плотность поглощенной энергии практически по всему объему детали одинакова и достигает значений $\geq 5,5 \cdot 10^8$ Дж/м³. В соответствии с двухпараметрическим критерием возбуждения детонации [8] сам процесс детонации не реализуется в следствие малости размеров детали, но происходит горение материала, что и наблюдается на практике [2].

5. При большем времени облучения ($t \geq 10^2 - 10^3$ с) и малых скоростях ввода энергии

$\left(\frac{dW}{dt} \leq 10^5 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) \right)$ реализуется равномерное по-

глощение энергии воздействующего поля, особенно в малогабаритных деталях. Причиной этого является возможность осуществления теплоотвода за счет различных эффектов. Закачка энергии в материал детали и теплоотвод в этом случае являются конкурирующими процессами, компенсирующими друг друга. Конечно, есть различия в протекании этих процессов. Закачка и поглощение энергии по-прежнему происходят во всем объеме, а теплоотвод осуществляется с поверхности детали в глубь ее. Скорость теплоотвода меньше скорости звука, но сравнима с ней.

6. Существенным параметром является также отрезок времени между актом воздействия СВЧ-излучения и актом диагностики. В работе [2], как и в настоящей работе, этот отрезок времени составлял сутки. За это время возможные структурные изменения в материале, происходящие во время излучения, вполне могли быть «залечены». Фактическая экспериментальная и теоретическая информация по этому вопросу полностью отсутствует в настоящее время.

7. Описанные выше результаты измерения теплоемкости, а также приведенные в работе [2] результаты прочности испытаний вполне укладываются в рамки пояснений, приведенных в пп. 5 и 6.

8. Весьма интересный аспект применения СВЧ-излучения кратко резюмирован в работе [9], где отмечено в частности: а) ускорение в десятки и в сотни раз практически всех химических реакций под действием СВЧ-излучения; б) увеличение до полутора раз выхода реакции, если исходное сырье подвергну-

то предварительно СВЧ-излучению. Авторы работы [9] отмечают, что до сих пор непонятно, как СВЧ-излучение влияет на механизм реакции.

В большинстве случаев эффект от СВЧ-излучения так велик, что объяснить его только тепловой составляющей невозможно (частота СВЧ-излучения меньше частоты инфракрасного излучения), а не термические составляющие эффекта СВЧ-воздействия в настоящее время не изучены. Представляется весьма перспективным направлением технологического применения СВЧ-излучения, например, СВЧ-облучение компонентов полимерных высокоэнергетических составов, как предварительное, так и в процессе реакции.

Библиографические ссылки

1. Рыбаков А. П., Козлов А. Н., Хусаинов С. А. Модель для оценки воздействия СВЧ-излучения на твердое топливо // Полимерные материалы и двойные технологии технической химии : тез. докл. III Ур. конф. (Пермь, 18 декабря 1999 г.). – Пермь : НПО им. Кирова, 1992. – С. 28.
2. Экспериментальное исследование воздействий СВЧ-излучения на образцы топлива твердотопливных ракетных двигателей / А. Н. Козлов [и др.] // Изв. Челябинского научного центра. – 2007. – Вып. 4(38). – С. 14–18. – URL: <http://www.csc.a.c.ru/ej/issue/ru/37>
3. Модель реакции твердых ракетных топлив на воздействие сверхвысокочастотного излучения / А. П. Рыбаков [и др.] // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 2(38). – С. 96–98.
4. Козлов А. Н., Рыбаков Н. А. Волновые течения в зарядах энергетических материалов при мгновенном поглощении энергии СВЧ-излучения // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 1(45). – С. 146–150.
5. Козлов А. Н., Рыбаков Н. А. Напряжения в зарядах высокоэнергетических материалов при конечном времени поглощения энергии СВЧ-излучения // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 2(46). – С. 144–146.
6. Мищенко К. П., Ревдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. – Ленинград : Химия, 1983. – 182 с.
7. Альтшуллер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Усп. физ. наук. – 1965. – Т. 85. – Вып. 2. – С. 197–258.
8. Ильин В. В., Рыбаков А. П., Козлов В. В. Анализ критериев возбуждения взрыва // Изв. Челябинского научного центра. – 2006. – Вып. 4(34). – С. 21–25. – URL: <http://www.csc.ru/eg/issue/ru/37>
9. Румянцев А. И., Свинцов А. Д. Микроволновка – химический реактор // Химия и жизнь. – 2009. – № 12. – С. 33.

L. L. Khimenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Research Institute of Polymeric Materials, Perm

A. V. Kochergin, Scientific Research Institute of Polymeric Materials, Perm

A. N. Kozlov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Perm State Agricultural Academy

N. A. Rybakov, Candidate of Technical Sciences, Perm State Technical University

A. P. Rybakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Perm State Technical University

Heat Capacity Measuring of Polymer Composition after Microwave Exposure

The results of heat capacity measuring of microwave exposed polymeric composition are presented. Some aspects of microwave effects on polymeric compounds are discussed.

Key words: energetic polymeric composition, microwave radiation, response of polymeric composition to microwave radiation, heat capacity.