

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.04
УДК 544.03

Э.М. Нуруллаев

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА АКРИЛОНИТРИЛ – БУТАДИЕНА – СТИРОЛА

Исследовано влияние сверхвысокочастотного излучения на структуру и механические характеристики поли(акрилонитрил-бутадиен-стирол) пластика, проведен расчет тепловой энергии излучения, поглощенной материалом. Показано, что с увеличением поглощенной тепловой энергии сверхвысокочастотного излучения материалом увеличивается его деформация разрушения почти вдвое: от 1,2 % для исходного образца до 2,7 % для образца, подвергнутого воздействию сверхвысокочастотного излучения, т.е. материал становится более пластичным. При значениях тепловой энергии сверхвысокочастотного излучения, поглощенной поли(акрилонитрил-бутадиен-стирол) пластиком, от 0 до $750 \cdot 10^8$ Дж/м³ разрывное напряжение плавно снижается и при дальнейшем увеличении энергии до $1560 \cdot 10^8$ Дж/м³ возрастает практически до значений для исходного образца. Сделано предположение о том, что сверхвысокочастотное излучение приводит к изменению структуры и механических характеристик исследуемого материала в результате воздействия кислорода из воздуха.

Ключевые слова: сверхвысокочастотное излучение, поли(акрилонитрил-бутадиен-стирол) пластик, инфракрасные спектры, ИК-р, плотность тепловой энергии, поглощенной материалом, диэлектрическая проницаемость, механическое напряжение, деформация, структура.

E.M. Nurullaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EFFECT OF EXPOSURE TO MICROWAVE RADIATION ON MECHANICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF PLASTIC BASED ON HIGH MOLECULAR TECHNICAL POLYMER ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE

The effect of microwave monitoring of the development and mechanical characteristics of poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) plastic has been studied, and the calculated effect of microwave absorption measurement has been carried out. It is shown that with the desire to develop the microwave development of the ability to deform almost twice from 1.2 % for the original sample to 2.7 % for the sample exposed to microwave radiation, i.e. the material becomes more flexible. At values of thermal energy of microwave radiation absorbed by poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) plastic from 0 to $750 \cdot 10^8$ J/m³, the rupture stress gradually decreases and, with a further increase to $1560 \cdot 10^8$ J/m³, increases to practically the values for the original sample. An assumption is made that microwave radiation leads to a change in the structure and mechanical characteristics of the material under study as a result of exposure to oxygen from the air.

Keywords: microwave radiation, poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) plastic, infrared spectra, infrared spectroscopy, thermal energy density absorbed by the material, dielectric constant, mechanical stress, deformation, structure.

В настоящее время производство и применение пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрил – бутадиен – стирола (ABS-пластика) переживает непрерывный рост на рынке, обусловленный увеличением строительной активности и индустриализации по всему миру [1].

Его превосходные механические свойства и низкая плотность обусловлены комбинацией сомономеров, поскольку каждый из них играет определенную роль в конечных свойствах ABS. Полиакрилонитрильные сегменты придают полярные взаимодействия между полимерными цепями, что приводит к более высо-

кой механической стойкости по сравнению с чистым полистиролом. Сегменты полибутадиена обеспечивают ударную вязкость, так как имеют свойства эластомера. Полистирол придает глянец поверхности и электроизоляционные свойства. Это делает ABS пригодным для нескольких применений, таких как автомобильные и электронные компоненты, а также городское строительство.

Однако ABS чувствителен к различным воздействиям, из-за наличия двойных связей в бутадиеновых звеньях, что приводит к очевидному ухудшению структуры и характеристик [2].

Ненасыщенные связи C=C в полибутадиеновых сегментах ABS чувствительны к фото- и термическому окислению. Реакции деградации начинаются с производства свободных радикалов, генерируемых гомолитическим насыщением C-H связей, прилегающих к ненасыщенным [3]. Эти свободные радикалы реагируют с кислородом и образуют гидропероксиды, которые запускают цепные реакции окисления, которые включают образование эпоксидов, карбониллов и гидроксидов [4; 5].

Уникальные характеристики микроволн (селективный, объемный и быстрый нагрев) делают сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение не только эффективным методом нагрева для минимизации потребления энергии при изготовлении изделий из ABS-пластика [6], но и привлекательным с точки зрения потенциального нетеплового влияния СВЧ-волн на скорость химических реакций [7–9].

Аддитивные технологии (3D-печать) позволяют создавать объекты со сложной геометрией без необходимости дорогостоящей оснастки, что делает ее привлекательной техникой изготовления объектов как для научных исследований, так и для коммерческого производства. Эта технология широко используется в производстве изделий из ABS-пластика. Поэтому на первом этапе исследований представляло интерес оценить возможное влияние СВЧ-излучения на коммерческий ABS-пластик методом инфракрасной (ИК) спектроскопии.

Исследования прочности модифицированных в СВЧ электромагнитном поле объектов 3D-печати, армированных композитом с углеродным волокном, показали, что допол-

нительная обработка армированного образца в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц в течение 10 с приводит к увеличению разрывного усилия по сравнению с контрольным в 1,74 раза, а модуля упругости – в 3,5 раза [10].

Согласно [11] улучшение износостойкости ABS-пластика было объяснено увеличением его твердости после микроволновой обработки. Изменения кристаллической структуры аморфного ABS-пластика были незначительны.

Аддитивное производство (АП) – стремительно развивающаяся отрасль в последнее десятилетие. Ключевой проблемой для деталей АП (особенно деталей, изготовленных моделированием наплавлением (FDM)) в инженерных приложениях является слабая межслойная адгезия, которая обычно приводит к расслоению и механическому разрушению. Для решения этой проблемы в работе [12] предложено внедрение углеродных нанотрубок в термопласты на основе акрилонитрил-бутадиен-стирола посредством процесса экструзии нитей. Микроволновое излучение приводит к выделению большого количества тепла, которое используется для плавления ABS-пластика в течение очень короткого времени. Авторами [12] было обнаружено, что эта обработка улучшает межслойную адгезию без объемного нагрева для деформации деталей, напечатанных на 3D-принтере.

Устойчивость ABS-пластика к воздействию СВЧ-излучения позволяет рассматривать его в качестве полимерной матрицы композитов, используемых в электронных и микроволновых устройствах [13; 14]. Так, в работе [13] сообщается об изготовлении коммерчески привлекательных печатных деталей методом наплавления из композиции BaTiO₃/ABS с высокой диэлектрической проницаемостью. Авторами [14] разработаны композиции из технического углерода/ABS и стального волокна/ABS, которые получены с проводимостью, подходящей для электромагнитного экранирования (более 10⁻³ см/см). Установлено, что при воздействии СВЧ-излучения на ABS-пластик его разрывное напряжение возрастает [15].

Анализ литературных источников показывает, что работы, посвященные исследованиям воздействия СВЧ-излучения на механические характеристики ABS-пластика, практически отсутствуют, хотя этот материал довольно широко применяется в деталях и узлах различных конструкций автомобиля, авиа-, судостроения, которые постоянно находятся под воздействием СВЧ-излучения.

Цель настоящей работы – исследование влияния сверхвысокочастотного излучения на структурные и механические характеристики пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрил – бутадиен – стирола.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран доступный коммерческий акрилонитрил-бутадиен-стирол (диаметр прутка $1,75 \pm 5$ мм), произведенный ООО «Профлекс Плюс».

Для оценки влияния СВЧ-облучения на пластик были изготовлены пленки. Пруток ABS-пластика измельчали и растворяли в ацетоне. Концентрация ABS-пластика в ацетоне составляла 10 %. Полученную суспензию затем оставляли при комнатной температуре в открытом фторопластовом лотке (контейнере) и периодически перемешивали для удаления пузырьков; вязкость увеличивалась по мере испарения ацетона. После 24 ч при комнатной температуре образцы выдерживали в сушильном шкафу при температуре 60°C 24 ч, чтобы обеспечить эффективное удаление любого оставшегося ацетона. Затем пленку разрезали на пластинки длиной 7 и шириной 1 см. Толщина всех пленок составляла $0,25 \pm 0,01$ мм. Данные пленки подвергали СВЧ-облучению. После они были исследованы методом ИК-спектроскопии с последующим измерением физико-механических характеристик.

Для изучения изменений, происходящих на поверхности ABS-пластика, использовали инфракрасную спектроскопию (FTIR) с преобразованием Фурье. ИК-спектры снимали методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) от 4000 до 400 см^{-1} при частоте съемки 4 см^{-1} с помощью спектрометра IFS66/S (Bruker, Германия). Спектры, по-

лученные в режиме поглощения, нормализовали поглощением при 1492 см^{-1} , которое характеризует вибрацию стирольного кольца.

В качестве источника СВЧ-излучения использован СВЧ-генератор с частотой излучения 2,45 ГГц и мощностью 600 Вт. С помощью регулятора таймера меняется время воздействия СВЧ-излучения на материал.

Методика проведения экспериментов

Воздействие СВЧ-излучения на ABS-пластик и измерение температуры образцов. Генератор размещали на открытой площадке, размеры которой исключали влияние на образцы СВЧ-излучения, отраженного от окружающих предметов. Образцы для облучения помещали в герметичный контейнер из пенопласта. Пенопласт абсолютно прозрачен для СВЧ-излучения и в процессе облучения предотвращает внешнее воздействие, прежде всего охлаждение. Пенопластовый контейнер с облучаемыми образцами располагали непосредственно на срезе рупорной антенны генератора.

При подготовке к воздействию СВЧ-излучения образцы были разделены на группы и партии. Каждая группа разделена на четыре партии, время воздействия на которые было различно. При закладке партий образцов в контейнер для облучения измерили их начальную температуру, равную 296 К для всех образцов. После облучения и снятия крышки контейнера температуру измеряли пирометром Tem Pro 300. Для каждой партии проведено пять параллельных измерений с интервалом 2–2,5 с. Расстояние между поверхностью закладки образцов и пирометром 300 мм. После воздействия СВЧ-излучения партия образцов остывала в естественных условиях в помещении, где производили их закладку в контейнер.

Расчет плотности тепловой энергии, поглощенной материалом

Для оценки воздействия СВЧ-излучения на материал используется величина тепловой энергии, поглощенная материалом.

Известно, что напряженность электрического поля в диэлектрике изменяется по экспоненциальному закону:

$$E = E_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда напряженности в волне, падающей на поверхность диэлектрика, В/м.

Выражение для объемной плотности мощности тепловой энергии $P_{\text{тепл}}$, Вт/м³:

$$P_{\text{тепл}} = 2\pi E^2 f \epsilon_0 \epsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м; f – частота, Гц; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая постоянная, Ф/м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика.

Плотность тепловой энергии, поглощенная материалом $W_{\text{вар}}$, Дж/м³, определяется выражением:

$$W_{\text{вар}} = P_{\text{тепл}} \cdot t_{\text{возд}}. \quad (3)$$

Рассчитанная величина $E = 4,7 \cdot 10^5$ В/м. При этом использованы следующие данные: амплитуда импульса $f_{\text{имп}} = 375$ Гц, длительность импульса, $\tau_{\text{имп}} = 2,5$ мкс. Мощность СВЧ-излучения $P_{\text{и}} = 0,754$ МВт, размер широкой стенки волновода $a = 0,072$ м, площадь раскрыва рупорной антенны $S = 8 \cdot 10^{-3}$ м², длина волны СВЧ-излучения $\lambda = 0,111$ м, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,45$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = 4,15 \cdot 10^{-3}$. Методика измерений электрофизических характеристик приведена в работе [16].

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены ИК НПВО спектры ABS-пластика исходного и облученного СВЧ-излучением в течение 180, 300, 600, 900 и 1200 с.

Все представленные спектры содержат характеристические полосы ABS-пластика. Валентные колебания ароматического и алифатического С-Н в ABS четко видны в диапазоне 3200–3000 и 3000–2800 см⁻¹ соответственно. Наблюдается пик 2237 см⁻¹, относящийся к нитриловой группе из полиакрилонитриловых сегментов. Полосы поглощения при 1635, 966 и 910 см⁻¹ соответствуют связи С=С и колебаниям связей С-Н в 1,4-бутадиене и 1,2-бутадиене соответствен-

но. Пик 1068 см⁻¹ также указывает на наличие кумулированных связей, а следовательно, и на наличие изомера 1,2-бутадиена. Также обнаружены растягивающие колебания стирольного кольца, расположенные в области 1492–1602 см⁻¹. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в [1; 2].

Изменения, происходящие в ABS-пластике под воздействием СВЧ-излучения, определяли по относительному уменьшению или увеличению интенсивности пика, связанного с функциональными группами, присутствующими в образцах полимера в ИК-спектре. Результаты FTIR показывают, что при СВЧ-облучении изменения интенсивности полос поглощения не коррелируют с величиной времени СВЧ-облучения. Чтобы понять влияние СВЧ-излучения на изменение структуры ABS-пластика, анализировали три области поглощения – область поглощения гидроксила (3650–3200 см⁻¹), область поглощения карбонила (1850–1650 см⁻¹) и области поглощения деформационных колебаний связей С-Н, присоединенных к алкеновым углеродам ниже 1000 см⁻¹ [2].

Подробный анализ ИК-спектров показывает, что в области поглощения гидроксила интенсивность всех облученных образцов ABS-пластика находится примерно на одном уровне и выше, чем у исходного. В области поглощения карбонила необходимо отметить некоторое перераспределение. Так, интенсивность пика при 1737 см⁻¹ (валентные колебания альдегида) возрастает с увеличением времени воздействия от 180 до 1200 с. Для исходных образцов и образцов, подвергнутых воздействию СВЧ-излучения в течение 180, 300, 600 с, практически отсутствует пик при 1708 см⁻¹ (валентные колебания кетона). Он наблюдается при воздействии на ABS в течение 900 и 1200 с, что может указывать на изменение химической структуры, связанное с окислением кислородом воздуха в результате воздействия СВЧ-излучения [5].

В области поглощения деформационных колебаний связей С-Н (966 и 910 см⁻¹) интенсивность пиков увеличивается в ряду 180, 300, 600, 900, 1200 с.

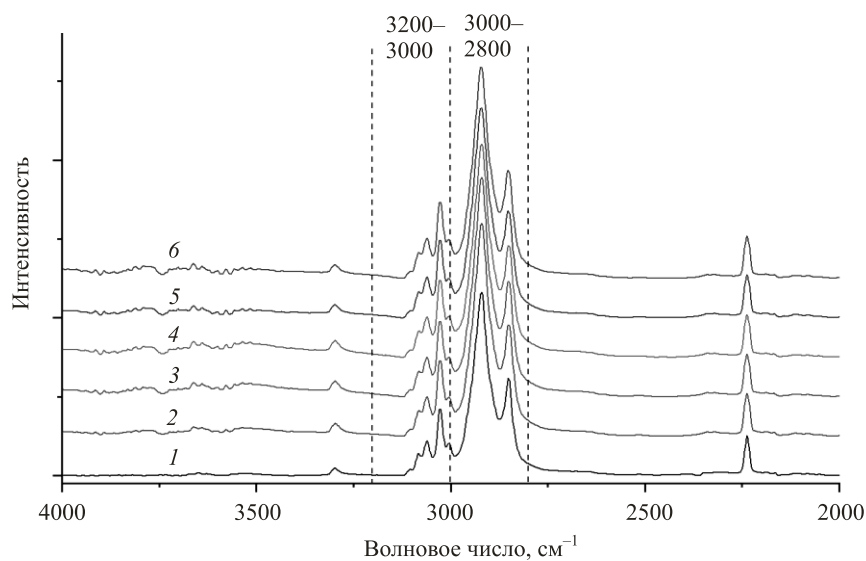
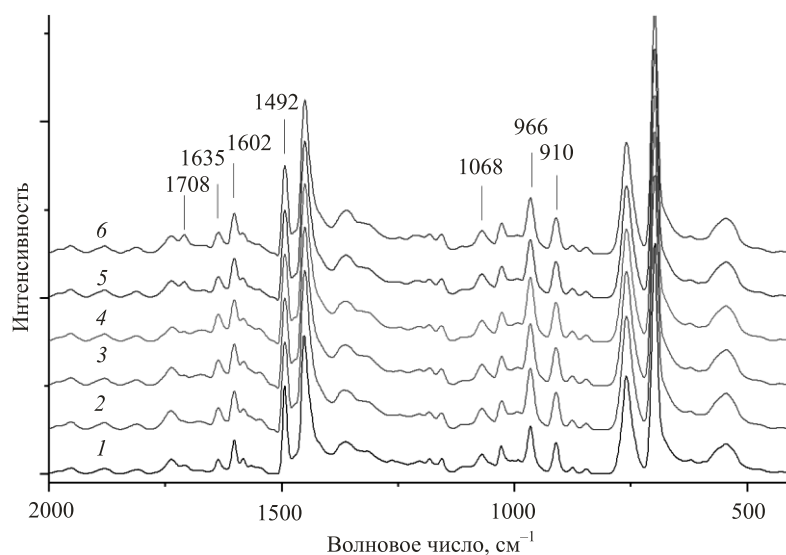
*a**б*

Рис. 1. ИК-спектры ABS-пластика исходного (1) и облученного СВЧ в течение 180 (2), 300 (3), 600 (4), 900 (5) и 1200 (6) с в области: *a* – 4000–2000 см⁻¹; *б* – 2000–400 см⁻¹

Зависимость тепловой энергии, поглощенной ABS-пластиком,
от времени воздействия СВЧ-излучения

$t, \text{с}$	$W_{\text{вар}} \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$
180	$234 \pm 5,85$
300	$390 \pm 7,5$
600	680 ± 17
900	$1170 \pm 29,2$
1200	1560 ± 39

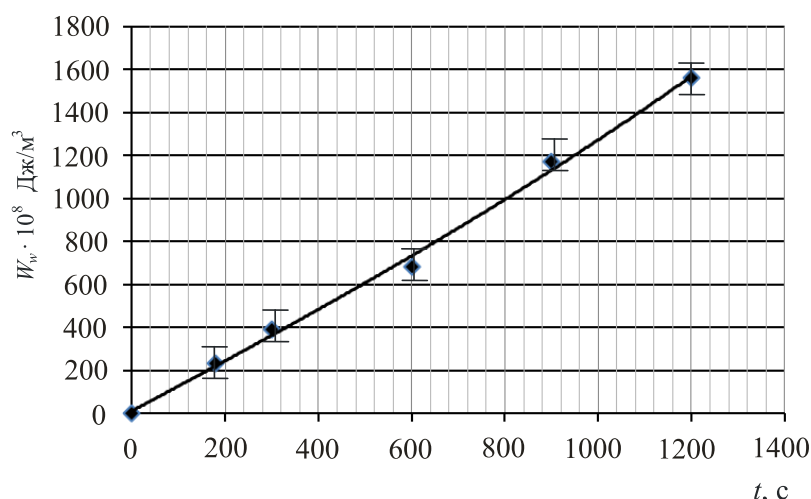


Рис. 2. График зависимости тепловой энергии, поглощенной материалом из ABS-пластика, от времени воздействия СВЧ-излучения

Результаты расчетов зависимости тепловой энергии, поглощенной материалом из ABS-пластика, от времени воздействия СВЧ-излучения на пластик приведены в таблице. Погрешность измерений составляет 2,5 %.

График зависимости тепловой энергии, поглощенной ABS-пластиком, от времени воздействия СВЧ-излучения приведен на рис. 2, где показано, что с ростом времени воздействия увеличивается тепловая энергия излучения, поглощенная материалом. Необходимо заметить, что величина тепловой энергии для ABS-пластика достаточно велика, поэтому воздействие СВЧ-излучения на пластик в течение 1500 с приводит к полному сгоранию образца.

Определение механических характеристик поли(акрилонитрил-бутадиен-стирол) пластиков

Физико-механические характеристики модельных образцов определяли на универсальной испытательной машине INSTRON-3365: условную разрывную прочность σ_b ; относительную деформацию разрушения ϵ_b при растяжении – при скорости растяжения 10 мм/мин и температуре 298 К.

Результаты испытания механических свойств образцов исходного и подвергнутых воздействию СВЧ-излучения ABS-пластиков представлены на рис. 3, где видно, что с возрастанием времени воздействия СВЧ-излучения на ABS-пластик увеличивается деформация разрушения почти вдвое: от 1,2 для исходного образца до 2,7 % для образца, подвергнутого воздействию в течение 1200 с (см. рис. 3, е), т.е. материал становится более пластичным.

На рис. 4 представлена зависимость тепловой энергии СВЧ-излучения, поглощенной ABS-пластиком, от разрывного напряжения, из которого следует, что при значениях W_{war} от 0 до $750 \cdot 10^8$ Дж/м³ разрывное напряжение плавно снижается и при дальнейшем увеличении W_{war} до $1560 \cdot 10^8$ Дж/м³ возрастает практически до значений исходного образца. Согласно данным ИК-спектроскопии этот эффект можно объяснить протеканием двух конкурирующих процессов при воздействии СВЧ-излучения – упрочнения, которое можно охарактеризовать нарастанием интенсивности связей С-Н, и деградации пластика в результате его окисления. При этом суммарный максимальный прирост интенсивности ИК-спектров в области карбонильных групп обнаружен для ABS-образца, подвергнутого СВЧ-воздействию в течение 1200 с.

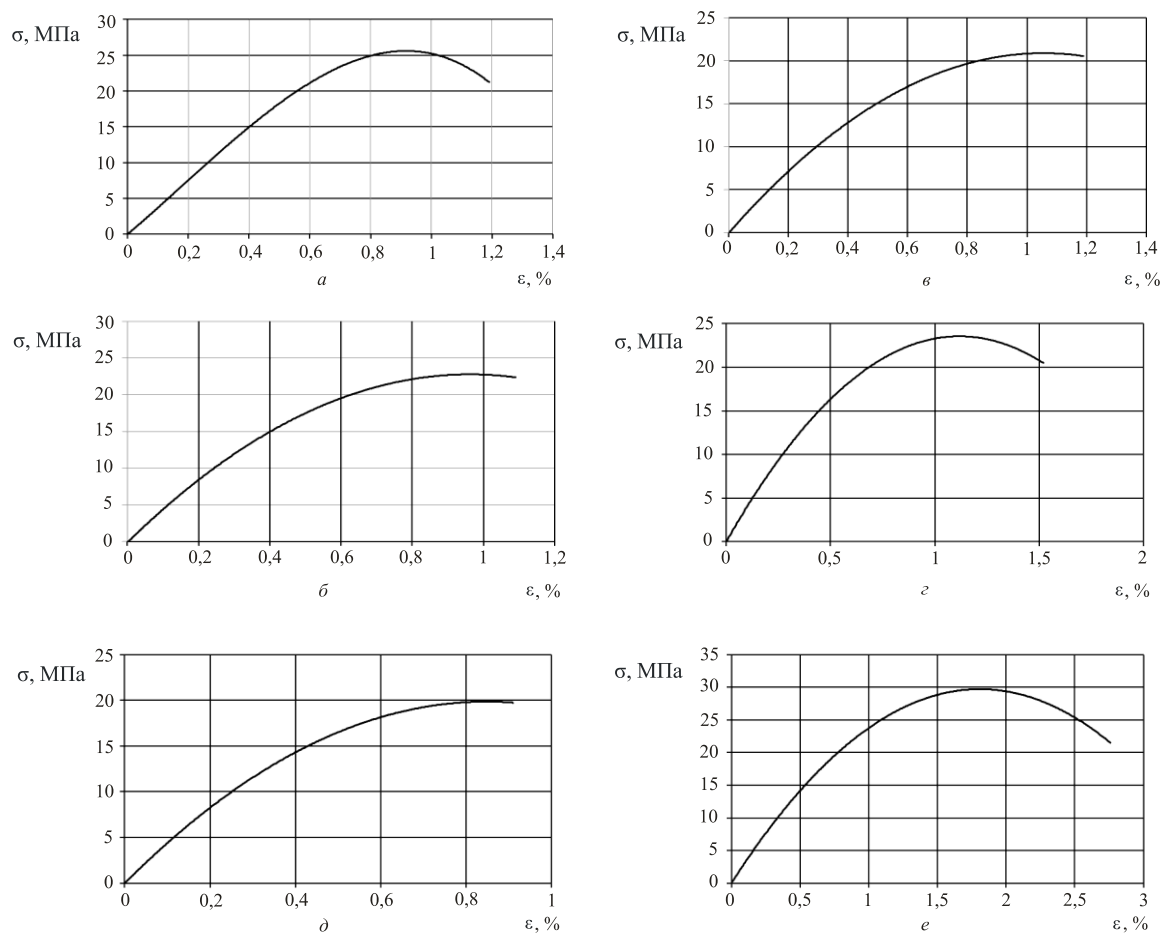


Рис. 3. Зависимость деформации от напряжения при различных временах воздействия СВЧ-излучения: *a* – исходный, *б* – 180 с, *в* – 300 с, *г* – 600 с, *д* – 900 с, *е* – 1200 с

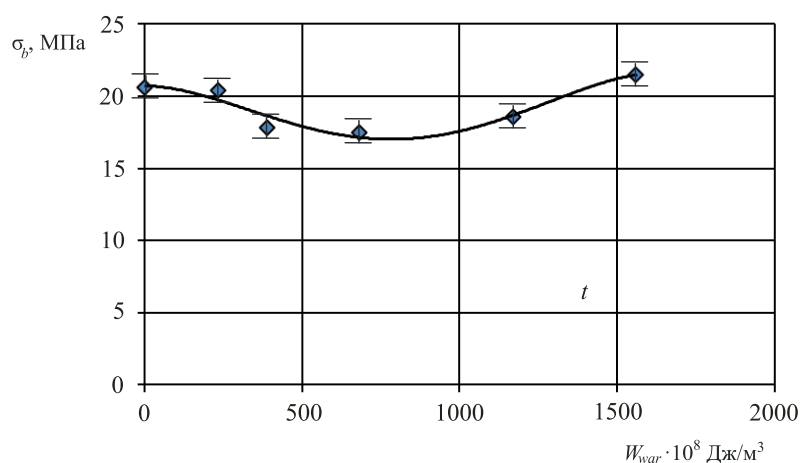


Рис. 4. График зависимости тепловой энергии СВЧ-излучения, поглощенной ABS-пластиком, от разрывного напряжения

Выводы

Показано, что воздействие СВЧ-излучения на ABS-пластик приводит к изменению структуры пластика в результате воз-

действия кислорода воздуха. Следует отметить, что валентные колебания альдегида возрастают, а валентные колебания кетона практически исчезают. Это может указывать на изменение химической структуры, связанное

с окислением кислородом воздуха в результате воздействия СВЧ-излучения.

С возрастанием времени воздействия СВЧ-излучения на ABS-пластик увеличивается деформация разрушения почти вдвое: от 1,2 для исходного образца до 2,7 % для образца, подвергнутого воздействию в течение 1200 с, т.е. материал становится более пластичным. При значениях $W_{\text{вар}}$ от 0 до $750 \cdot 10^8$ Дж/м³ разрывное напряжение плавно снижается и при дальнейшем увеличении $W_{\text{вар}}$ до $1560 \cdot 10^8$ Дж/м³ возрастает практически до значений исходного образца.

Согласно данным ИК-спектроскопии, это можно объяснить протеканием двух конкурирующих процессов при воздействии СВЧ-излучения – упрочнения (которое можно охарактеризовать нарастанием интенсивности связей C–H, максимальным значением интенсивности ИК-спектров для образцов ABS-пластика) и деградации пластика в результате его окисления. Суммарный максимальный прирост интенсивности ИК ABS-спектров в области карбонильных групп обнаружен для образца, подвергнутого СВЧ-воздействию в течение 1200 с.

Библиографический список

1. Fonseca L.P., Waldman W.R., Paoli de M.A. ABS composites with cellulose fibers: Towards fiber-matrix adhesion without surface modification // *Composites Part C: Open Access*. – 2021. – Vol. 5. – P. 100–142. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100142
2. FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. *Spectrochimica / J. Li, F. Chen, L. Yang, L. Jiang, Y. Dan // Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 184. – P. 361–367. DOI:10.1016/j.saa.2017.04.075
3. Paoli de M.A. The chemical effects of photo-oxidation on butadiene rubber // *European Polymer Journal*. – 1983. – Vol. 19. – P. 761–768. DOI: 10.1016/0014-3057(83)90145-3
4. Chevalier Epoxides in the thermal oxidation of polybutadiene / M. Guyader, L. Audouin, X. Colin, J. Verdu // *Polymer Degradation and Stability*. – 2006. – Vol. 91. – P. 2813–2815. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.009
5. Thermal degradation of acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) blends / B.E. Tiganisa, L.S. Burna, P. Davisa, A.J. Hill // *Polymer Degradation and Stability*. – 2002. – Vol. 76. – P. 425–434. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00045-9
6. Amini A., Latifi M., Chaouki J. Electrification of materials processing via microwave irradiation: A review of mechanism and applications // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 193. – P. 117003. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117003
7. Microwave-Specific Effects on the Equilibrium Constants and Thermodynamics of the Steam – Carbon and Related Reactions / A. Ferrari, J. Hunt, A. Lita, B. Ashley, A.E. Stiegman // *The Journal of Physical Chemistry*. – 2014. – Vol. 118. – P. 9346–9356. DOI: 10.1021/jp501206n
8. A new type of power energy for accelerating chemical reactions: the nature of a microwave-driving force for accelerating chemical reactions / J. Zhou, W. Xu, Z. You, Z. Wang, Y. Luo, L. Gao, C. Yin, R. Peng, L. Lan // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 25149. DOI: 10.1038/srep25149
9. Carbothermic Reduction Behavior of FeS in the Presence of CaO during Microwave Irradiation / A. Amini, T. Maeda, K. Ohno, K. Kunitomo // *ISIJ International*. – 2019. – Vol. 59. – P. 672–678. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-391
10. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Павлов С.П. Исследование прочности модифицированных в СВЧ электромагнитном поле объектов 3D-печати, армированных композитом с углеродным волокном // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение*. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 70–81.
11. Improvement of Scratch and Wear Resistance of Polymers by Fillers Including Nanofillers / W. Brostow, H. Lobland, N. Hnatchuk, J. M. Perez // *Nonmaterial's*. – 2017. – Vol. 7 (3). – P. 66. DOI: 10.3390/nano7030066
12. Carbon Nanotube Reinforced Fused Deposition Modeling Using Microwave Irradiation / M. Zhang, X. Song, W. Grove, E. Hull, Z.J. Pei, F. Ning, W. Cong // *Proceedings of the ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Vol. 3: Joint MSEC-NAMRC Symposia. Blacksburg, Virginia, USA. – 2016. June 27 – July 1, V003T08A007. ASME. DOI: 10.1115/MSEC2016-8790
13. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites / F. Castles, D. Isakov, A. Lui et al. // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 22714. DOI: 10.1038/srep22714

14. Moulart A., Marrett C. and Colton J. A phenomenological constitutive model for foams under large deformations // *Polymer Engineering and Science*. – 2004. – Vol. 44, № 3.

15. Нуруллаев Э.М. Экспериментальное определение электрофизических характеристик полимерного композитного материала и расчет поглощенной материалом плотности тепловой энергии СВЧ-излучения // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2021. – Т. 62, № 2. – С. 53–60.

References

1. Fonseca L.P., Waldman W.R., Paoli de M.A. ABS composites with cellulose fibers: Towards fiber-matrix adhesion without surface modification. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 5, pp. 100-142. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100142

2. Li J., Chen F., Yang L., Jiang L., Dan Y. FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, vol. 184, pp. 361–367. DOI: 10.1016/j.saa.2017.04.075

3. Paoli de M.A. The chemical effects of photo-oxidation on butadiene rubber. *European Polymer Journal*, 1983, vol. 19, pp. 761-768. DOI: 10.1016/0014-3057(83)90145-3

4. Guyader M., Audouin L., Colin X., Verdu J. Chevalier Epoxides in the thermal oxidation of polybutadiene. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, pp. 2813-2815. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.009

5. Tiganisa B.E., Burna L.S., Davisa P., Hill A.J. Thermal degradation of acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) blends. *Polymer Degradation and Stability*, 2002, vol. 76, pp. 425-434. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00045-9

6. Amini A., Latifi M., Chaouki J. Electrification of materials processing via microwave irradiation: A review of mechanism and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 193, pp. 117003. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117003

7. Ferrari A., Hunt J., Lita A., Ashley B., Stiegman A.E. Microwave-Specific Effects on the Equilibrium Constants and Thermodynamics of the Steam – Carbon and Related Reactions. *The Journal of Physical Chemistry*, 2014, vol. 118, pp. 9346-9356. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp501206n>

8. Zhou J., Xu W., You Z., Wang Z., Luo Y., Gao L., Yin C., Peng R., Lan L. A new type of power energy for accelerating chemical reactions: the nature of a microwave-driving force for accelerating chemical reactions. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 25149. DOI: 10.1038/srep25149

9. Amini A., Maeda T., Ohno K., Kunitomo K. Carbothermic Reduction Behavior of FeS in the Presence of CaO during Microwave Irradiation. *ISIJ International*, 2019, vol. 59, pp. 672-678. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-391

10. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Pavlov S.P. Issledovanie prochnosti modifizirovannish v CVSH elektromagnitnom pole obektov 3d pechati, armirovannishkompozitom s uglerodnim voloknom. *Vestnik YUrGU. Seriya «Mashinostroenie»*, 2017, vol. 17, № 4, pp. 70-81.

11. Brostow W., Lobland H., Hnatchuk N., Perez J.M. Improvement of Scratch and Wear Resistance of Polymers by Fillers Including Nanofillers. *Nonmaterial's*, 2017, vol. 7 (3), pp. 66. DOI: 10.3390/nano7030066

12. Zhang M., Song X., Grove W., Hull E., Pei Z.J., Ning F., Cong W. Carbon Nanotube Reinforced Fused Deposition Modeling Using Microwave Irradiation. *Proceedings of the ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Vol. 3: Joint MSEC-NAMRC Symposia*. Blacksburg, Virginia, USA. 2016. June 27–July1, V003T08A007. ASME. DOI: 10.1115/MSEC2016-8790

13. Castles F., Isakov D., Lui A. et al. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 22714. DOI: 10.1038/srep22714

14. Moulart A., Marrett C. and Colton J. A phenomenological constitutive model for foams under large deformations. *Polymer Engineering and Science*, 2004, vol. 44, № 3.

15. Nurullaev E.M. Experimentalnoe opredelenie elektrofisicheskikh charakteristik polimerenogo kompozitnogo materiala I rascht pogloshnnoj materialom plotnosti teplovoy energii SVCH-izlucheniya. *Prikladnaya mehanika i technicheskaya fizika*, 2021, vol. 62, № 2, pp. 53-60.

Об авторе

Нуруллаев Эргаш Масеевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная физика», Пермский государственный политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29), e-mail: ergnur@mail.ru.

About the author

Ergash M. Nurullaev (Perm, Russian Federation) – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Physics PNRPU (614990, Perm, Komsomolsky pr. 29), e-mail: ergnur@mail.ru.

Финансирование. Исследования проведены при финансовой поддержке Пермского края в виде гранта по проекту «Модели, методы и цифровые технологии для создания функциональных композиционных и полимерных материалов с помощью их обработки концентрированными потоками гамма-квантов в различных газовых средах» (Соглашение № С-26/581).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад. 100 %.

Поступила: 11.05.2022

Одобрена: 20.05.2022

Принята к публикации: 04.08.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Нуруллаев, Э.М. Влияние воздействия сверхвысокочастотного излучения на механические и структурные характеристики пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрил – бутадиена – стирола / Э.М. Нуруллаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 33–42. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.04

Please cite this article in English as: Nurullaev E.M. Effect of exposure to microwave radiation on mechanical and structural characteristics of plastic based on high molecular technical polymer acrylonitrile-butadiene-styrene. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 69, pp. 33-42. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.04