

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

© 2021 г. Р.С. Гайсин^{1,*}, В.Ю. Тюканько^{1,**}, А.В. Демьяненко^{1,***}

¹НАО «СКУ» им. М. Козыбаева, Россия РК 150000 Петропавловск, ул. Пушкина, 86
E-mail: *raikoshan001@mail.ru; **vetal3333@mail.ru; ***demianenkoav@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2021; после доработки 22.10.2021
Принята к публикации 22.10.2021

В настоящее время в мире ускоренными темпами развивается технология ротационного формования пластмасс. Однако при данном методе переработки возможно возникновение в стенках изделий «микробузырьков», которые значительно ухудшают их качество. В данной работе для оценки качества пластиковых изделий был применен метод ультразвукового контроля (УЗК). С помощью эхометода при рабочей частоте 2,5 МГц был проведен анализ образцов различной степени качества. Выявлено, что скорость распространения ультразвукового сигнала не зависит от степени качества изделий и составляет 2330 ± 10 м/с. Установлено, что чем больше параметр шероховатости поверхности изделий R_z (от 2,5 до 20 мкм), тем меньше становится амплитуда донного сигнала A_d . Недопеченный образец определяется по параметрам A_d (от -6,0 до -15,0 МГц). Определен эталонный образец ($\rho = 0,942$ г/см³), с помощью которого можно калибровать дефектоскоп, его $A_d = 0$ дБ при рабочей частоте 2,5 МГц. Выявлена зависимость между плотностью/пропеченностью изделий и амплитудой донного сигнала. Доказана возможность выявления внутренних дефектов изделий методами УЗК. Предложена новая методика выявления годных изделий в производстве, с помощью которой можно определить степень качества изделий.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, пластиковые изделия, ротационное формование, оценка качества изделий.

DOI: 10.31857/S013030822111004X

ВВЕДЕНИЕ

Изделия, полученные методом ротационного формования, характеризуются длительным сроком эксплуатации, химической стойкостью и низкой себестоимостью. Однако в связи со сложностью геометрических форм изделий (наличия большого количества радиусов, переходов и т.п.) и относительно высокой их стоимостью (при разрушающем контроле/разрезки изделий затраты могут составить сотни тысяч рублей), актуальным вопросом становится использование неразрушающих методов контроля для оценки качества полученных изделий.

При ротационном формовании происходит распределение сырьевого материала по внутренней поверхности полости формы, а одновременный нагрев формы вызывает его расплавление с образованием тонкого покрытия в виде оболочки [1]. На второй стадии процесса между сплавляемыми частицами пластмассы образуются жидкие мостики, задерживающие пузырьки воздуха, которые должны исчезнуть на последующей стадии уплотнения, и все это происходит при высоких температурах выше температуры плавления полиэтилена [2]. Если не избавиться от этих пузырьков, то изготовленные изделия будут иметь низкую ударную вязкость [3]. При перегреве изделия в форме происходит термоокислительная деструкция материала и ухудшение его механических свойств [4].

Сейчас производители изделий методом ротационного формования вынуждены для поддержки высокого уровня качества выпуска продукции проверять разрушающим контролем небольшое количество изделий из каждой партии. Это создает большие сложности по нескольким причинам. Во-первых, это длительный и дорогостоящий процесс; во-вторых, всегда остается шанс на то, что бракованное изделие не будет выявлено на этапе контроля. Ударная вязкость готовых емкостей является наиболее важной характеристикой для оценки качества изделия, на которое влияют условия процесса [1, 5]. В источниках [6, 7] описаны способы оценки качества изготовленных изделий за счет контроля модуля упругости, твердости и вязкости материала. Термодеструкция материала вызывает рост вязкости полиэтилена, которое может быть выявлено по анализу текучести расплава [8] или геометрией параллельных пластин [9].

Однако ни один из этих методов контроля неприменим в промышленности для обеспечения качества серийно выпускаемых изделий из-за стоимости и геометрических особенностей изделий (изготовленных методом ротационного формования). Поэтому, для повышения эффективности

процесса и уменьшения затрат на выявление бракованных изделий стоит применить методы неразрушающего контроля. В источнике [10] описан метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-IR), которая использовалась для идентификации продуктов окисления на поверхности изделий (изготовленных методом ротационного формования). Также рассматривались рентгеновская дифракция [11] и комбинационная рассеивающая спектроскопия [12], которые использовались для оценки изменений морфологии кристаллов на предмет признаков разрушения. Ни один из этих методов не является легко встраиваемым в технологический процесс из-за своей дороговизны. В качестве альтернативы были рассмотрены линейные ультразвуковые методы контроля для полиэтилена, проведены сравнения акустических свойств с различными материалами при различных температурах и различных напряжениях [13, 14]. Традиционные ультразвуковые методы очень эффективны для измерения плотности полиолефинов и полимерных пен путем соотношения этого свойства с изменениями скорости или затуханием звуковой волны, распространяющейся через образец [15—17].

В работе [18] рассмотрен анализ эффекта Маллинза в полиэтилене с контролем деформаций с помощью ультразвука. В исследовании предложен метод контроля развития эффекта Маллинза, который позволяет исследовать изделие (полученное методом ротационного формования) на основе анализа ультразвукового контроля. Показано, что затухание ультразвукового сигнала увеличивалось в корреляции с возрастающей деформацией полиэтилена. В [18] показана возможность выявления дефектов в изделиях (полученных методом ротационного формования) методом ультразвукового контроля при рабочей частоте в диапазоне от 135 до 165 кГц. В [18] доказана возможность оценки качества изделий (изготовленных методом ротационного формования) ультразвуковым анализом и внедрение его в технологический процесс.

Главной задачей данной работы является выявление внутренних дефектов в изделиях (изготовленных методом ротационного формования), а так же определение степени качества/пропеченности изделий с помощью метода УЗК и внедрение этого метода в производство для контроля качества емкостей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются емкости из полиэтилена, изготовленные методом ротационного формования на предприятии ТОО «AVAGRO». При проведении экспериментов использовали образцы, вырезанные из бочек разной степени качества/пропеченности (плотности) (табл. 1).

Таблица 1

| № образца | Плотность изделия ρ , г/см ³ | Средняя энергия разрушения MFE, Дж | Степень пропеченности изделия | Годность изделия |
|-----------|--|------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 1 | 0,934 | 140 | Недопеченный | Брак |
| 2 | 0,934 | 140 | Недопеченный | Брак |
| 3 | 0,934 | 140 | Недопеченный | Брак |
| 4 | 0,941 | 380 | Нормальный | Годен |
| 5 | 0,941 | 380 | Нормальный | Годен |
| 6 | 0,941 | 380 | Нормальный | Годен |
| 7 | 0,949 | 147 | Перепеченный | Брак |
| 8 | 0,949 | 147 | Перепеченный | Брак |
| 9 | 0,949 | 147 | Перепеченный | Брак |
| 10 | 0,949 | 150 | Сгоревший | Брак |
| 11 | 0,949 | 150 | Сгоревший | Брак |
| 12 | 0,949 | 150 | Сгоревший | Брак |

Для изделий, идентифицируемых как «качественные», средняя энергия разрушения (MFE) принимает значение не менее 380 Дж. Так же важным критерием годности изделий является плотность, которая должна быть не менее 0,9395 г/см³. Толщина исследуемых образцов составляет 8 мм, т.к. они были вырезаны из одной серии изготовленных емкостей.

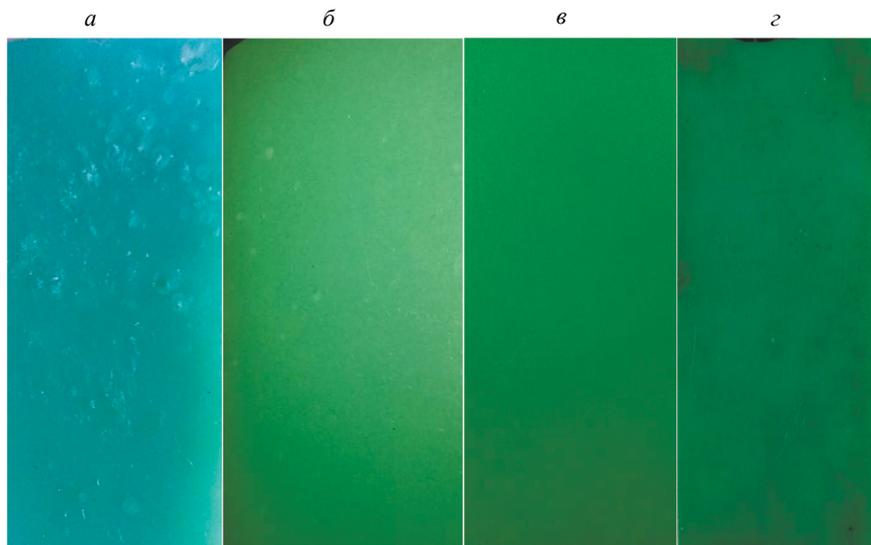


Рис.1. Образцы для ультразвукового контроля:

a — недопеченный образец; *б* — нормально спеченный образец; *в* — перепеченный образец; *г* — сгоревший образец.

В исследовании ультразвуковой дефектоскопией образцов (рис. 1) определяли следующие характеристики: скорость распространения ультразвуковой волны, амплитуду донного сигнала. Анализ осуществлялся с помощью ультразвукового контактного преобразователя 2,5-К12 на универсальном ультразвуковом дефектоскопе УСД-60.

Метод проведения эксперимента заключался в том, что пьезоэлектрический преобразователь 2,5-К12 устанавливался на поверхность изделия с предварительно нанесенным глицерином для эффективности прохождения сигнала. Во избежание погрешностей, вызванных разным давлением, оказываемым на пьезометрический преобразователь, исследование проводили при установке на преобразователь груза массой 100 г (рис. 2).

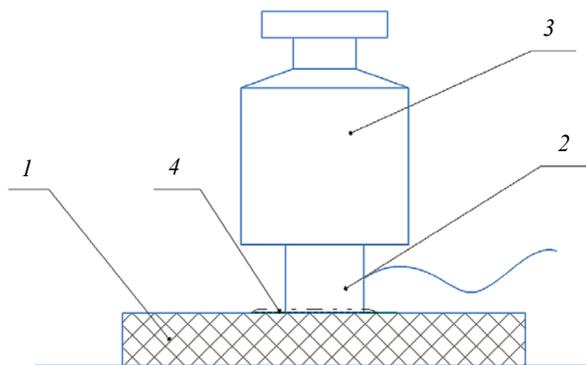


Рис.2. Схематическое изображение проведенного эксперимента:

1 — образец; *2* — пьезометрический преобразователь; *3* — груз; *4* — слой глицерина.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Для определения скорости ультразвука были использованы образцы разной степени пропеченности и плотности (см. табл. 1). Скорость распространения продольной ультразвуковой волны (ПУВ) во всех образцах составляет — 2330 ± 10 м/с. Скорость распространения ПУВ не зависит от степени качества/пропеченности материала и плотности полиэтилена.

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАЗЦОВ НА ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

Для проведения эксперимента была подготовлена серия образцов с различной шероховатостью ($Ra_1 = 2,5$ мкм; $Ra_2 = 5$ мкм; $Ra_3 = 20$ мкм). Затухание ультразвукового сигнала оценивали по величине амплитуды донного сигнала; были обработаны поверхности образцов № 1, № 4, № 7, № 10 наждачной бумагой. Исследования проводились при рабочей частоте 2,5 МГц.

Установлено, что чем больше значение шероховатости поверхности образца, тем меньше амплитуда (Aa) донного сигнала (рис. 3). Также было выяснено, что недопеченный образец № 1 идентифицируется по низкому значению амплитуды донного сигнала Aa (от $-6,0$ до $-15,0$ МГц).

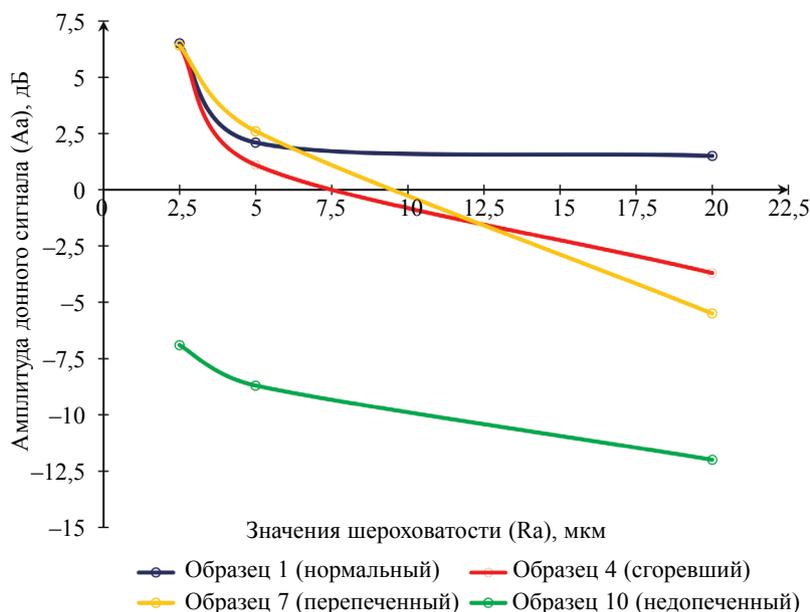


Рис. 3. Зависимость амплитуды донного сигнала от значения шероховатости поверхности образцов (при частоте 2,5 МГц).

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ НА ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

В исследовании по выявлению зависимости амплитуды от плотности изделий были подготовлены образцы толщиной 8 мм (табл. 2). Затухание ультразвукового сигнала оценивали по величине амплитуды донного сигнала, величина которой зависела от плотности образцов. Исследования проводились при рабочей частоте 2,5 МГц.

Таблица 2

| № образца | ρ , г/см ³ | Степень пропеченности изделия | Годность изделия |
|-----------|----------------------------|-------------------------------|------------------|
| 1 | 0,934 | Недопеченный | Брак |
| 2 | 0,940 | Нормальный | Годен |
| 3 | 0,941 | Нормальный | Годен |
| 4 | 0,942 | Нормальный | Годен |
| 5 | 0,944 | Нормальный | Годен |
| 6 | 0,946 | Нормальный | Годен |
| 7 | 0,947 | Нормальный | Годен |
| 8 | 0,948 | Нормальный | Годен |
| 9 | 0,949 | Перепеченный | Брак |

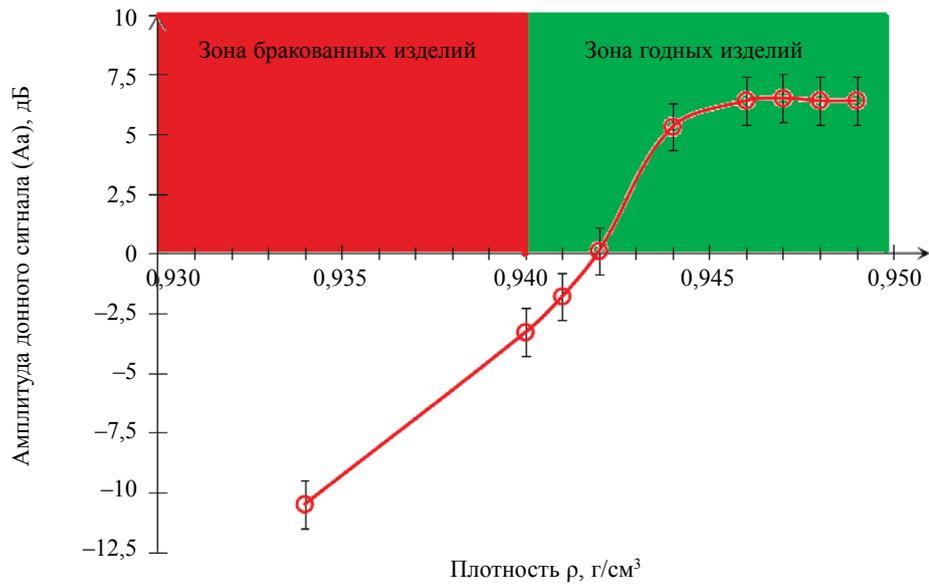


Рис. 4. Влияние плотности на амплитуду донного сигнала (при частоте 2,5 МГц).

По мере увеличения плотности образцов из полиэтилена с 0,934 до 0,948 г/см³ амплитуда донного сигнала увеличивается. При плотности свыше 0,944 г/см³ наблюдается стабилизация амплитуды донного сигнала (рис. 4). Критерием годности образцов предлагается использовать значение амплитуды донного сигнала в промежутке от –5,0 дБ и больше. В ходе экспериментов был выявлен эталонный образец $\rho = 0,942$ г/см³, амплитуда донного сигнала образца составляет 0 дБ при рабочей частоте 2,5 МГц. Критерий годности изделий рекомендуется использовать только после калибровки ультразвукового дефектоскопа по образцу-эталоны. Амплитуда донного сигнала перепеченного образца от нормального не различается.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА НА ОБРАЗЦЫ С РАЗНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Для проведения эксперимента была подготовлена серия образцов с различной плотностью (см. табл. 2). Затухание ультразвукового сигнала оценивали по величине амплитуды донного сигнала. Исследования проводились при рабочей частоте в диапазоне от 0,5 до 30 МГц (рис. 5).

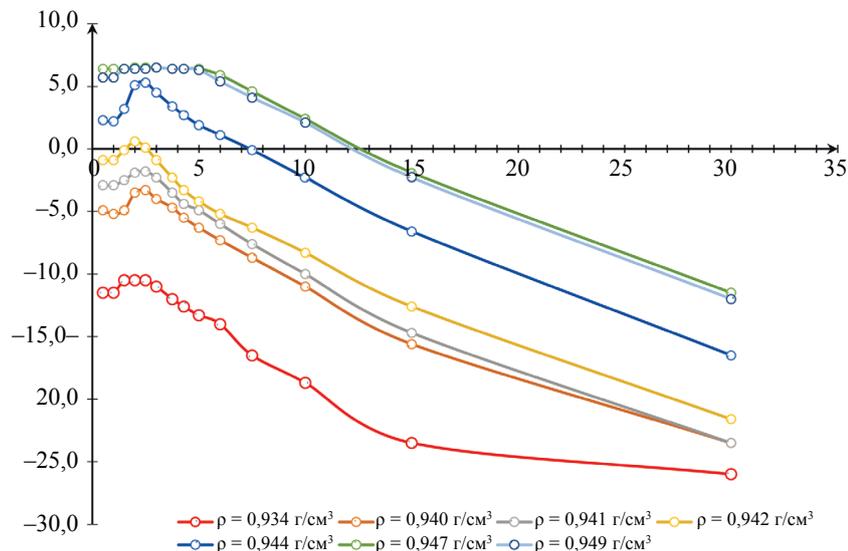


Рис. 5. Влияние частоты сигнала и плотности образцов на амплитуду донного сигнала (при частоте 2,5 МГц).

По мере увеличения частоты сигнала от 0,5 до 2,5 МГц амплитуда донного сигнала увеличивается на всех образцах вне зависимости от плотности. При частоте свыше 2,5 МГц амплитуда донного сигнала уменьшается. Недопеченный образец легко выявляется относительно других, имея самую низкую амплитуду донного сигнала ($\rho = 0,934 \text{ г/см}^3$). Перепеченные и нормально спеченные образцы имеют практически одинаковые параметры амплитуды донного сигнала.

ВЫВОДЫ

1) Скорость распространения продольной ультразвуковой волны в изделиях, полученных методом ротационного формования, не зависит от степени качества (пропеченности) изделия и составляет $2330 \pm 10 \text{ м/с}$.

2) При увеличении параметра шероховатости образцов Ra (с 2,5 до 20 мкм) амплитуда донного сигнала уменьшается. Недопеченные образцы, имеющие плотность меньше $0,9395 \text{ г/см}^3$, легко идентифицировать по отрицательному значению амплитуды донного сигнала.

3) Выявлена зависимость между плотностью образцов и амплитудой (А) донного сигнала. При увеличении плотности график $A=f(\rho)$ имеет два участка. Первый участок позволяет идентифицировать недопеченные изделия (имеющие низкую плотность и ударную вязкость). Второй участок показывает стабилизацию амплитуды донного сигнала, которая имеет одинаковые параметры в перепеченных и нормально спеченных изделиях.

4) Установлено влияние частоты сигнала на амплитуду донного сигнала. В диапазоне частот от 0,5 до 2,5 МГц амплитуда донного сигнала увеличивалась, а при частоте свыше 2,5 МГц уменьшалась вне зависимости от плотности образцов.

5) Результаты данных исследований рекомендуются для дальнейшего внедрения в промышленность для контроля качества емкостей (изготовленных методом ротационного формования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gibson Ian, Shi Dongping*. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process // *Rapid Prototyping Journal*. Dec. 1997. V. 3 (4). P. 129—136.
2. *Kontopoulou M., Vlachopoulos J.* Bubble dissolution in molten polymers and its role in rotational molding // *Polymer Engineering & Science*. Jul. 1999 V. 39 (7). P. 1189—1198.
3. *Spence A.G., Crawford R.J.* The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products // *Polymer Engineering & Science*. Apr. 1996. V. 36 (7). P. 993—1009.
4. *Epacher E.* Processing stability of high density polyethylene: effect of adsorbed and dissolved oxygen // *Polymer*. Nov. 2000. V. 41 (23). P. 8401—8408.
5. *Chaudhary Bharat Indu, Takács Elizabeth, Vlachopoulos John*. Processing enhancers for rotational molding of polyethylene // *Polymer Engineering & Science*. Oct. 2001. V. 41 (10). P. 1731—1742.
6. *Tavares Andreia C., Gulmine Joseane V., Lepienski Carlos M., Akcelrud Leni*. The effect of accelerated aging on the surface mechanical properties of polyethylene // *Polymer Degradation and Stability*. Jan. 2003. V. 81 (2). P. 367—373.
7. *Saifullah Abu, Thomas Ben, Cripps Robert, Tabeshfar Kamran, Wang Lei, Muryn Christopher*. Fracture toughness of rotationally molded polyethylene and polypropylene // *Polymer Engineering & Science*. Jan. 2018. V. 58 (1). P. 63—73.
8. *Mendes A.A., Cunha A.M., Bernardo C.A.* Study of the degradation mechanisms of polyethylene during reprocessing // *Polymer Degradation and Stability*. Jun. 2011. V. 96 (6). P. 1125—1133.
9. *Cuadri A.A., Martin-Alfonso J.E.* The effect of thermal and thermo-oxidative degradation conditions on rheological, chemical and thermal properties of HDPE // *Polymer Degradation and Stability*. Jul. 2017. V. 141. P. 11—18.
10. *Gulmine J.V., Janissek P.R., Heise H.M., Akcelrud L.* Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering // *Polymer Degradation and Stability*. 2003. V. 79 (3). P. 385—397.
11. *Cramez Maria Clara, Oliveira Maria Jovita, Fakirov Stoyko, Crawford Robert James, Apostolov Anton Atanassov, Krumova Marina*. Rotationally molded polyethylene: Structural characterization by x-ray and microhardness measurements // *Advances in Polymer Technology*. 2001. V. 20 (2). P. 116—124.
12. *Hiejima Yusuke, Kida Takumitsu, Takeda Kento, Igarashi Toshio, Nitta Koh-hei*. Microscopic structural changes during photodegradation of low-density polyethylene detected by Raman spectroscopy // *Polymer Degradation and Stability*. Apr. 2018. V. 150. P. 67—72.
13. *Bray Don E., Vela John, Al-Zubi Raed S.* Stress and Temperature Effects on Ultrasonic Properties in Cross-Linked and High Density Polyethylene // *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2005. V. 127 (3). P. 220.

14. *Jia Dawei, Bourse G., Chaki S., Lacrampe M.F., Robin C., Demouveau H.* Investigation of Stress and Temperature Effect on the Longitudinal Ultrasonic Waves in Polymers // *Research in Nondestructive Evaluation*. Jan. 2014. V. 25 (1). P. 20—29.

15. *Adachi Keiichiro, Harrison Gilroy, Lamb John, North Alastair M., Pethrick Richard A.* High frequency ultrasonic studies of polyethylene // *Polymer*. 1981. V. 22 (8). P. 1032—1039.

16. *Tanaka Akira, Nitta K., Onogi S.* Ultrasonic velocity and attenuation of polymeric solids under oscillatory deformation: Apparatus and preliminary results // *Polymer Engineering and Science*. Aug. 1989. V. 29 (16). P. 1124—1130.

17. *Sahnoune Abdelhadi, Tatibouet Jacques, Gendron Richard, Hamel André, Piché Luc.* Application of Ultrasonic Sensors in the Study of Physical Foaming Agents for Foam Extrusion // *Journal of Cellular Plastics*. Sep. 2001. V. 37 (5). P. 429—454.

18. *Gomes F.P.C., Eng B.* Nonlinear ultrasonics for in-line quality monitoring of polymer processing methods // *McMaster University*. Oct. 2018. P. 21—100.