

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 5 / 2023, Vol. 15, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/30SAVN523.pdf>

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Макаров, К. Н. Пьезоэффекта в листовом и печатном ABS-пластике — материале моделей зданий при динамических воздействиях / К. Н. Макаров, Е. Е. Юрченко, Ю. А. Дмитриев, В. Е. Юрченко // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/30SAVN523.pdf>

For citation:

Makarov K.N., Yurchenko E.E., Dmitriev Yu.A., Yurchenko V.E. Piezoelectric effect in sheet and printed ABS plastic — a material for building models under dynamic influences. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(5): 30SAVN523. Available at: <https://esj.today/PDF/30SAVN523.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 691-46

Макаров Константин Николаевич

ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Профессор кафедры «Строительства и сервиса»
Доктор технических наук
E-mail: ktk100@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=133366

Юрченко Елена Евгеньевна

ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Доцент кафедры «Строительства и сервиса»
Кандидат технических наук
E-mail: wsonormalno@yandex.ru

Дмитриев Юрий Анатольевич

ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра
Кандидат химических наук
E-mail: adres11111111@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1079401

Юрченко Василиса Евгеньевна

ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Аспирант 1 курса
E-mail: sehunminhov@gmail.com

**Пьезоэффекта в листовом и печатном
ABS-пластике — материале моделей зданий
при динамических воздействиях**

Аннотация. В статье рассматриваются пьезоэлектрические явления в полимерных материалах, имеющих нечеткую кристаллическую симметрию, подобную структуре силикатного стекла. Диэлектрические потери в таких полимерах отсутствуют или являются минимальными, поэтому малополярные полимеры могут быть использованы в работах по моделированию колебаний, возникающих в зданиях и сооружениях.

Исследован пьезоэффект в диэлектриках из листового и печатного пластика сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирола. Динамические нагрузки создавались путем возбуждения колебаний звуковой частоты при помощи системы, состоящей из программного генератора

звуковых колебаний, усилителя низкой частоты мощностью с автономным питанием от аккумулятора и динамического громкоговорителя от электрофона.

Возникновение переменного электрического поля звуковой частоты измерено осциллографом на собранном лабораторном стенде, выявлено возникновение небольшой электродвижущей силы, идентифицируемой в виде переменного тока небольшой амплитуды, возникающего при динамической деформации моделей, амплитуда сигнала имеет порядок нескольких милливольт.

Установлено — при одинаковом материале моделей — пластике сополимере акрилонитрил-бутадиен-стироле, значения коэффициентов электромеханической связи для моделей, изготовленных по разным технологиям, отличаются незначительно. Вероятной причиной такого эффекта является более высокая плотность упаковки структурных элементов полимера в листовом изделии, получаемом методами экструзии из расплава или горячего прессования, по сравнению с изделием, получаемым печатью в более «мягких» условиях. Для постановки модельных экспериментов по изучению механических воздействий на различные объекты наиболее предпочтительным материалом будет листовая пластик сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол.

Ключевые слова: пьезоэффект в диэлектриках; модели зданий и сооружений; динамические воздействия; пластик сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирол

Введение

При воздействии механических сил или электрического поля в диэлектриках возникают прямой и, соответственно, обратный пьезоэлектрические эффекты, обнаруженные Пьером Кюри. Прямой пьезоэлектрический эффект заключается в образовании электрических зарядов под действием нагрузки, обратный — в деформации материала под действием внешнего электрического поля, что позволяет использовать диэлектрики в качестве преобразователей электрических колебаний в звуковые или ультразвуковые. Прямой пьезоэффект в диэлектриках, проявляющийся в возникновении переменного электрического поля звуковой частоты, может быть измерен при помощи осциллографа, поскольку имеет амплитуду сигнала порядка нескольких милливольт [1].

Причиной пьезоэлектрических явлений в полимерных материалах являются нечеткая кристаллическая симметрия (отсутствие центра симметрии) и особенности их внутренней структуры, которая подобна структуре силикатного стекла, являющегося не кристаллическим, а аморфным материалом, метастабильное состояние которого подобно состоянию переохлажденной жидкости. В такой структуре имеет место только ближний порядок расположения макромолекул полимера, охватывающий несколько молекулярных радиусов. Дальний порядок, который может простираться на весь объем твердого тела, отсутствует.

К обладающим пьезоэлектрическими свойствами (электроупругим) полимерным материалам относятся поливинилхлорид (ПВХ), полиметилметакрилат (органическое стекло), пластика сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирола (ABS) [2], использованный в нашем исследовании для изготовления малоразмерных моделей зданий (в том числе — с использованием технологии 3D-печати).¹ Электрические свойства данных материалов представлены в таблице 1.

¹ Портал проекта «3Dtoday». URL: <https://3dtoday.ru>.

Таблица 1

Электрические свойства электроупругих полимерных материалов (данные портала проекта «3Dtoday»)

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом×м	Тангенс угла диэлектрических потерь
ABS	2,9–3,0	$4 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{15}$	0,008–0,020
Полиметил-метакрилат	3,5–3,9	$10^{10} - 10^{12}$	0,02–0,06
Поливинилхлорид	3,2–4,0	$10^{10} - 10^{15}$	0,015–0,025

Источник ²

Диэлектрические свойства полимерного материала могут быть описаны при помощи модели дебаевской релаксации, в которой диэлектрическая проницаемость представляется в виде комплексной величины, содержащей действительную ϵ' и мнимую ϵ'' составляющие [3; 4]:

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + ((\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) / (1 + \omega^2 \times \tau^2)),$$

$$\epsilon'' = ((\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) / (1 + \omega^2 \times \tau^2)) \times \omega \times \tau,$$

где: ϵ_{∞} — диэлектрическая проницаемость на пределе высоких частот; ϵ_0 — статическая низкочастотная диэлектрическая проницаемость; ω — частота; τ — характерное время релаксации среды (дебаевская релаксация).

В реальных диэлектрических материалах, к которым относятся вышеуказанные полимеры, имеют место диэлектрические потери, которые являются следствием неспособности процесса поляризации макромолекул синхронно следовать изменениям осциллирующего приложенного электрического поля. Данная неспособность обусловлена конечным (иногда весьма значительным) временем дебаевской релаксации (τ), которое необходимо диполям большой молекулярной массы и сложной структуры для возвращения к своей первоначальной ориентации (поскольку возвращение к первоначальной ориентации не происходит мгновенно, вызываемая внешними воздействиями поляризация материала снижается по экспоненциальной зависимости от времени). Подобные явления наиболее характерны для полимеров, в структуре которых присутствуют полярные функциональные группы. При воздействии на них переменного электрического поля будет иметь место поглощение энергии поля и рассеивание ее в виде тепла.

Возможны случаи, когда время релаксации материала меньше или соизмеримо со скоростью изменения напряженности осциллирующего электрического поля. В наибольшей степени это относится к неполярным или малополярным полимерам, не содержащим полярные группы.

Диэлектрические потери в таких полимерах отсутствуют или являются минимальными, поэтому малополярные полимеры могут быть использованы в работах по моделированию колебаний, возникающих в зданиях и сооружениях. Например, в работе [5] для испытания моделей зданий использовался прямой пьезоэффект в неполярном полимере ABS на низких частотах электрического поля в диапазоне от 20 до 700 Гц и на частоте 1 000 Гц. В более раннем исследовании по аналогичной тематике [6] применялись полярные полимеры полиметилметакрилат и ПВХ. В данных работах наблюдались особенности поведения полярных и неполярных полимеров в электрических полях различной частоты. Очевидной причиной зависимости поведения полимеров разной природы от частоты приложенного электрического поля является различная реакция отдельных структурных групп на скорость изменения знака электрического потенциала (к таким группам могут быть отнесены диполи, ионизированные макрорадикалы, а

² Электрические свойства полимерных материалов // Сайт научно-технического общества «Альвис». URL: <http://www.kaprolon-alvis.ru/info/electro.html> (дата обращения: 23.11.2023).

также более элементарные единицы структурной организации –межатомные связи и электронные оболочки атомов).

Применение полей низкой частоты на лабораторном стенде позволяло снизить диэлектрические потери даже в случае полярных полимеров, поскольку благодаря достаточно длительному периоду колебаний поля у диполей и других структурных групп материала было достаточно времени для того, чтобы успевать ориентироваться по направлению поля до смены его направления. В случае неполярных полимерных диэлектриков, в структуре которых практически отсутствуют ионизированные группы и диполи, единственными возможными видами поляризации являются электронная поляризация и, в некоторой степени, атомная. Эти два вида поляризации связаны с практически мгновенными изменениями электронных оболочек и/или межатомных связей, поэтому диэлектрические свойства неполярных полимеров не зависят от частоты переменного тока. Их диэлектрическая проницаемость является практически постоянной величиной, значение которой составляет около 3.

Указанная особенность неполярных полимерных диэлектриков позволяет считать их наиболее удачными материалами для моделирования механических воздействий на различные конструкции.

Методы используемые в исследовании

В настоящей работе полимер ABS применен при изучении механического воздействия на малоразмерные модели зданий из пластика ABS (рисунок 1 — фото авторов данной статьи). Динамические нагрузки создавались путем возбуждения колебаний звуковой частоты при помощи системы, состоящей из программного генератора звуковых колебаний (Frequency Generator) на платформе с операционной системой Android, усилителя низкой частоты мощностью 5 Ватт (TDA 2003) с автономным питанием от аккумулятора (напряжение 12 Вольт, емкость 7,5 Ампер-часов) и динамического громкоговорителя от электрофона «Аккорд-203» с динамической головкой 4-ГД-35.

На корпус вертикально установленного громкоговорителя (лицевой поверхностью вверх) помещалась, отделенная бумажной прокладкой емкость с песком, в которую была помещена модель здания. Возникающий в результате пьезоэффекта электрический потенциал снимался с поверхности модели при помощи двух пар гибких медных электродов. Электроды через экранированные микрофонные кабели подключались к входам двухканального малошумящего микрофонного усилителя с автономным питанием (напряжение 2×12 вольт). Входное и выходное сопротивление усилителя — 47 кОм. Выход микрофонного усилителя подключался к линейному входу звуковой карты переносного компьютера. Для визуализации электрических колебаний использовалась программа SpectraLab v.4.32.16 на платформе Windows 7.

Результаты экспериментов

В результате экспериментов, выполненных на данном лабораторном стенде, было выявлено возникновение небольшой электродвижущей силы (э.д.с.), идентифицируемой в виде переменного тока небольшой амплитуды, который возникал при динамической деформации моделей. В таблице 2 (измерения произведены авторами) представлены фактические значения деформаций моделей и напряжений, возникающих в результате пьезоэффекта.

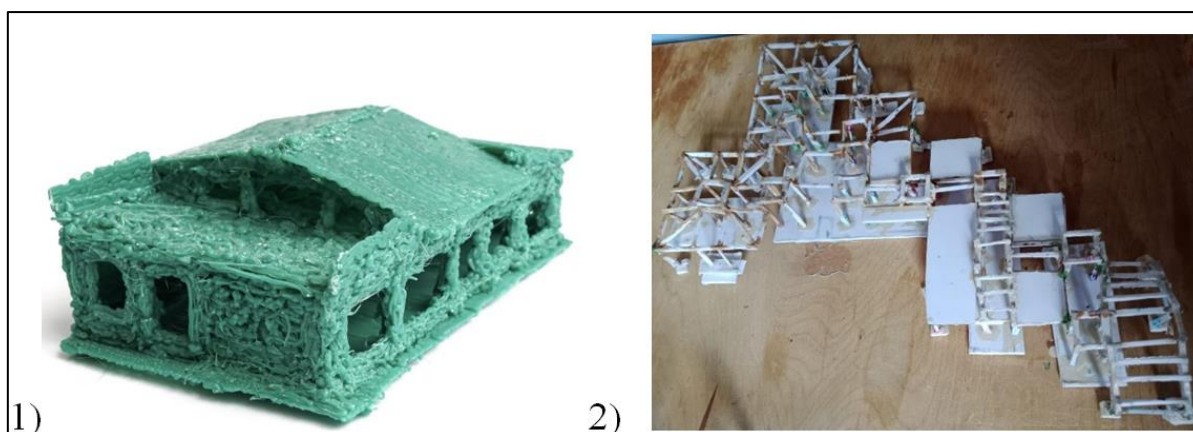


Рисунок 1. Малоразмерные модели зданий из пластика ABS: 1 — здание школы (3D-печать, масштаб 1:200), 2 — здание туристической базы (листовой пластик, масштаб 1:200) (фотографии сделаны авторами)

Таблица 2

Характеристики напряжений и перемещений моделей

Характерное время колебаний (1/4 часть периода T), с	Генерируемая частота f, Гц	Регистрируемое напряжение U _с (по левому каналу микрофонного усилителя), мВ	Перемещение модели Δх _с , мм
Модель здания школы (3D-печать)			
0,00025	1 000	1,00	0,0006
0,00250	100	1,00	0,5750
0,00420	60	1,00	0,4000
0,00625	40	0,61	0,1000
Модель здания туристической базы (листовой пластик)			
0,00035	700	2,58	0,0081
0,00050	500	2,58	0,0055
0,00125	200	2,30	0,0112
0,00312	80	2,57	0,0520

Составлено авторами

Обсуждение результатов

В процессе экспериментов имела место корреляция частоты возникающего тока с частотой приложенного внешнего механического воздействия. Амплитуда э.д.с. зависела от амплитуды механических колебаний моделей, достигая максимальных значений вблизи области резонанса вынужденных механических колебаний. Количественно связь между механическими и электрическими колебаниями может быть установлена при помощи передаточного коэффициента значения амплитуды генерируемой э.д.с. к линейным деформациям, один из алгоритмов расчета которого приведен в работе [5].

Наблюдаемый эффект может быть квалифицирован как электростатическая индукция или электроупругость [6], вызываемая вынужденными механическими колебаниями. Подобные результаты были получены в более ранней работе³ [7], где аналогичный, но более слабый, эффект имел место при свободных механических колебаниях модели из оргстекла в виде длинной консоли, нагруженной на конце сосредоточенной силой. Частота наведенной

³ Юрченко Е.А. Кинематический метод расчета зданий при поперечных колебаниях и их системный анализ: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону: РГСУ, 2013. — 24 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/kinematicheskii-metod-rascheta-zdaniy-pri-poperechnykh-kolebaniyakh-i-ikh-sistemnyi-analiz/read> (дата обращения: 23.11.2023).

переменной э.д.с. соответствовала частоте собственных резонансных свободных колебаний консоли.

Для количественной оценки величины пьезоэффекта, возникающего в деформируемых моделях, в настоящей работе были использованы представления, изложенные в работах [8; 9]⁴ и первоначально относящиеся к пьезокерамике. Согласно [8], в качестве количественной характеристики пьезоэффекта может быть рассмотрен пьезомодуль h (пьезоэлектрическая постоянная деформации), представляющий собой отношение возникающего электрического напряжения U_e к величине создаваемой деформации Δx_e (табл. 2): $h = U_e/\Delta x_e$.

Для модели здания школы, выполненной методом 3D-печати, пьезомодуль на частоте 100 Гц составил: $h = U_e/\Delta x_e = 1,0/0,5750 = 1,74$ В/м.

Для модели здания турбазы, выполненной из листового ABS, пьезомодуль на частоте 80 Гц составил: $h = U_e/\Delta x_e = 2,57/0,0520 = 49,42$ В/м.

Таким образом, значение пьезоэлектрической постоянной деформации h при испытании моделей составляет от 1,74 до 49,42 В/м, что намного меньше аналогичного показателя для кварца, который равен $4,9 \times 10^9$ В/м. Наиболее вероятной причиной различающихся значений h для моделей школы и турбазы можно считать различные технологии их изготовления.

Согласно [8], коэффициент электромеханической связи K_p между механическими колебаниями и вызываемым ими пьезоэлектрическим откликом может быть рассчитан по формуле:

$$K_p = ((\eta^2 - \beta^2) \times (1 - (f_r^2/f_a^2)) / (2 \times (1 + \beta)))^{0,5},$$

где f_r , f_a — резонансная и антирезонансная частоты, Гц, соответственно; η — наименьший положительный корень частотного уравнения, определяемый в зависимости от значения коэффициента Пуассона β по таблице 1.2 из [8], β — коэффициент Пуассона, определяемый по таблице 1.1 из [8] в зависимости от значения коэффициента $\beta = f_{01}/f_r$, где f_{01} — частота первого обертона (Гц) при частоте вибрации, константе ангармонизма и резонансной частоте f_r , определенной амплитудным методом.

Для изучаемых в настоящей работе моделей были установлены следующие значения коэффициентов электромеханической связи (на основе результатов, приведенных в таблице 2, данных [8] и результатов расчетов при помощи онлайн-калькулятора⁵):

Для модели здания школы:

$$K_p = ((2,11^2 - 0,4^2) \times (1 - (100^2/1000^2)) / (2 \times (1 + 0,4)))^{0,5} = 1,232,$$

(при $\beta = f_{01}/f_r = 200/100 = 2$, где $f_{01} = 200$ Гц при частоте вибрации 100 Гц, константе ангармонизма 0 и $f_r = 100$ Гц; $\eta = 2,11$ при $\beta = 0,4$ по таблице 1.2 из [8], $f_a = 1000$ Гц).

Для модели здания турбазы:

$$K_p = ((2,11^2 - 0,4^2) \times (1 - (80^2/200^2)) / (2 \times (1 + 0,4)))^{0,5} = 1,138,$$

(при $\beta = f_{01}/f_r = 160/80 = 2$, где $f_{01} = 160$ Гц при частоте вибрации 80 Гц, константе ангармонизма 0 и $f_r = 80$ Гц; $\eta = 2,11$ при $\beta = 0,4$ по таблице 1.2 из [8], $f_a = 200$ Гц).

⁴ Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С. Датчики. Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука ТЕХНОСФЕРА. Москва 2012.

⁵ Пьезоэлемент // Сайт «Инженерные решения». URL: <https://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/#11>.

Выбор антирезонансной частоты осуществлялся по максимальному току, согласно [10]. Значения максимального тока в эксперименте (табл. 2) соответствовали частоте 100 Гц для модели здания школы (при минимальном токе на частоте 40 Гц) и частоте 80 Гц для модели здания турбазы (при минимальном токе на частоте 200 Гц).

Выводы

Проведенный эксперимент показывает зависимость амплитуды э.д.с. моделей из пластика ABS от амплитуды механических колебаний моделей, позволяя определить области резонанса.

Листовые изделия пластика ABS отличает более высокая плотность упаковки структурных элементов полимера, получаемом методами экструзии из расплава или горячего прессования, чем изготовленная 3D-печатью.

Результаты испытаний и вычислений пьезоэлектрической постоянной деформации h показывают, что рекомендуемым материалом для изготовления моделей является листовая пластик ABS, показывающий значения пьезомодуля большие, чем пластик, полученный 3D-печатью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М. Радиоисвязь. 1989. 288 с.
2. Kihlander J. Finite Element simulation of vibrating plastic components. Mechanical Engineer — Solid Mechanics. 2013. ISRN: LIU-IEI-TEK-A-13/01572-SE.
3. Zulkifli A. Polymer Dielectric Materials // Dielectric Material. In Tech. 2012. DOI 10.5772/50638. <https://www.intechopen.com/chapters/39574>.
4. Ailin Gao, Fangwei Zhao, Fan Wang, Guangfa Zhang, Shuai Zhao, Jian Cui, Yehai Yan. Highly conductive and light-weight acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer/reduced graphene nanocomposites with segregated conductive structure // Composites Part A. Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 122. No 7. P. 1–7.
5. Макаров К.Н., Юрченко Е.Е., Юрченко В.Е. Комплексное моделирование зданий и сооружений для предотвращения резонансного эффекта при динамических воздействиях // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2023. № 1(276). С. 41–46.
6. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость. АН УССР Институт механики. Киев. Наукова думка. 1989. 280 с.
7. Пересыпкин Е.Н., Юрченко Е.Е., Юрченко Е.А. — Кинематический метод системного анализа конструкций зданий. Сочи. Вестник Сочинского государственного университета туризма и курортного дела. Научный журнал. ISSN: 1996-9005. N 1(19), 2012. — 235–243 с.
8. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. Москва. Техносфера. 2006. 632 с. ISBN 5-94836-100-4.

9. Васильев, В.А. Интеллектуальные датчики, сети датчиков и цифровые интерфейсы / В.А. Васильев, П.С. Чернов // Измерительная техника. — 2012. — № 10. — С. 3–6. — EDN PJCCVZ.
10. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Определение частот резонанса и антирезонанса пьезокерамического пластинчатого преобразователя на основании частотной характеристики его входного электрического импеданса // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Приборостроение и информационно-измерительные технологии. 2018. № 2. С. 56–61.

Makarov Konstantin Nikolaevich

Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: ktk100@mail.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=133366

Yurchenko Elena Evgenievna

Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: wsonormalno@yandex.ru

Dmitriev Yuri Anatolievich

Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: adres1111111@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1079401

Yurchenko Vasilisa Evgenievna

Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: sehunminhov@gmail.com

Piezoelectric effect in sheet and printed ABS plastic — a material for building models under dynamic influences

Abstract. The article discusses piezoelectric phenomena in polymer materials that have fuzzy crystalline symmetry, similar to the structure of silicate glass. Dielectric losses in such polymers are absent or minimal, so low-polarity polymers can be used in modeling vibrations that occur in buildings and structures. The piezoelectric effect in dielectrics made from sheet and printed ABS plastic has been studied. Dynamic loads were created by exciting sound frequency oscillations using a system consisting of a software sound vibration generator (Frequency Generator) on the Android OS platform, a 5 W low-frequency amplifier (TDA 2003) with autonomous battery power (voltage 12 volts, capacity 7, 5 ampere-hours) and a dynamic loudspeaker from an Accord-203 electrophone with a 4-GD-35 dynamic head. The appearance of an alternating electric field of sound frequency was measured by an oscilloscope on an assembled laboratory bench, the appearance of a small electromotive force (emf) was identified, identified in the form of an alternating current of small amplitude, arising during dynamic deformation of the models; the signal amplitude is on the order of several millivolts. It has been established that, given the same material of the models — ABS plastic, the values of the electromechanical coupling coefficients for models manufactured using different technologies differ slightly. The likely reason for this effect is the higher packing density of the structural elements of the polymer in a sheet product produced by melt extrusion or hot pressing methods, compared to a product produced by 3D printing under “milder” conditions. For setting up model experiments to study mechanical effects on various objects, the most preferred material would be ABS sheet.

Keywords: piezoelectric effect in dielectrics; models of buildings and structures; dynamic effects; sheet and printed ABS plastic