

---

## Особенности строения пьезоэлектрических композитов связности 1-3

*К.А. Гореленко, А.Ю. Малыхин, А.В. Скрылёв*

*Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ*

**Аннотация:** В результате проделанной работы определены особенности строения пьезокерамических композитов связности 1-3. Из различных возможных способов и материалов для электродов пьезокомпозитов выбран единственный, оптимально подходящий для использования в устройствах направленного ультразвука.

**Ключевые слова:** пьезокерамика, пьезокомпозит, композит 1-3, пьезоэлектричество, ультразвук.

### Введение

В настоящее время устройства, в основе которых лежат пьезокомпозиты, находят широкое применение. В литературе встречаются упоминания композитов связности 1-3 и 2-2 [1-3]. Существующие способы получения таких элементов, как правило, не учитывают степень влияния электродов на их электрофизические и механические характеристики ввиду малой толщины токопроводящего покрытия.

В данной работе исследованы особенности строения 1-3 пьезокомпозитов, а именно – влияние конфигурации токопроводящего покрытия на некоторые характеристики. Рассматриваемый композит представляет собой упорядоченный набор пьезокерамических стержней с квадратным сечением, регулярно распределенных в полимерной матрице. В свою очередь, матрица является гетерогенной системой, состоящей из полимерного связующего и функциональных добавок в виде пластификаторов и стеклокерамических сфер размером 10-150 мкм. При изготовлении пьезокерамических стержней использовался метод dice-and-fill, описанный в [4-6]. Структура исследуемого композита позволяет достичь высокой степени анизотропии скорости звука в пьезокерамических стержнях, открывая возможность для применения в направленных источниках и приёмниках ультразвуковых колебаний. Таким образом, задача выбора оптимальной конфигурации токопроводящего покрытия является актуальной.

В ходе выполнения работы исследованы различные способы нанесения покрытий на пьезокомпозит: вакуумно-ионное напыление, химическое осаждение, приклеивание графитовых и медных крышек. Каждый из рассмотренных способов имеет собственные достоинства и недостатки.

### Эксперимент

Выбор активной составляющей пьезокомпозитов не ограничивается каким-либо материалом или группой материалов и может варьироваться в зависимости от области применения или параметров среды. В данной работе использовались пьезокерамические элементы, изготовленные из материала ПКП-12. Шлифованный образец разрезался на дисковой пиле на упорядоченную матрицу, после чего образовавшиеся пазы заливались полимером с функциональными добавками (Рис. 1).

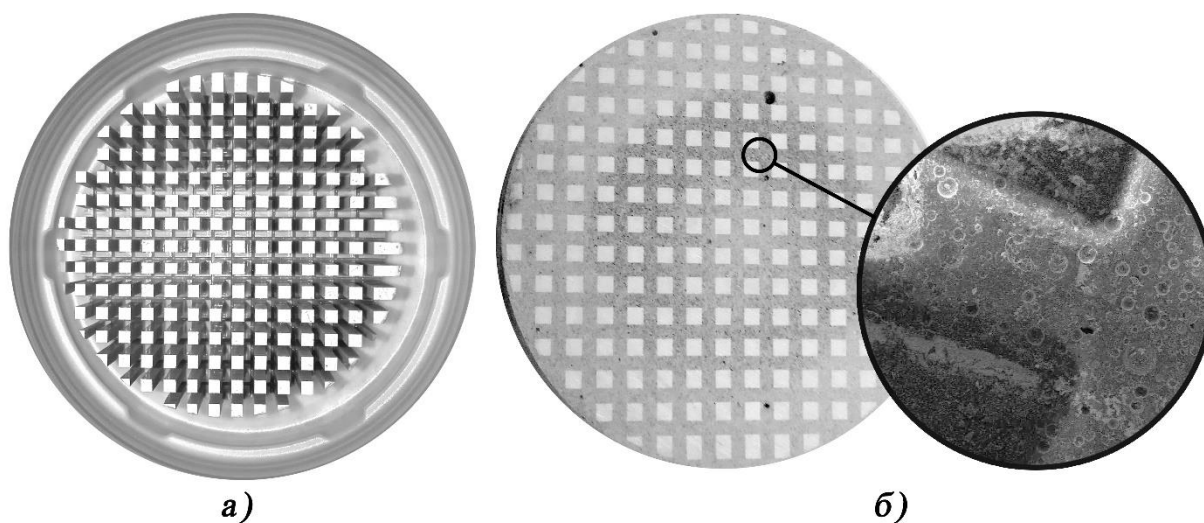


Рис.1 – внешний вид пьезокомпозита связности 1-3: а) разрезанная заготовка, б) залитая полимером заготовка с увеличенным фрагментом

На шлифованные поверхности полученного композита наносили электропроводные покрытия. Полученные методами химического осаждения меди и никеля, а также напыления меди и никеля оказались непрочными и их целостность нарушалась в процессе эксперимента: в процессе поляризации и

измерения ёмкости элементов были заметны разрывы и царапины на поверхности (Рис.2).

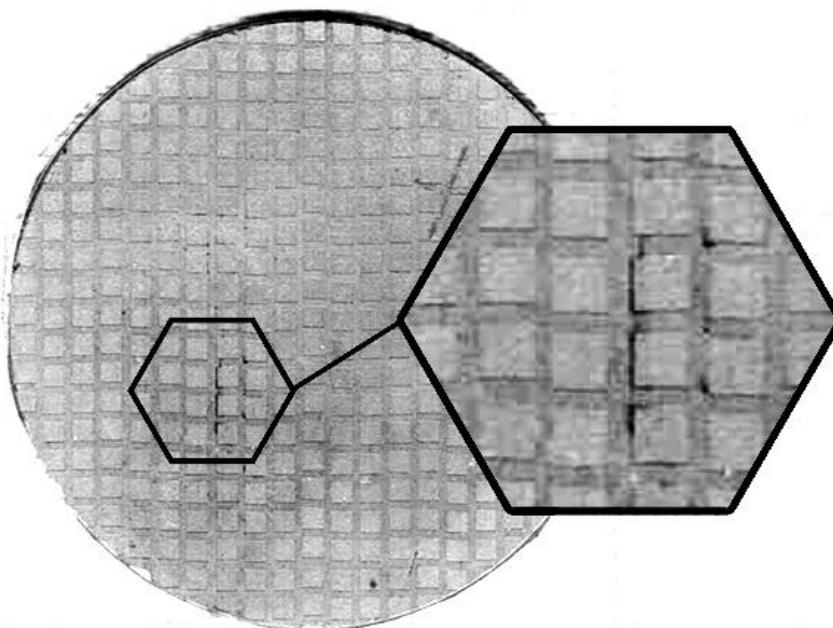


Рис. 2 – Обнаруженные дефекты электродов, полученных методами химического осаждения металлов и вакуумного ионного напыления

В связи с необходимостью получения надёжного и прочного электропроводного покрытия рассматривались варианты применения листовых металлов (медь, никель), а также графита.

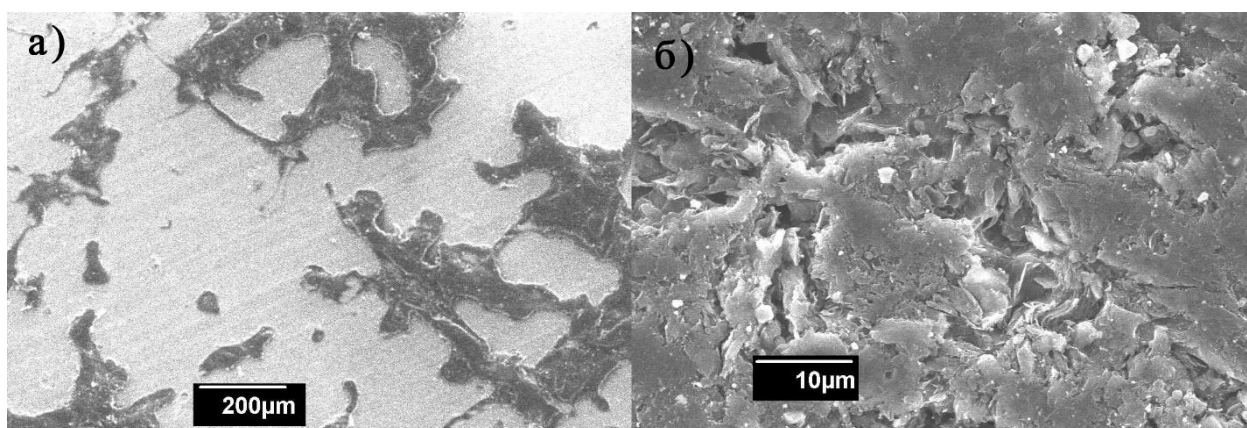


Рис.3 – микроструктура поверхности: а) меди б) графита

На рис.3 представлены изображения структуры поверхности меди и графита, шлифованные алмазным кругом с зернистостью 60 мкм, полученные с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM. На

поверхности меди отчётливо видны следы клея, однако сама поверхность, несмотря на шлифовку, является достаточно гладкой. С этим связан процесс отслаивания электродов во время эксплуатации композита. Поверхность графита, в свою очередь, является более развитой и имеет впадины и неровности размером до 50 мкм. При использовании токопроводящих клеевых составов наличие этих неровностей приводит к лучшей адгезии композита с электродом. Таким образом, использование графитовых пластин целесообразно.

Для дальнейших исследований выбран графит отечественного производства с плотностью  $1,83 \text{ г/см}^3$  и удельным сопротивлением  $12,5 \text{ мКОм}\cdot\text{м}$ . На dilatометре Linseis L76 измерены коэффициенты температурного расширения графита и образцов пьезокерамики ПКП-12: в поляризованном и неполяризованном состояниях. Измерения проводились в воздушной среде на образцах размером  $15 \times 3 \times 3 \text{ мм}$ , скорость подъёма температуры составляла  $2^\circ/\text{мин}$ .

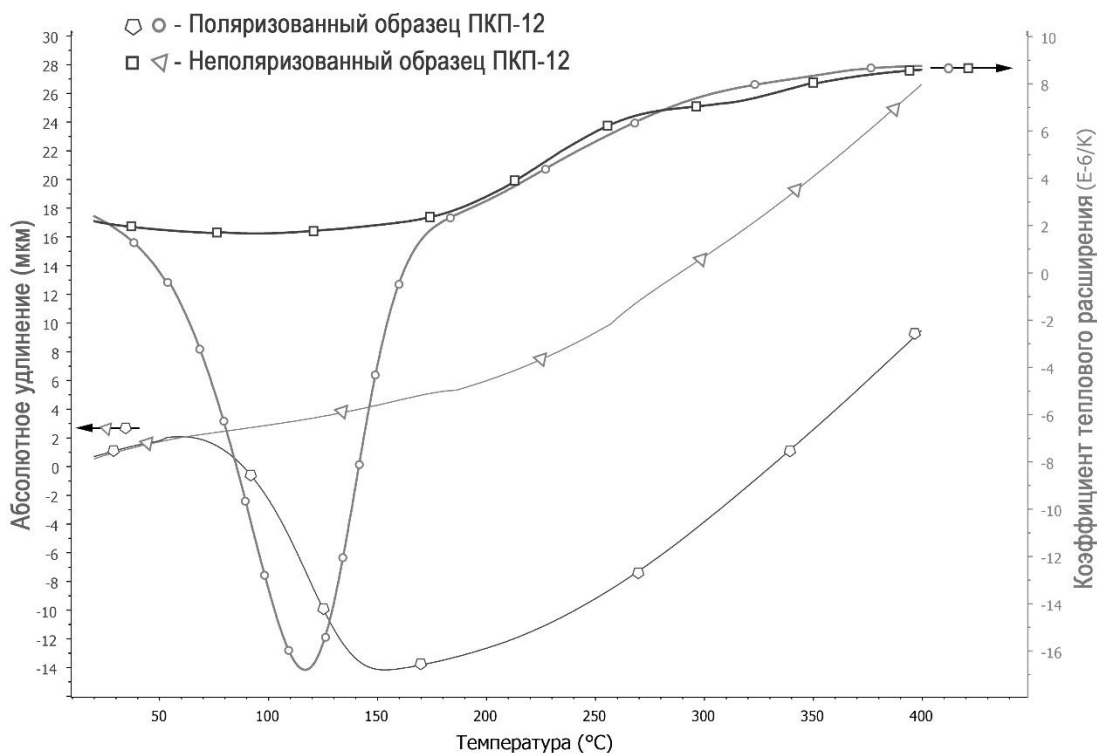


Рисунок 4 – результаты дилатометрических испытаний образцов поляризованной и неполяризованной пьезокерамики в диапазоне температур от 20 до 400°

Как следует из рисунка 4 у неполяризованного образца ярко выражена лишь одна температурная область, где происходит уменьшение скорости изменения относительной деформации с ростом температуры от 80 до 170°. Данное поведение согласуется с результатами [7], где исследован коэффициент теплового расширения в области фазового перехода в керамике на основе ЦТС. Учитывая, что образец при поляризации деформировался за счет обратного пьезоэффекта или за счет электрострикционного эффекта, важен лишь качественный характер температурной зависимости, а именно температура макроскопической деполяризации образца. Как следует из графика температурной зависимости относительной деформации поляризованного образца, температура, при которой поведение кривой становится аналогичным поведению кривой для неполяризованного образца, равна 200°С. То есть до данной температуры образец сохраняет анизотропное состояние при том, что  $T_m \approx 160^\circ$ .

Аналогичные измерения проведены для выбранного графита. Результаты приведены на рис. 5.

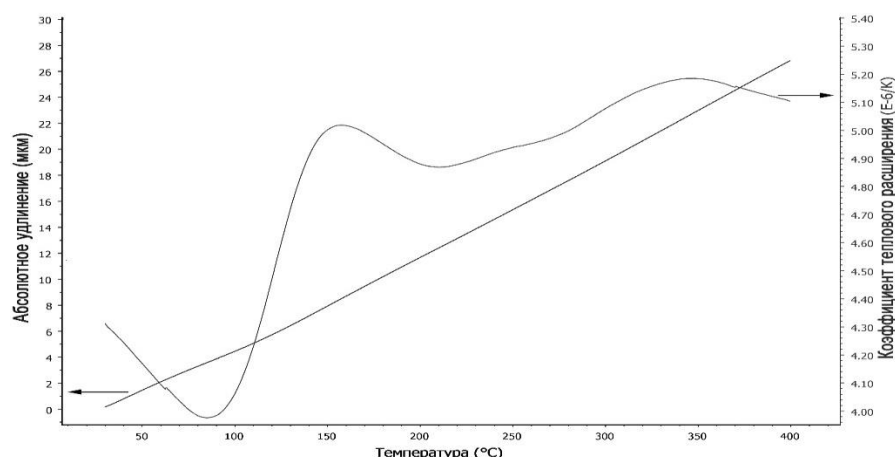


Рис. 5 – Результаты дилатометрических испытаний образца графита



---

В рабочем температурном диапазоне керамики графит имеет практически линейные зависимости абсолютного удлинения и коэффициента теплового расширения, что говорит о потенциальной пригодности в качестве электропроводящего покрытия пьезокомпозитов связности 1-3.

### Литература (References).

1. Topolov V. Yu., Bowen C.R., Bisegna P. Piezo-active composites. Microgeometry – sensitivity relations. Cham: Springer Internat. Publ. Switzerland, 2018. 179 p. Bowen C.R., Topolov V.Yu., Isaeva A.N., Bisegna P. CrystEngComm. 2016. Vol. 18. pp. 5986–6001.
2. Topolov V. Yu., Bowen C.R., Isaeva A.N., Panich A.A. Phys. Stat. Sol. A. 2018. Vol. 215, N 1. pp. 1700548–12 p.
3. Bowen L. J. and French K. W. "Fabrication of piezoelectric ceramic/polymer composites by injection molding," ISAF '92: Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Greenville, SC, USA, 1992, pp. 160-163, doi: 10.1109/ISAF.1992.300651.
4. Smith W. A. and Auld B. A. "Modeling 1-3 composite piezoelectrics: thickness-mode oscillations," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 38, no. 1, pp. 40-47, Jan. 1991, doi: 10.1109/58.67833.
5. Howarth T. R. and Ting R. Y. "Electroacoustic evaluations of 1-3 piezocomposite SonoPanel/sup TM/ materials," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 47, no. 4, pp. 886-894, July 2000, doi: 10.1109/58.852071.
6. Gentilman R. et al. "SonoPanel 1-3 piezocomposite hydrophone-actuator panels," 'Challenges of Our Changing Global Environment'. Conference



Proceedings. OCEANS '95 MTS/IEEE, San Diego, CA, USA, 1995, pp. 2032-2037 vol.3, doi: 10.1109/OCEANS.1995.528890.

7. Kallaev S.N., Gadzhiev G.G., Kamilov I.K., Omarov Z.M., Sadykov S.A. Reznichenko L.A. Thermal properties of PZT-based ferroelectric ceramics. Physics of the Solid State. 2006; 48(6). pp. 1169-1170