

## Электропроводящие композиты на основе фуранового аминопласта, полученного из возобновляемого растительного сырья

*Д.В. Токарев, В.П. Кашипарова*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск*

**Аннотация:** Проводящие полимерные композиционные материалы были успешно получены с использованием в качестве связующего фуранового аминопласта, синтезированного на основе побочного продукта переработки растительной биомассы в 5-гидроксиметилфурфурол – гуминовой смолы и меламина (HumMel). Композиты были изготовлены с применением в качестве наполнителя различных видов графита (природный (NG), коллоидный (CG)). Содержание наполнителя варьировали в пределах 30–70 % масс. Показано, что проводимость композиционного материала растет с увеличением содержания электропроводящего наполнителя, а его прочность изменяется в обратном порядке. Наилучшую проводимость (контактное сопротивление  $0,011 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) показал полимерный композит на основе NG, содержащий 30 % аминопласта. Высокую прочность (55,2 и 38,6 МПа на сжатие и изгиб, соответственно) продемонстрировал композит с CG, содержащий 70 % масс. полимерного связующего. Полимерный композит HumMel-NG-50 по электропроводности ( $0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) и механической прочности (25,7 и 25,3 МПа на сжатие и изгиб, соответственно) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к аналогичным материалам для изготовления биполярных пластин топливных элементов.

**Ключевые слова:** проводящий полимерный композит, фурановый аминопласт, углеродный наполнитель, биполярные пластины, топливный элемент.

Топливные элементы (ТЭ) в настоящее время являются достойной альтернативой энергетическим технологиям, основанным на невозобновляемом ископаемом сырье, таком, как нефть, газ и уголь. Технология ТЭ быстро развивается в сфере автомобильного транспорта, беспилотных летательных аппаратов, а также неподвижных и мобильных энергетических устройств [1, 2]. Наиболее перспективными ТЭ являются устройства с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ), которые преобразуют химическую энергию топлива в электрическую, обеспечивая практически нулевой уровень вредных выбросов при высокой эффективности. Водородный ПОМТЭ может вырабатывать энергию с большей плотностью мощности, при этом практически не оказывая отрицательного влияния на окружающую среду, так как основным

продуктом, образующимся в результате окисления водородного топлива, является вода [3].

Одним из основных элементов ПОМТЭ, от которого, зависит эффективность его работы, являются биполярные пластины (БП). Традиционно БП изготавливаются либо из металла (например, титан, нержавеющая сталь), либо графита. Перечисленные материалы имеют как достоинства, так и недостатки. Самый существенный недостаток металлических БП – подверженность коррозии, а графитовых – хрупкость [4]. В последнее время большую популярность в качестве материалов для БП приобрели проводящие полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые сочетают хорошую механическую прочность и достаточно высокую электропроводность, а также они технологичны в изготовлении и относительно недороги [5]. ПКМ получают путем смешения полимерного связующего с углеродными проводящими наполнителями, такими как углеродные волокна [6], нанотрубки [7], графит и сажа [8]. В качестве полимерных связующих используются как термопластичные, так и термореактивные смолы [9], однако большинство из них изготавливаются на основе невозобновляемого ископаемого сырья. Производство и утилизация этих полимеров увеличивает нагрузку на окружающую среду, нарушает углеродный баланс. Истощение ископаемых ресурсов, таких как нефть и газ, ставит на повестку дня вопросы их замены возобновляемыми ресурсами, из которых самой доступной является растительная биомасса [10]. В связи с этим большой интерес как метод «зеленой химии» представляет получение полимерных связующих из возобновляемого растительного сырья и их использование при изготовлении ПКМ для БП [11].

Ранее нами были получены фурановые аминокласты на основе продукта переработки растительной биомассы – 5-гидроксиметилфурфуrolа (5-ГМФ), а также побочного продукта этого синтеза – гуминовых олигомеров

---

– и азотсодержащих сомономеров (меламин, карбамид) [12]. Синтезированные смолы 5-ГМФ–меламин (HmfMel), гумины–меламин (HumMel) и 5-ГМФ–карбамид (HmfCarb), гумины–карбамид (HumCarb) показали достаточно высокую термостойкость и механическую прочность. Также были изготовлены электропроводящие композиты с применением в качестве полимерной матрицы побочного продукта переработки фруктозы, полученной в результате гидролиза инулина, в 5-ГМФ – гуминовых олигомеров, а в качестве наполнителя природного (NG) и коллоидного графита (CG) [13]. Композиты «Hum-NG» и «Hum-CG», содержащие не менее 90 % масс электропроводящего наполнителя, показали хорошую электропроводность, однако их механическая прочность была недостаточной и не превышала 18,4 МПа и 21,4 МПа на изгиб и сжатие соответственно, при требовании к композитам для БП не менее 25 МПа [13]. Поэтому в настоящей работе была исследована возможность изготовления токопроводящих термостойких полимерных композиционных материалов на основе достаточно дешевого, но показавшего хорошие механические и термические свойства, аминопласта на основе гуминов и меламина (HumMel), и различных видов графита (NG, CG).

### Материалы и методы

Фурановый аминопласт HumMel синтезировали по ранее разработанной методике [12]. Графит (природный и коллоидный) приобретали у ГК «МеталлЭнергоХолдинг».

Композиционные материалы на основе гуминов получали по методике, описанной в [12]. Полученные композиты были обозначены «HumMel-G-X», где G-вид графита (NG-природный графит, CG-коллоидный графит) X – содержание наполнителя в композите (% масс.)

Исследование механических свойств образцов композитов проводили на универсальной испытательной машине РЭМ 20 (Метротест, Россия) согласно методике, приведенной в работе [13]. Образцы представляли собой цилиндры ( $h = 20$  мм,  $d = 10$  мм) при проведении испытаний на сжатие и прямоугольные пластины ( $50$  мм× $12$  мм× $5$  мм) при исследовании прочности на изгиб.

Образцы для определения межфазного контактного сопротивления также были изготовлены в виде прямоугольных пластин ( $50$  мм× $10$  мм× $5$  мм). Испытания проводили по методике, описанной в работах [13, 14].

### Обсуждение результатов

Основная цель данной работы состояла в исследовании возможности получения проводящих полимерных композитов для изготовления биполярных пластин низкотемпературных ТЭ с использованием термостойкого фуранового аминопласта «гумины–меламин» (HumMel), полученного на основе возобновляемого растительного сырья. Различные виды графита (NG, CG) были использованы в качестве электропроводящих наполнителей, содержание последних варьировали в пределах 30-70 % масс. Зависимость механических свойств образцов (прочность на сжатие и изгиб) от содержания углеродного наполнителя представлено в табл. 1. Установлено, что прочность полимерного композита растет с увеличением содержания связующего. Это связано с тем, что частицы наполнителя могут быть связаны в композит только при определенном количестве смолы, достаточном для покрытия их поверхности. Поэтому с увеличением содержания полимерного связующего уменьшается пористость композита и растет его прочность [15, 16]. Прочность композитов на основе коллоидного графита выше, чем материалов, изготовленных с применением в качестве наполнителя природного графита (табл.1). Это связано как с меньшими размерами, так и с

---

формой частиц коллоидного графита, близкой к сферической, и, как следствие, более равномерным их распределением в матрице связующего.

Таблица № 1

Межфазное контактное сопротивление, прочность композитов на основе связующего HumMel при сжатии и изгибе

№, п/п	Композит	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Контактное сопротивление,* Ом·см <sup>2</sup>
1	HumMel-NG-30	33,1	32,0	0,071
2	HumMel-NG-40	29,8	28,2	0,047
3	HumMel-NG-50	25,7	25,3	0,022
4	HumMel-NG-60	22,6	22,0	0,018
5	HumMel-NG-70	18,8	19,1	0,011
6	HumMel-CG-30	55,2	38,6	0,084
7	HumMel-CG-40	50,0	34,4	0,076
8	HumMel-CG-50	44,7	29,8	0,052
9	HumMel-CG-60	38,2	26,7	0,041
10	HumMel-CG-70	33,6	24,0	0,035

Примечание: \*определено при нагрузке 200 Н·см<sup>-2</sup>.

В то же время, независимо от вида графита прочность на сжатие образцов, HumMel-G-X практически линейно растет при увеличении содержания гумино-меламиновой смолы от 30 до 70 % масс. Более существенно увеличивается прочность композитов с NG – в 1,75 раза, по сравнению с композитами на основе CG (рост прочности на сжатие в 1,65 раза).

Полученные композиты продемонстрировали аналогичную зависимость прочности на изгиб от содержания полимерного связующего. Однако для материалов как на основе NG, так и CG рост прочности на изгиб при увеличении содержания гумино-меламиновой смолы от 30 до 70 % масс при был примерно одинаковым в 1,6 раза.

При измерении контактного сопротивления прикладываемые усилия варьировались в интервале 20–200 Н·м<sup>-2</sup>. Межфазные контактные сопротивления, зарегистрированные при максимальной нагрузке 200 Н·м<sup>-2</sup>, приведены в табл. 1. С увеличением нагрузки закономерно наблюдается снижение межфазного контактного сопротивления, что связано с увеличением площади контакта (табл. 1). Согласно полученным данным, композиты на основе NG показали более высокую электропроводность, чем материалы с CG (табл.1). Это связано степенью дисперсности и формой частиц наполнителя: чешуйчатые частицы NG лучше контактируют друг с другом, чем более мелкие (до 4 мкм) частицы CG, при одинаковом количестве связующего. Эффект обусловлен снижением способности частиц наполнителя, в данном случае CG, образовывать проводящий кластер в полимерной матрице и увеличением вклада контактного сопротивления между частицами. Следует отметить, что при увеличении содержания связующего до 60 % масс. и более, независимо от вида графита, наблюдается резкий рост межфазного контактного сопротивления как для композитов с NG (до 0,047 Ом·см<sup>2</sup>), так и для композитов с CG (до 0,076 Ом·см<sup>2</sup>) (табл. 1). Такая электропроводность не удовлетворяет требованиям, предъявляемым по этому параметру к БП для ПОМТЭ.

На основании проведенных исследований физико-механических свойств композитов, изготовленных на основе фуранового аминокласта NumMel, полученного из возобновляемого растительного сырья, лучшим для изготовления БП является материал, содержащий 50 % масс. природного графита (табл. 1).

### **Выводы**

Синтезированные в работе полимерные композиты содержат в качестве связующего фурановый аминокласт, полученный на основе побочного продукта переработки углеводов биомассы в 5-ГМФ и меламина, а качестве

---

электропроводящего наполнителя использованы различные виды графита (природный, коллоидный). Композиты, содержащие 50-70 % масс. графита, показали достаточно высокую электропроводность, а материалы, содержащие 40-70 % масс. связующего хорошую механическую прочность. Полимерный композит NumMel-NG-50 по электропроводности ( $0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) и механической прочности (25,7 и 25,3 МПа на сжатие и изгиб, соответственно) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к аналогичным материалам для изготовления биполярных пластин ПОМТЭ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00280) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова.*

### Литература

1. Li Y., Yang, J., Song, J. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. №67. pp. 160-172.
2. Abedin T., Pasupuleti J., Paw, J.K.S., Tak Y.C., Mahmud M., Abdullah M.P., Nur-E-Alam M. Journal of Power Sources. 2025. №640. p. 236769.
3. Wang G., Yu Y., Liu H., Gong C., Wen S., Wang X., Tu Z. Fuel Processing Technology. 2018. №179. p. 203.
4. Wlodarczyk R. Functional Materials Letters. 2019. №12. pp. 1930001.
5. Tao G., Hua L., Qu F., Chen T., Liu Y., & Chen H. (2025). Journal of Power Sources. №626. p. 2357.
6. Radzuan, N.A.M., Zakaria M.Y., Sulong A.B., Sahari J. Composites Part B: Engineering, 2017. №110, pp.153-160.

7. Prasanna D., Selvaraj V. Journal of colloid and interface science. 2016. №472. pp. 116-125.
8. Zhu J. 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials. Elsevier. 2020. pp. 367-385.
9. Jeong K.I., Oh J., Song S.A., Lee D., Lee D.G., & Kim S.S. Composite Structures. 2021. №262. p.113617.
10. Шегельман И.Р., Васильев А.С. // Инженерный вестник Дона, 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1769.
11. Rout P.K., Nannaware A.D., Prakash O., Kalra A., & Rajasekharan R. Chemical Engineering Science. 2016. №142. pp. 318-346.
12. Катария Я.В., Кашпарова В.П., Токарев Д.В., Буракова Л.А., Клушин В.А., Смирнова Н.В. Известия РАН. Серия химическая. 2023. №72 (6). pp. 1478-1481.
13. Faddeev N., Klushin V., Tokarev D., Smirnova N. Key Engineering Materials. 2020. №869. pp. 591-596.
14. Lee S.B., Cho K.H., Lee W.G., Jang H. J. Power Sources. 2009. №187 (2). pp. 318-323.
15. Kuan Y.D., Ciou C.W., Shen M.Y., Wang C.K., Fitriani R.Z., Lee C.Y. Int. J. Hydrogen En. 2021. №46 (31). pp. 16801-16814.
16. Yin Q., Li A.J., Wang W.Q., Xia L.G., Wang Y.M. Study on the electrical and mechanical properties of phenol formaldehyde resin/graphite composite for bipolar plate. J. Power Sources. 2007. V. 165. N 2. pp. 717-721.

### References

1. Li Y., Yang, J., Song, J. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. №67. pp. 160-172.
  2. Abedin T., Pasupuleti J., Paw, J.K.S., Tak Y.C., Mahmud M., Abdullah M.P., Nur-E-Alam M. Journal of Power Sources. 2025. №640. pp. 236769.
-

3. Wang G., Yu Y., Liu H., Gong C., Wen S., Wang X., Tu Z. Fuel Processing Technology. 2018. №179. p. 203.
4. Wlodarczyk R. Functional Materials Letters. 2019. №12. p. 1930001.
5. Tao G., Hua L., Qu F., Chen T., Liu Y., & Chen H. (2025). Journal of Power Sources. №626. p. 2357.
6. Radzuan, N.A.M., Zakaria M.Y., Sulong A.B., Sahari J. Composites Part B: Engineering, 2017. №110. pp. 153-160.
7. Prasanna D., Selvaraj V. Journal of colloid and interface science. 2016. №472. pp. 116-125.
8. Zhu J. 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials. Elsevier. 2020. pp. 367-385.
9. Jeong K.I., Oh J., Song S.A., Lee D., Lee D.G., Kim S.S. Composite Structures. 2021. №262. p.113617.
10. Shegelman I.R., Vasiljev A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1769.
11. Rout P.K., Nannaware A.D., Prakash O., Kalra A., & Rajasekharan R. Chemical Engineering Science. 2016. №142. pp. 318-346.
12. Katarija Ja.V., Kashparova V.P., Tokarev D.V., Burakova L.A., Klushin V.A., Smirnova N.V. Izvestija akademii nauk. Serija himicheskaja (Rus). 2023. №72 (6). pp. 1478-1481.
13. Faddeev N., Klushin V., Tokarev D., Smirnova N. Key Engineering Materials. 2020. №869. pp. 591-596.
14. Lee S.B., Cho K.H., Lee W.G., Jang H. J. Power Sources. 2009. №187 (2). pp. 318-323.
15. Kuan Y.D., Ciou C.W., Shen M.Y., Wang C.K., Fitriani R.Z., Lee C.Y. Int. J. Hydrogen En. 2021. №46 (31). pp. 16801-16814.
16. Yin Q., Li A.J., Wang W.Q., Xia L.G., Wang Y.M. J. Power Sources. 2007. №165(2). pp. 717-721.

**Дата поступления: 18.07.2025**

**Дата публикации: 25.08.2025**

---