

пленки с толщиной от 52 до 436 нм на основе водного раствора синтезированного полимера. Для пленок, полученных на стекле, продемонстрирована полная прозрачность в видимом диапазоне (рис. 1а). Согласно нашей гипотезе, градиент ПП связан с кристалличностью полимера, которая при комнатной температуре составляет ~40 % и снижается до значений менее 2 % при 160 °С (рис. 1б). Пленки были подвергнуты отжигу при температуре 130 °С, что выше температуры кристаллизации ( $T_k$ ) полимера согласно дифференциально сканирующей калориметрии ( $T_k=60$  °С), что позволяет сформировать кристаллическую структуру при их охлаждении.

### Список литературы

1. Lepkowicz R. et al. *High Value, High Impact, High Volume: The Emergence of Nanolayered GRIN Optics // Imaging Systems and Applications*. – Optical Society of America, 2020. – P. ITh4E. 1.
2. Dylla-Spears R. et al. *3D printed gradient index glass optics // Science advances*, 2020. – V. 6. – № 47. – P. eabc7429.

Исследование показателя преломления полученных пленок показало, что градиент ПП растет при увеличении толщины пленки от 52 до 120 нм и не наблюдается при толщине пленки более 436 нм (рис. 1в).

Наличие градиента в пленках помимо эллипсометрических исследований было подтверждено методом нейтронной рефлектометрии (рис. 1г).

### Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-5116.2021.4).

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ СМЕСЕЙ С НЕОБЛУЧЁННЫМ И СВЧ – ОБЛУЧЁННЫМ НАНОПОРОШКАМИ АЛЮМИНИЯ

А. В. Мостовщиков, Л. О. Роот, О. В. Семченко

Научный руководитель – д.т.н., профессор НИ ТПУ А. В. Мостовщиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, lgsemchenko@gmail.com

СВЧ-облучённый нанопорошок алюминия характеризуется повышенным количеством запасённой энергии по сравнению с необлучённым нанопорошком алюминия, и по сравнению с более крупнодисперсными материалами алюминия [3]. Таким образом, применение СВЧ-облучённого нанопорошка алюминия, как компонента термитных смесей, вместо традиционных алюминиевых опилок и пудры позволит повысить энергетику процесса сварки, температуру в зоне горения, что, предположительно, способно повысить качество сварного шва, его износоустойчивость [2], а также позволит паять тугоплавкие соединения и получать однородные слитки металлов малой массы [4].

Для выявления перспективы применения СВЧ-облучённого нанопорошка алюминия в составе термитных смесей были смоделированы наиболее распространённые стандартные составы

термитных смесей на основе оксидов железа и оксидов меди, сожжены при нормальных условиях, продукты сжигания проанализированы методом рентгенофазового анализа (Дифрактометр «Дифрей 401») на предмет фазового состава. Смеси приготовлены механическим смешиванием исходных компонентов. Поджигание смесей выполнено при помощи лазерной указки. Состав смесей для сжигания: **1Т**:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : НП AL=3:1, **2Т**: FeO: НП AL=3:1, **3Т**:  $\text{Cu}_2\text{O}$ : НП AL=3:1, **4Т**: CuO: НП AL=3:1; **1Т обл**:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : НП AL обл=3:1, **2Т обл**: FeO изм: НП AL обл=3:1, **3Т обл**:  $\text{Cu}_2\text{O}$ : НП AL обл=3:1, **4Т обл**: CuO: НП AL обл=3:1.

В результате сжигания образцов, состоящих из оксида железа (III) и оксида железа (II) с СВЧ-облучённым и необлучённым нанопорошками алюминия ключевым продуктом стал сложный оксид герцинит (алюминат железа

Таблица 1. Фазы продуктов сгорания смесей с необлучённым и СВЧ-облучённым нанопорошками алюминия

| Образец | Выход фазы, %             |                         |                         |                 |                          |    |                       |
|---------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|----|-----------------------|
|         | $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{AlCu}_4$ | $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ | Cu | $\text{Cu}_2\text{O}$ |
| 1Т      | 100                       |                         |                         |                 |                          |    |                       |
| 2Т      | 52                        |                         | 48                      |                 |                          |    |                       |
| 3Т      |                           |                         | 20                      |                 | 66                       | 9  | 5                     |
| 4Т      |                           |                         | 16                      | 16              |                          | 16 | 52                    |
| 1Т обл  | 100                       |                         |                         |                 |                          |    |                       |
| 2Т обл  | 77,5                      | 22,5                    |                         |                 |                          |    |                       |
| 3Т обл  |                           |                         |                         |                 | 58                       | 18 | 24                    |
| 4Т обл  |                           |                         | 14                      |                 |                          | 14 | 72                    |

(II)). Герцинит является одним из промежуточных продуктов алюмотермической реакции [6]. В практическом отношении он обладает огнеупорными свойствами, низкой теплопроводностью, высокой коррозионной стойкостью, что ценно для создания огнеупорной керамики и антикоррозионных покрытий на поверхности стальных материалов [5]. Восстановленное железо не обнаружено. В результате сжигания образцов, состоящих из оксида меди (I) и оксида меди (II) с СВЧ-облучённым и необлучённым нанопорошками алюминия обнаружена восстановленная медь и два интерметаллида.  $\text{AlCu}_4$  является основой дюралюминиевого сплава, пластичный и прочный;  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  является  $\gamma_1$ -фазой в

системе Cu–Al, в массе имеет слоистую структуру. Небольшое количество интерметаллидов в объёме сплава повышает его прочность, однако чрезмерное их количество снижает прочность и коррозионную устойчивость участка [1].

С точки зрения перспективы применения СВЧ-облучённого нанопорошка алюминия в составе термитных смесей, наиболее эффективными выглядят образцы оксида меди (I) с СВЧ-облучённым и необлучённым нанопорошками алюминия по суммарному содержанию металлических фаз: 76 % и 75 % соответственно. При этом максимальное количество восстановленной меди обнаружено в образце 3Т обл с СВЧ-облучённым нанопорошком алюминия.

### Список литературы

1. Иванов В. В. // Вектор высоких технологий, 2021. – Т. 51. – № 1. – С. 26–34.
2. Крушенко Г. Г., Назаров В. П., Резанова М. В. // Вестник СибАГУ, 2015. – Т. 16. – № 1. – С. 233–240.
3. Мостовицков А. В. Дисс. ... д.т.н. – Томск: НИ ТПУ, 2021. – 277.
4. Яценко В. В. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара: СГТУ, 2011. – 19.
5. Enhessari M. // High temperature materials and processes, 2017. – V. 36. – № 8. – P. 789–793.
6. Mei J., Halldern R. D., Xiao P. // Scripta materiala, 1999. – Т. 41. – № 5. – P. 541–548.

## СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНО-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КАРБОНИЗИРОВАННОГО МЕЛАМИНОФОРМАЛЬДЕГИДНОГО ПОЛИМЕРА

А. К. Мухамеджанова, Я. А. Висурханова, Е. А. Соболева  
 Научный руководитель – д.х.н., заведующий лабораторией Н. М. Иванова  
 Институт органического синтеза и углехимии Республики Казахстан  
 100008, г. Караганда, ул. Алиханова, 1, [aijan\\_08@mail.ru](mailto:aijan_08@mail.ru)

Медно-углеродные композиты широко применяются в науке и технике, включая, катализ и электрокатализ. Материалы Cu/C обладают

высокой прочностью, теплопроводностью, электропроводностью и другими практически важными свойствами. Для улучшения взаимодей-