

## Структурные и химические изменения в углеродных нанотрубках при экстремально высоких температурах

Караева А.Р.<sup>1</sup>, Мутберг Э.Б.<sup>1</sup>, Хасков М.А.<sup>1</sup>, Казённых Н.В.<sup>1</sup>, Урванов С.А.<sup>1</sup>, Мордкович В.З.<sup>1</sup>

karaevaar@tisnum.ru

<sup>1</sup> НИЦ " Курчатовский институт", КК ТИСНУМ, г.о. Троицк г. Москва

За последнее десятилетие исследовано множество потенциальных применений углеродных нанотрубок (УНТ) и материалов на их основе [1]. Известные на рынке углеродных нанотрубок крупные компании - Showa Denko K.K. (ныне Resonac), Nanocyl S.A., Cnano Technology Ltd производят УНТ для хранения энергии, электроники, покрытий, полимеров, композитов, автомобильных приложений и др. Они используют УНТ как функциональную добавку, при этом массового замещения традиционных материалов на УНТ в промышленности и других отраслях не наблюдается. Одной из причин является то, что качество нанотрубок, получаемых масштабируемым способом, сложно контролировать, и соответственно, получать структуры нанотрубок или материалов на их основе со строго заданными свойствами не удастся. В основном получают смеси различных видов нанотрубок с преимущественным содержанием того или иного компонента: трубок, клубков, пучков и таких примесей как аморфный углерод, графит или остаточный катализатор. Для применения УНТ, например, в качестве электродов суперконденсаторов, электропроводящих компонентов в литий- и натрий-ионных аккумуляторах нужны нанотрубки без примесей и однонаправленные в пространственном отношении. Вышеперечисленные компании и исследователи разных стран сосредоточены на совершенствовании методов синтеза УНТ, повышении чистоты продукта и расширении сфер применения [2]. На сегодняшний день поиск способов массового получения высокочистых и строго упорядоченных УНТ является актуальной задачей.

В настоящей работе предметом исследования являлись длинные УНТ, синтезированные на пилотной установке методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод) с последующей высокотемпературной очисткой в печи графитации. Синтез проводили при температуре 1150°C в потоке водорода с применением железосодержащего катализатора, серосодержащего промотора и прекурсора углерода [3]. Образующийся углеродный аэрогель УНТ наматывали в приемнике продукта на бобину прямым вытягиванием из реактора. Далее, синтезированные образцы подвергали высокотемпературной обработке в печи графитации в диапазоне температур 1600 - 2850°C для того, чтобы удалить остаточный катализатор и уменьшить долю углеродных образований, не являющихся нанотрубками.

В работе изучено влияние температуры на химический и структурный состав УНТ, а также другие характеристики УНТ после обработки в печи графитации. Для характеристики образцов УНТ использовали электронную микроскопию, спектроскопию комбинационного рассеяния, термогравиметрический анализ и др.

В ходе работы были оптимизированы условия высокотемпературной обработки УНТ, соответственно их оптимальной степени очистки от остаточного катализатора и других примесей.

### Ссылки

1. Z. Hu, H. Hong, Recent Progress in Materials (2023), 5(3), P.1.
2. <https://www.futuremarketinsights.com/ru/reports/global-carbon-nanotubes-market> (2025).
3. A.R. Karaeva, N.V. Kazennov, E.A. Zhukova, V.Z. Mordkovich, J. Materials Today (2018), V.5, P.25951.