

## Влияние механической активации на синтез трисилицида пентаниобия\*

О.А. Шкода<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Исследовано влияние совместной механической активации компонентов для получения трисилицида пентаниобия в режиме теплового взрыва. Эксперименты проводили на смеси порошков ниобия и кремния стехиометрического состава Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Определены условия механической активации и температурные характеристики последующего самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, который проходит в твердофазном режиме с образованием однофазного продукта.

**Ключевые слова:** механическая активация, синтез, тепловой взрыв, трисилицид пентаниобия, слоистый агломерат, структура, ниобий, кремний, характеристические температуры.

### Введение

Силициды находят широкое применение в различных областях науки и техники, обеспечивая реализацию технологических процессов и создание новых материалов [1, 2]. Особую востребованность демонстрируют дисилициды тугоплавких металлов. Это объясняется их комплексом таких ценных свойств, как высокая жаростойкость и термическая стойкость, сохранение механических характеристик в широком интервале температур, высокая электропроводность, устойчивость в среде других металлов [3, 4]. Дисилициды тугоплавких металлов применяют в аэрокосмической промышленности, для изготовления нагревательных элементов высокотемпературных печей и в качестве защитных высокотемпературных покрытий [5, 6].

В современной разработке жаропрочных материалов наблюдается тенденция замены никелевых сплавов на интерметаллидные естественно-композиционные материалы, особенно на основе системы Nb–Si. Эти композиты состоят из пластичной ниобиевой матрицы, упрочненной силицидом ниобия Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, что обеспечивает снижение плотности на 20–25% (до 7.2–7.5 г/см<sup>3</sup>) и повышение рабочей температуры до 1350 °C по сравнению с никелевыми сплавами. Такая комбинация улучшенных характеристик делает актуальным изучение этих материалов и новых возможностей их получения. В данной работе исследуется возможность получения силицида ниобия Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС) с использованием механической активации. СВС-метод имеет такие преимущества, как низкое энергопотребление, простое оборудование, высокая производительность, чистота продуктов и экологическая безопасность. Использование предварительной механической активации (МА) позволяет иметь дополнительную возможность для влияния на синтезированный продукт.

В низкоэнергетических системах, таких как Nb–Si, механическая активация играет ключевую роль в обеспечении протекания самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. МА позволяет аккумулировать энергию в шихте и снизить кинетические ограничения для массопереноса, что делает возможным инициирование СВС при последующем нагреве. Без МА системы, подобные Si–C и Nb–Si, не способны поддерживать самораспространяющуюся реакцию. В частности, для системы Nb–Si, как низкоэнергетической, предварительная активация является необходимым условием для проведения СВС [7–11].

Существующие способы получения силицидов ниобия разнообразны и обладают как преимуществами, так и недостатками, включая высокие температуры и длительное время синтеза [7, 12–14]. В работе [10] изучалось влияние механической активации на послойный СВС. Были определены оптимальные параметры механоактивации для инициирования СВС, а также проанализирован фазовый состав исходной, механоактивированной шихты и конечного продукта. Описаны условия синтеза однофазного NbSi<sub>2</sub> в различных режимах горения [11]. Значительное внимание уделяется изучению механических свойств силицидов ниобия. В [15] установлена связь между концентрацией кремния и механическими свойствами соединений Nb–Si. Показано, что фаза

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН (проект № FWRF-2024-0009).