

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет

M. MÜLLER, канд. техн. наук

Karlsruhe Institute of Technology/KIT·Institute of Applied Materials Karlsruhe,
Germany

В работе рассмотрены этапы получения композиционного материала на основе нитрида кремния триботехнического назначения, обладающего достаточной плотностью, стойкостью к термоудару, прочностью при высоких температурах, износостойкостью и низкой склонностью к ползучести. Приведены результаты получения порошковой композиции, показавшие целесообразность проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: триботехнический материал, нитрид кремния, активизирующие добавки Y_2O_3 и MgO , азотирование, жидкофазное спекание, рентгеноструктурный анализ.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF PRODUCING TRIBOTECHNICAL MATERIAL BASED ON SILICON NITRIDE

E.S. GOLOUBTSOVA, Dr. of Engineering Sciences

Belarusian National Technical University

M. MÜLLER, Ph. D in Technical Sciences

Karlsruhe Institute of Technology/KIT·Institute of Applied Materials Karlsruhe,
Germany

In this paper, we consider the stages of obtaining a composite material on silicon nitride based of tribological purpose, which has sufficient density, resistance to thermal shock, strength at high temperatures, wear resistance, and low tendency to creep. The results of obtaining a powder composition, which showed the feasibility of further research.

Keywords: tribotechnical material, silicon nitride, active additives Y_2O_3 and MgO , nitroging, liquid phase sintering, X-ray structure analysis.

Введение. Надежность и долговечность автомобильного, сельскохозяйственного и других видов транспорта во многом обусловлены явлениями трения и изнашивания, происходящими в узлах машин. Трение и износ имеют существенное экономическое значение, поскольку они определяют время службы машин и оборудования. Изнашивание приводит к нарушению герметичности узлов, потери точности взаимного расположения деталей и перемещений. Возникают заклинивания, удары, вибрации, приводящие к поломкам. Трение приводит к потерям энергии, перегреву механизмов, снижению передаваемых усилий, повышенному расходу горючего и других материалов. Кроме того, трение также оказывает положительное влияние, связанное с работой механизмов торможения, сцепления, движения колес. Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей в ходе работы приводит к изменению трения [1].

Нежелательные последствия трения и износа, такие как изменения геометрии, выкрашивание рабочей поверхности трущихся деталей, колебания температур и др. приводят к потере работоспособности рабочих деталей и, как результат, выходу из строя или прогрессирующему ухудшению свойств всей системы. Для многих машин затраты на ремонт, в связи с износом деталей за период эксплуатации, могут в несколько раз превышать стоимость нового оборудования.

Оптимизация соотношения затрат и эффективности трибологических систем требует разработки подходов, ориентированных на решение проблем, которые учитывают знания основных механизмов изнашивания в процессе взаимодействия контактирующих поверхностей при их относительном перемещении, триботехнических материалов, влияния поверхностных структур и условий контакта, а также взаимодействия в трибосистемах.

Благодаря стремлению к экологической и экономической оптимизации в последние десятилетия форсировалась разработка специальных триботехнических материалов с применением износостойких и антифрикционных покрытий. К ним следует отнести материа-

лы на основе оксидных и неоксидных керамик, которые все чаще используются в качестве износостойких и высокотемпературных материалов в машиностроении. При этом, как альтернатива сталям, они отличаются низкой плотностью, хорошей химической стойкостью, а также высокой твердостью и пределом прочности при сжатии вплоть до высоких температур.

Благодаря стойкости к термоудару, достаточной прочности при высоких температурах, хорошей износостойкости и низкой склонности к ползучести, керамика на основе Si_3N_4 выбрана как материал деталей трибологических систем [2, 3].

Важным этапом в процессе получения триботехнического материала на основе Si_3N_4 является создание пористого и бездефектного образца при прессовании и последующем жидкофазном спекании. Естественно, такой процесс связан с существенным изменением объема (усадкой при спекании), что может привести к более дорогостоящей доработке конструктивных элементов. Процесс получения композиционного материала на основе нитрида кремния триботехнического назначения рассмотрен в настоящей работе.

Экспериментальная часть включала следующие этапы.

Получение исходной порошковой композиции. В качестве компонентов для получения шихты требуемого состава использовались следующие материалы:

– порошок оксида иттрия – Y_2O_3 , 99,99 %, фирма-производитель Johnson Matthey;

– порошок оксида магния – MgO , фирма-производитель GLOBE EXP IMP PTY LTD;

– порошок поликремния – фирма-производитель Wacker-Chemie.

Порошок кремния (около 84 мас. %), активирующие добавки Y_2O_3 и MgO соединялись с различными долями нитрида бора BN (0, 5, 10, 15 %) и смешивались в течение 24 ч (использовали планетарную шаровую мельницу, 2-пропанол в качестве растворителя). Добавление инертного материала в виде нитрида бора выбиралось с целью улучшения трибологических свойств спеченных образцов. После смешивания порошковые смеси сушились и просеивались.

Прессование. Из подготовленных порошковых смесей изготавливались цилиндрические образцы диаметром 10 мм, высотой ~ 4 мм по схеме одностороннего прессования (давление прессования 150–200 МПа) с плотностью ~ 55 % от теоретической.

Азотирование. Процесс образования нитрида кремния осуществлялся в среде азота при 1390 °С в течение 2 ч и оценивался на основании увеличения массы исходных образцов. Кроме того, изучалось влияние добавки 5 % H₂ к N₂-атмосфере, и BN на процесс прохождения реакции. С помощью XRD-анализа определялись образованные фазы, в частности соотношение α - и β -Si₃N₄.

Спекание. На завершающем высокотемпературном этапе обработки азотированные образцы спекались при 1750 °С в засыпке из нитрида бора и нитрида кремния в течение 2 ч. Осуществлялся контроль изменений массы и размеров азотированных образцов. Затем исследовалась структура, и проводился фазовый анализ спеченных образцов.

Приведенная ниже таблица показывает среднее Si-превращение исследуемых порошковых композиций во время азотирования при 1390 °С. В целом можно отметить, что добавка 5 % H₂ к N₂ в процессе азотирования улучшает превращение Si, т. е. увеличивается скорость реакции. Содержание BN до 5 % не влияет на скорость реакции, более высокое содержание BN немного замедляет реакцию азотирования.

Таблица – Si-превращение порошковых композиций при 1390 °С

Доля BN, %	Превращение кремния во время азотирования	
	N ₂ -среда	N ₂ + 5 % H ₂ -среда
0	85,4 %	90,9 %
5	85,3 %	90,9 %
10	85,8 %	87,7 %
15	81,5 %	88,9 %

Рентгеноструктурный анализ (XRD) после азотирования указывает на наличие как α -Si₃N₄, так и β -Si₃N₄; после спекания наблюдается наличие только β -фазы (рисунок 1). Кроме того, добавляемый нитрид бора заметно распознаваем и, таким образом, должен существенно влиять на трибологические свойства материала. Образцы без добавки BN имеют практически беспористую структуру, при содержании 10 % BN наблюдается заметная остаточная пористость. Можно предположить, что это негативно влияет на механические свойства, даже если желаемая удлиненная иглообразная β -Si₃N₄

фаза (темно-серого цвета) хорошо выражена в обоих случаях (рисунок 2). В образцах с меньшими долями BN (5 %) можно добиться плотной беспористой структуры.

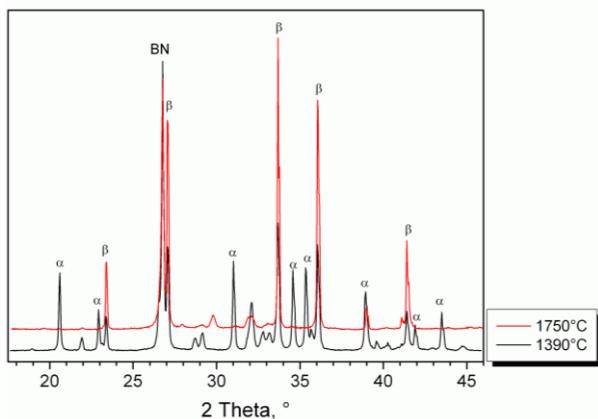


Рисунок 1 – XRD-анализ после азотирования (1390 °C) и спекания (1750 °C):
 α – α - Si_3N_4 , β – β - Si_3N_4 , BN – нитрид бора

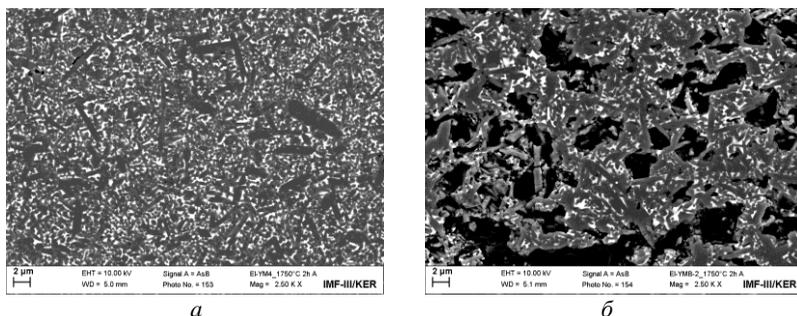


Рисунок 2 – REM-снимки (контраст материалов) поперечных шлифов спеченных образцов с 0 % BN (а), 10 % BN(б)

Заключение. Проведенные эксперименты не включают полную оценку закономерностей получения триботехнических материалов, однако, безусловно, свидетельствуют о необходимости и целесообразности дальнейшей работы в этом направлении.

Список литературы

1. **Адамовский, А.А.** Триботехнические характеристики сверхтвердых и высокомодульных материалов / А.А. Адамовский, Н.С. Зюкин, В.Т. Варченко // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2012. – Вып. 45. – С. 94–103.

2. **Tribological** behavior of Si_3N_4 –BN ceramics materials for dry sliding applications / J.M. Carrapichano [et al.] // Wear, 2002. – Vol. 253, No. 9–10. – P. 1070–1076.

3. **Tribological** Characterization of Composites Based on Si_3N_4 Ceramics / Ismail Dhaon [et al.] // International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics ICAMEM 2019: Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics, 05 August 2019. – P. 271–276.

References

1. **Adamovsky, A.A.** *Tribotekhnicheskie harakteristiki sverhtverdyh i vysokomodul'nyh materialov* [Tribotechnical characteristics of superhard and high modulus materials] / A.A. Adamovsky, N.S. Zyukin, V.T. Varchenko // *Adgeziya rasplavov i pajka materialov = Metal adhesion and soldering of materials*. – 2012. – Vyp. 45. – P. 94–103.

2. **Tribological** behavior of Si_3N_4 –BN ceramics materials for dry sliding applications / J.M. Carrapichano [et al.] // Wear, 2002. – Vol. 253, No. 9–10. – P. 1070–1076.

3. **Tribological** Characterization of Composites Based on Si_3N_4 Ceramics / Ismail Dhaon [et al.] // International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics ICAMEM 2019: Advances in Mechanical Engineering, Materials and Mechanics, 05 August 2019. – P. 271–276.

Поступила 06.07.2021

Received 06.07.2021