

**Структурные превращения в покрытиях Zr-V-Mo-Si при высокотемпературном нагреве в колонне просвечивающего электронного микроскопа**

**Научный руководитель – Кирюханцев-Корнеев Филипп Владимирович**

*Сытченко Алина Дмитриевна*

*Аспирант*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Институт экотехнологий и инжиниринга, Москва, Россия

*E-mail: alina-sytchenko@yandex.ru*

В настоящее время большое внимание уделяется разработке покрытий на основе  $ZrB_2$  для защиты деталей ракетно-космической техники от высокотемпературной коррозии. Однако покрытия  $ZrB_2$  быстро окисляются при  $T > 1000^\circ C$  и разупрочняются при  $T > 500^\circ C$ , поэтому для повышения термической стабильности и жаростойкости  $ZrB_2$  допируют SiC, TaSi<sub>2</sub>, MoSi<sub>2</sub>. Настоящая работа посвящена комплексному изучению термической стабильности покрытий Zr-V-Mo-Si, включая in-situ ТЕМ исследования структуры и определение механических свойств при нагреве в диапазоне  $T = 20-1000^\circ C$ .

Покрытия осаждались методом магнетронного распыления в среде Ar с применением керамических СВС-мишеней  $xZrB_2-(MoSi_2-10\%MoB)$ , где  $x = 5, 20, 80$  вес.%. Ламели были изготовлены с помощью методов FIB и PIPS. In situ исследования структурно-фазовых превращений проводились методом ТЕМ на микроскопе JEM-2100 с установленной системой нагрева Gatan 652. Были проведены отжижки покрытий в вакууме и на воздухе при аналогичных температурах, изучены их фазовый состав и механические свойства. Был проведен корреляционный анализ данных РФА, наноинтентирования и in-situ ТЕМ.

По результатам ПЭМ видно, что покрытия имели колонную структуру. С увеличением температуры происходил рост кристаллитов внутри столбчатых зёрен (рис.1).

Электроннограммы покрытий были идентичны во всем интервале температур и свидетельствовали о присутствии фазы h-ZrB<sub>2</sub>. Нагрев приводил к снижению межплоскостного расстояния по причине того, что атомы Mo и Si, покидая решётку h-ZrB<sub>2</sub>, образовывали аморфную фазу MoSi<sub>x</sub>, что обусловило экстремальную зависимость твердости (H) от температуры. При комнатной температуре H=39 ГПа. Падение H при нагреве до 200 и 400 °C связано с релаксацией внутренних напряжений. Рост H до 37,7 на участке 400-800 °C, произошел в результате достижения оптимального соотношения кристаллической и аморфной фаз. Дальнейшее снижение H на участке 800-1000 °C связано с увеличением размера зерна. Отжижки на воздухе показали, что покрытия Zr-Mo-Si-B обладали высокой жаростойкостью при  $T=1500-1700^\circ C$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект 0718-2020-0034).

**Иллюстрации**

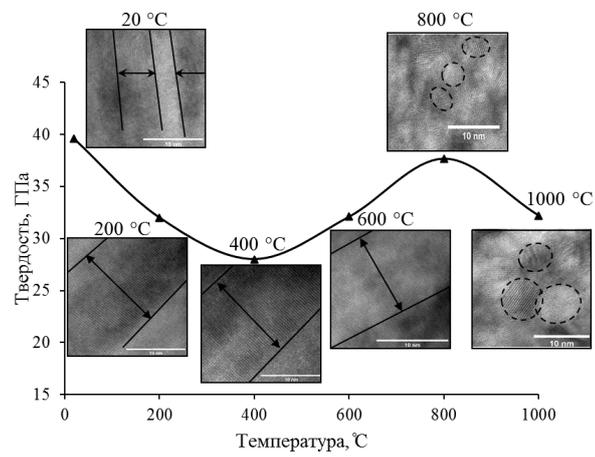


Рис. 1. Рисунок 1. Данные наноиндентирования и in-situ ТЕМ