

Нано для космоса

В № 2 за 2007 г. журнал «Наука из первых рук» сообщил об открытии томскими учеными эффекта «шахматной доски» в распределении механических напряжений на границе раздела двух сред. Полтора года спустя на основе этого эффекта специалисты Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск) совместно с Исследовательским центром им. М.В. Келдыша (Москва) разработали наноструктурные теплозащитные покрытия, предназначенные для ракетно-космической техники.

Современным конструкциям, представляющим собой сложные функциональные системы, зачастую приходится работать в экстремальных условиях. В ракетно-космической отрасли эти условия – суперэкстремальные.

Не существует природных материалов, которые способны выдерживать высокие температуры плазменных потоков. А ученые и инженеры такие материалы создают. Правда, срок их службы очень ограничен. И максимально увеличить его, а также поднять еще выше температуру плазмы, которая определяет тягу ракеты, – задача актуальная.

Какие требования предъявляются к материалу ракетного сопла? С одной стороны, он должен эффективно отводить тепло плазменной струи, чтобы конструкция не расплавилась, с другой – не должен непосредственно соприкасаться с плазмой. В качестве материала сопла обычно используется высокотеплопроводная медь; кроме того, предусмотрена система внутреннего водоохлаждения. Наружную же поверхность сопла покрывают теплозащитной керамикой. Вот здесь-то материаловеды и сталкиваются с целым комплексом проблем на стыке физики, механики, химии, наноматериаловедения.

Из-за различия коэффициентов термического расширения меди и керамики на границе их раздела возникает очень сложное напряженно-деформированное состояние. В керамике образуется сетка трещин и происходит ее частичное отслоение. Это резко ограничивает срок службы ракеты. А ведь разрабатываются программы межпланетных полетов, ракеты многоразового использования; остро стоит вопрос экономичности двигателей, их коммерческой эффективности.

Ответы на актуальные вопросы современного материаловедения дает развиваемая в СО РАН новая наука – физическая мезомеханика. Ее методы позволяют

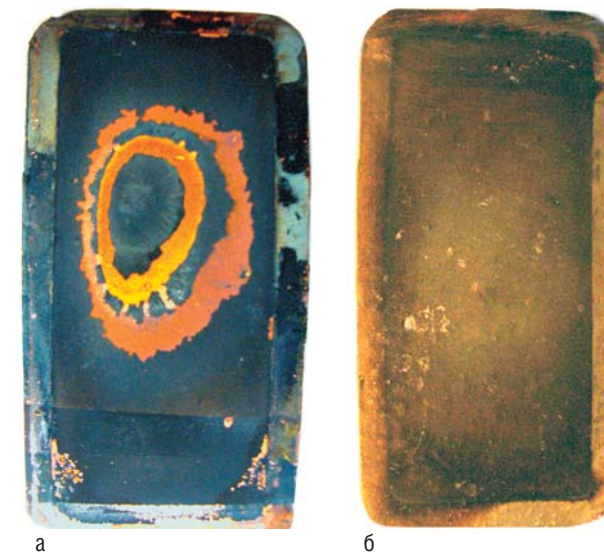
рассчитывать механические напряжения на границе разнородных сред. Активное исследование эффекта «шахматного» распределения механических напряжений, открытого два года назад, привело к заключению принципиальной важности: теплозащитные покрытия, наносимые на сопла ракет, должны быть наноструктурными.

Принято считать, что отслаивание покрытия от подложки связано со слабой адгезией (от лат. *adhaesio* – прилипание). Это действительно серьезная, но не самая главная проблема. Расчеты показывают, что сетка трещин в керамическом покрытии развивается по краям клеток «шахматного» распределения растягивающих и сжимающих нормальных напряжений на границе раздела. Последующее отслоение покрытия происходит в клетках, испытывающих растягивающие нормальные напряжения. Их и нужно снижать. Как это делать, отвечает физическая мезомеханика.

Не вдаваясь во все детали, дадим главный вывод: покрытия обязательно должны быть многослойными и иметь наноструктуру. Это обеспечивает минимальную амплитуду модуляции нормальных и касательных напряжений на всех границах раздела многослойного покрытия, что позволяет кардинально улучшить его эксплуатационные характеристики.

Следующая, не менее важная, проблема – как при высоких температурах сохранить в покрытии наноструктуру? Стабильное твердое тело по своей природе стремится быть совершенным кристаллом. Наноструктура не свойственна твердому телу и при высокоэнергетическом воздействии перестраивается в монокристалл. Физическая мезомеханика позволяет решить и проблему стабилизации наноструктуры. Достигается это путем выделения в структуре наночастиц тугоплавких соединений определенного типа.

В Институте физики прочности и материаловедения были разработаны нанотехнологии послойного осаждения покрытия с бомбардировкой каждого слоя пучком ионов. Оказалось, что при условии предварительного наноструктурирования ионным пучком подложки можно добиться значительного уменьшения среднего размера зерна в покрытии – до 10–20 нм. При этом твердость, износостойкость и термоциклическая стойкость покрытия многократно повышаются.



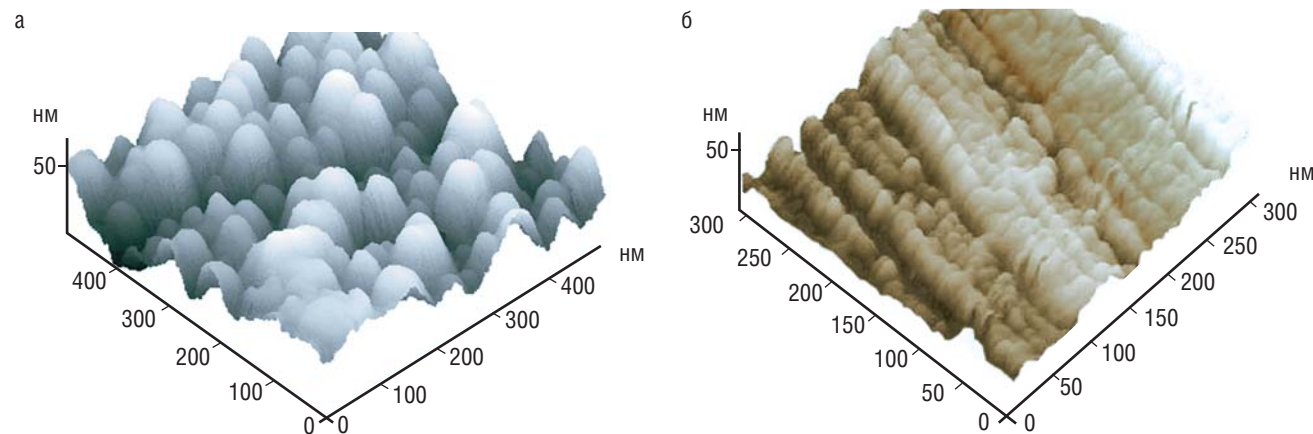
Образцы после огневых испытаний. Хорошо видны кольцевые отслоения стандартного теплозащитного покрытия (а); нанопокрyтие сохраняет свою структуру неповрежденной (б)

Был определен оптимальный химический состав многокомпонентных наноструктурных покрытий и отработана технология формирования в них контролируемого распределения фаз путем поочередного осаждения-бомбардировки слоев в едином вакуумном цикле.

Огневые испытания новых покрытий проводились в Центре Келдыша на плазмотроне мегаваттного класса. Образец с наноструктурным многослойным покрытием прошел ряд огневых циклов. В условиях осевого воздействия мощной плазменной струи стандартное теплозащитное покрытие испытывало кольцевые отслоения. Наноструктурное же покрытие, разработанное комплексным коллективом ИФПМ и Центра Келдыша, сохраняло свою структуру и теплозащитные свойства.

Над чем работает коллаборация Томска и Москвы в настоящее время? В научном плане обнаружены новые эффекты самоорганизации структур многослойных покрытий при высоких температурах, что позволяет прогнозировать создание «умных покрытий» (*smart coatings*). Это принципиальный этап в разработке материалов нового поколения. Что касается технологического аспекта, то необходимо отработать технологию нанесения таких покрытий на реальные конструкции ракетно-космических комплексов. Задачи, безусловно, сложные, но главное – заложен прочный фундамент дальнейших научных поисков.

Академик РАН В.Е. Панин, к.ф.-м.н. В.П. Сергеев
(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск)



Морфология покрытий TiAlN, осажденных методом вакуумного ионно-плазменного напыления: а – по стандартной технологии; б – с использованием нанотехнологии. Наблюдается ярко выраженный эффект уменьшения размера зерна. Атомно-силовая микроскопия