

приводит к выкрашиванию и износу материалов, который может в результате приводить к полному разрушению носовых обтекателей, элементов теплозащиты, лопаток турбин, изменению геометрии аэродинамических поверхностей, снижению безопасности полета и т. д.

Решение проблемы каплеударной эрозии связано с выбором достаточно прочных материалов. Построение математической модели процессов каплеударной эрозии является важной составляющей в решении проблемы обеспечения защиты поверхностей высокоскоростных летательных аппаратов.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать новый численно-аналитический метод, основанный на использовании поверхностных функций влияния и позволяющий снизить ресурсоемкие расчеты. Предлагается впервые исследовать не только единичный, но и периодический и стохастический режимы каплеударного воздействия. Приводятся примеры тестовых расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 23-49-00133), выданного Московскому авиационному институту.

УДК 539.3

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОБЪЕМНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

А. А. ОРЕХОВ, Т. С. ТЕРЕЩЕНКО

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Аналитическими методами построена новая математическая модель для обобщенного гиперболического уравнения теплопроводности. Найденное решение соответствует воздействию сосредоточенного во времени и координатах объемного источника тепла, расположенного в теплопроводящем полупространстве. Для решения используются интегральные преобразования Фурье по пространственным координатам и интегральные преобразования Лапласа по времени. Соответствующие оригиналы построены аналитическими методами.

Показано, что фундаментальное решение представляет собой две сферические тепловые волны. Первая волна распространяется от источника, а вторая является отраженной тепловой волной от поверхности полупространства. Представлены графические результаты, раскрывающие особенности процесса распространения тепловой волны в полупространстве с учетом конечной скорости движения тепловых фронтов. Получено интегральное представление, позволяющее получать решения задачи о произвольных объемных источниках тепла в полупространстве. С использованием найденного фундаментального решения приведен пример решения задачи о действии непрерывного сосредоточенного источника тепла в полупространстве.

Полученный результат позволит с большой точностью решать задачи о высокоинтенсивных тепловых потоках в новых материалах с неклассическими теплопроводящими свойствами, а также оценки вклада нестационарной теплопроводности в процессы теплопереноса в материалах и конструкциях, подвергающихся воздействию интенсивных тепловых потоков (нагрев газами с высокой энтальпией, лазерная обработка поверхности, аддитивные технологии и т. д.).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFF-2023-0004).

УДК 620.193

ПОВЕДЕНИЕ ЛЕЙКОСАПФИРА ПРИ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ОБТЕКАНИИ И НАГРЕВЕ ПОТОКАМИ ВОЗДУШНОЙ И АЗОТНОЙ ПЛАЗМ

В. А. ПОГОДИН, А. Н. АСТАПОВ

Московский авиационный институт, Российская Федерация

Работа продолжает систематические исследования [1–3], направленные на проведение анализа, корректировки и дополнения теоретического обоснования процессов пристеночной каталитической рекомбинации и аэрогазодинамического нагрева материалов в условиях воздействия скоростных высокоэнтальпийных потоков газа.

Исследуются образцы лейкосапфира толщиной 3 мм с ориентацией по плоскости (1120), полученные механической обработкой монокристалла (0001) с чистотой 99,999 мас. %, выращенного методом Чохральского из расплава.

Газодинамические испытания образцов проводили при скорости потока 4,5–4,8 км/с и энтальпии торможения до 55–60 МДж/кг на аэродинамическом стенде ФАУ «ЦАГИ» [1], оснащенном индукционным плазмотроном. В качестве стандарта для определения константы скорости каталитической рекомбинации использовали образцы из C_r/C -SiC композита с жаростойким покрытием $Si-TiSi_2-MoSi_2-TiB_2$ [4, 5]. Расчетное значение константы скорости гетерогенной рекомбинации для данного покрытия $K_w = 4$ м/с. Изменение величины спектральной излучательной способности образцов в процессе испытаний определяли из соотношения интенсивностей излучения при яркостной и спектральной температурах, измеренных одновременно спектрометром USB2000+ (Ocean Optics, США) с лицевой поверхности образцов. Термодинамическую (истинную) температуру лицевой поверхности образцов T_w определяли путем пересчета яркостной температуры, измеренной пирометром VS-СТТ-285/Е/Р-2001 (ООО «Видеоскан», Россия), с учетом поправки на установленный характер изменения излучательной способности на длине волны 890 нм. Огневые эксперименты сопровождали численным моделированием течений газовых смесей в рамках полных уравнений Навье – Стокса и упрощенных уравнений Максвелла.

Рентгеновский фазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре ARL X'tra (Thermo Fisher Scientific, Швейцария). Для оценки количественного содержания фаз использовали метод Ритвельда с применением программы Siroquant V3 (Sietronics Pty Ltd, Австралия). Микроструктурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) EVO-40 (Carl Zeiss, Германия), оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) X-Max 50 (Oxford Instruments, Великобритания).

Расчет изобарно-изотермического потенциала ΔG (свободной энергии Гиббса) возможных химических реакций проводили с помощью online-калькулятора FACT, разработанного в Ecole Polytechnique and McGill University (Канада).

Во время испытаний температура на лицевой поверхности образцов поднималась до 2050 °С при давлении торможения 20 кПа в потоке плазмы воздуха и не поднималась выше 1900 °С при давлении торможения 40 кПа в потоке плазмы азота. Характер взаимодействия диссоциированного потока воздуха и азота с поверхностью лейкосапфира принципиально различается. Поверхность оксида алюминия после воздействия воздушной плазмы структурируется. Наблюдается генерация вицинальных поверхностей [1]. Образование террасных структур возможно в процессе рекристаллизации нарушенного слоя, а также при плазменном травлении поверхности.

При рекристаллизации по мере увеличения температуры ступени объединяются и при достижении температуры плавления сглаживаются. Однако по данным СЭМ участки оплавленной поверхности оксида алюминия и места стекания расплава на боковых плоскостях также структурированы. Можно было бы предположить, что образование вицинальных поверхностей связано с плазменным травлением нарушенного поверхностного слоя оксида алюминия. Но согласно данным РФА после воздействия плазмы наблюдается рост плотности дислокаций (плоскостей скольжения), что характерно при рекристаллизации нарушенного слоя. Таким образом, образование террасных структур реализуется по смешанному механизму. Важно отметить, что плазменное травление является массообменным процессом (абляцией) с участием частиц газа, с одной стороны, и атомов алюминия и кислорода поверхности – с другой.

Помимо этого, на дифрактограмме лейкосапфира после воздействия плазмы воздуха появились рефлексы, соответствующие кубической модификации оксида алюминия, нестабильной в условиях эксперимента. Формирование более рыхлой кубической решетки оксида алюминия при температурах порядка 2000 °С затруднительно обосновать. Вероятно, кубическая решетка стабилизируется в процессе кристаллизации расплава оксида алюминия, содержащего абсорбированные атомы кислорода из газового потока. Тогда это предполагает наличие расстехиометрии. И действительно, по данным ЭДС наблюдается незначительное отклонение от стехиометрического состава в пользу увеличения доли кислорода (Al_2O_{3+x}). Получается, что помимо абляции процесс рекомбинации в потоке диссоциированного воздуха сопровождается абсорбцией кислорода расплавом оксида алюминия.

В среде плазмы азота на поверхности оксида алюминия протекает азотирование с образованием согласно РФА соединений $Al_{23}O_{27}N_5$ и AlN. По данным расчета свободной энергии Гиббса установлено, что процесс азотирования оксида алюминия сопровождается значительным эндотермическим

эффектом и протекает через взаимодействие с диссоциированными атомами азота. Вытеснение более электроотрицательного кислорода молекулярным азотом согласно расчетам изменения термодинамического потенциала ΔG не реализуется даже при достижении температуры плавления оксида алюминия.

Расчетное значение константы скорости каталитической рекомбинации K_w для лейкосапфира в воздушной плазме составило 32 ± 5 м/с, а в среде плазмы азота – всего лишь $7 \pm 1,5$ м/с. Объяснить полученный результат непросто. Можно предположить, что азот рекомбинирует в газовой фазе и поверхность оксида алюминия не контактирует с атомарным азотом. Но тогда в этом случае невозможно обосновать процесс азотирования, который возможен только в случае адсорбции атомарного азота на поверхности оксида алюминия.

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что основной вклад в аэрогазодинамический нагрев поверхности лейкосапфира в среде плазмы воздуха обеспечивает 18 об. % кислорода. При этом доля азота в 4 раза выше, чем кислорода, а энергия диссоциации связи азот – азот составляет 942 кДж/моль, что почти в 2 раза выше, чем у связи кислород – кислород – 494 кДж/моль. Тем не менее в потоке диссоциированного азота температура на поверхности лейкосапфира не поднимается выше 1900 °С.

Процесс аэрогазодинамического обтекания поверхности диссоциированным потоком сопровождается абляцией, адсорбцией и абсорбцией. Соответственно, теплофизические свойства поверхности непрерывно изменяются, поэтому квазистационарные условия в процессе эксперимента не реализуются. Это обстоятельство в значительной степени искажает результаты тепловых расчетов и, следовательно, значения величины K_w . Поэтому полученное значение K_w в плазме азота необходимо корректировать с учетом процесса азотирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352.

Список литературы

- 1 Исследование взаимодействия монокристаллического лейкосапфира с высокоскоростными диссоциированными потоками газов / В. А. Погодин [и др.] // СТИН. – 2023. – № 10. – С. 8–11.
- 2 Исследование скорости каталитической рекомбинации в зависимости от состава плазмообразующего газа / В. А. Погодин [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Т. 1 им. А. Г. Горшкова : материалы XXIX Междунар. симпозиума, г. Кремёнки, 15–19 мая 2023 г. – М. : ООО «ТРП», 2023. – С. 172–174.
- 3 Исследование каталитической активности образцов поликристаллических и монокристаллических керамик / А. Н. Астапов // Авиация и космонавтика : тезисы докладов 21 Междунар. конф., Москва, 21–25 ноября 2022 г. – М. : Перо, 2022. – С. 439 – 440.
- 4 Астапов, А. Н. Получение жаростойких покрытий по безобжиговой шликерной технологии / А. Н. Астапов, В. С. Терентьева // Электromеталлургия. – Ч. I. – 2019. – № 3. – С. 24–33. – DOI : 10.31044/1684-5781-2019-0-3-24-33.
- 5 Астапов, А. Н. Получение жаростойких покрытий по безобжиговой шликерной технологии / А. Н. Астапов, В. С. Терентьева // Электromеталлургия. Ч. II – 2019. – № 4. – С. 15–24. DOI : 10.31044/1684-5781-2019-0-4-15-24.

УДК 517.958

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСКА НА НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОМ ПОДВЕСЕ С ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПРИ ПОЛЗУЩЕМ ЕЕ ДВИЖЕНИИ

В. С. ПОПОВ

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Институт проблем точной механики и управления – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского
центра «Саратовский научный центр Российской академии наук»*

А. А. ПОПОВА

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
Российская Федерация*

В современном транспортном и строительном комплексе широко используются различные технические системы и изделия, в состав которых входят упруго закрепленные жесткие элементы кон-