

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ ГАЗОВ

А. Н. АСТАПОВ, В. А. ПОГОДИН, А. Н. ТАРАСОВА, Л. Н. РАБИНСКИЙ
Московский авиационный институт (НИИ) Российская Федерация

Исследование аэрогазодинамического обтекания и нагрева свехвысокотемпературных (СВТ) материалов в части теплообмена и гетерогенной рекомбинации атомов и ионов потоков на их поверхности является крайне сложной многопараметрической задачей. Для проведения вычислительных экспериментов требуется громоздкий математический аппарат [1], состоящий из блоков математического моделирования и расчетов тепловых и газодинамических потоков с привлечением уравнений Навье – Стокса и Максвелла. В настоящее время исследование каталитических свойств ведется в двух направлениях. С одной стороны, проводятся исследования новых перспективных СВТ материалов, композиций и покрытий в потоках диссоциированного воздуха и азота (направление 1), а с другой – фундаментальные работы по исследованию процессов взаимодействия отдельных веществ с высокоэнергетическими частицами (направление 2).

В направлении 1 наибольшее распространение получили работы по исследованию каталитичности жаростойких СВТ материалов на основе боридов и карбидов циркония, гафния с добавками карбида кремния при температурах свыше 2000 °С [2, 3]. Несмотря на высокие каталитические свойства оксидных пленок на основе оксидов циркония, гафния [4] исследователи пробуют различные комбинации в архитектуре СВТ материалов с тем, чтобы минимизировать их пористость и уменьшить скорость уноса оксидов бора, кремния и силикатных стекол, обеспечивающих минимальное значение скорости каталитической рекомбинации [2, 5]. Отдельного внимания заслуживают работы [6, 7] по исследованию каталитических свойств интерметаллидов на базе металлов платиновой группы. Приведенные данные сложно сопоставлять между собой, так как принцип получения сверхзвукового потока диссоциированного газа в испытательных установках принципиально различается. Однозначно результаты экспериментов можно оценивать по значению яркостной температуры. К сожалению, авторы не всегда приводят данные по значению скорости каталитической рекомбинации, что, вероятно, связано с трудностями при ее определении. Возможно, данное обстоятельство вызвано динамическим состоянием процесса окисления на поверхности материалов. Несомненно можно утверждать, что материалы под высокоэнергетическим воздействием газовых потоков эволюционируют, т. е. переходят из одного квазиравновесного состояния в другое.

Направление 2 подразумевает исследование каталитических свойств отдельных веществ, которые, как правило, представляют собой стандартные образцы, обтекаемые потоками диссоциированного воздуха и/или азота. В качестве стандартного образца зачастую используют α -оксид кремния [8]. Другая часть работ посвящена исследованию абляции углерод-карбидокремниевых композитов в диссоциированных газовых потоках [9, 10]. Низкокаталитические свойства оксида кремния (продукта окисления карбида кремния) позволяют производить количественную оценку каталитичности легирующих добавок в составе композитов [5, 10]. Однако при оценке каталитических свойств поверхности в потоке диссоциированного азота не принимается во внимание азотирование карбида кремния и образование оксинитридных/нитридных фаз, хотя последние имеют большее значение степени черноты, чем оксиды. Поэтому при равных величинах поступающих к материалам тепловых потоков воздушной и азотной плазмы температура поверхности в потоке воздуха будет выше, чем в потоке азота.

Потребность в расширении фундаментальных знаний в области гетерогенной рекомбинации атомов и ионов потоков на поверхности СВТ материалов связана с необходимостью теоретического обоснования ряда специфических эффектов, описание которых выходит за рамки классических представлений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352, <https://rscf.ru/project/22-19-00352/>.

Список литературы

- 1 **Egorov, I. V.** Determination of material catalyticity at high temperatures in the VAT-104 hypersonic wind tunnel / I. V. Egorov, B. E. Zhestkov, V. V. Shvedchenko // *TsAGI Sci. J.* 2014. – XLV(1) – P. 3–13.
- 2 Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications / E. P. Simonenko [et al.] // *Russ. J. Inorg. – 2013. – Chem. 58. – P. 1669–1693. – https://doi.org/10.1134/S0036023613140039.*
- 3 **Purwar, A.** Experimental and computational analysis of thermo-oxidative-structural stability of ZrB₂-SiC-Ti during arc-jet testing / A. Purwar, V. Thiruvengadam, B. Basu // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2017. – 100. – P. 4860–4873. – <https://doi.org/10.1111/jace.15001>.
- 4 Improved aero-thermal resistance capabilities of ZrB₂-based ceramics in hypersonic environment for increasing SiC content / S. Mungiguerra [et al.] // *Corros. Sci.* – 2021. – 78. – P. 109067. – <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109067>.
- 5 The oxidation resistance of the heterophase ZrSi₂-MoSi₂-ZrB₂ powders – derived coatings / A. N. Astapov [et al.] // *Corros. Sci.* – 2021. – 189. – P. 109587. – <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109587>.
- 6 Ablation behavior of an Ir-Hf coating: A novel idea for ultra-high temperature coatings in non-equilibrium conditions / K. Zhang [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2020. – 818. – P. 152829. – <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152829>.
- 7 Ablation and surface heating behaviors of graphite based Ir-Al coating in a plasma wind tunnel / K. Zhang [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* – 2019. – 358. – P. 371–377. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.047>.
- 8 **Kim, I.** Experimental study of surface roughness effect on oxygen catalytic recombination / I. Kim // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2019. – P. 916–922. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.049>.
- 9 **Sakraker, I.** Experimental investigation of passive/active oxidation behavior of SiC based ceramic thermal protection materials exposed to high enthalpy plasma / I. Sakraker, C. J. Asma // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2013. – 33(2). – P.351–359. – <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.09.002>.
- 10 **Massuti-Ballester, B.** Oxidation of PM1000 and C/C-SiC exposed to highly dissociated oxygen and nitrogen flows / B. Massuti-Ballester, G. Herdrich, M. Frie // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2020. – 40 (6). – P. 2306–2316. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.01.053>.

УДК 531

СНИЖЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ КУЗОВА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКА (GLARE) И ДРУГИХ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ

А. В. БАБАЙЦЕВ, А. А. ЗАЙЦЕВ, Т. Т. ФОЗИЛОВ, С. С. ЛОПАТИН
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Усталость материала – это деградация механических свойств материала в результате накопления повреждений под действием переменных, циклических, напряжений с образованием развитием трещин, что обуславливает его разрушение за определённое время. Такой вид разрушения называют усталостным разрушением.

Усталостное разрушение металла приводит к проблемам безопасности на транспорте. Снижение жёсткости кузова может привести к ухудшению жёсткости и устойчивости. Например, усталостное разрушение приводит к невозможности отрегулировать сход-развал, так как постаревший металл перестаёт держать нагрузку, в связи с чем после настройки углы установки колёс выходят за допустимую погрешность. В крайних случаях у кузова от чрезмерных нагрузок образуются трещины. Чаще всего данный эффект проявляется в районе опор стоек подвески. При несвоевременном обнаружении данного дефекта это может стать причиной аварии, например, у случая разрушения кронштейна рычага подвески, что приводит машину в неуправляемое состояние. Также ослабленный кузов не способен эффективно поглотить энергию удара, в случае аварии защита пассажиров может оказаться недостаточной.

GLARE в настоящее время является наиболее успешным FML (Fiber metal laminate – металловолоконный (металлополимерный) ламинат, слоистый пластик; СИАЛ[1, 2]), запатентованным Akzo Nobel в 1987 году. В качестве изобретателей в патенте упоминаются Робрукс и Фогелсанг, два бывших профессора факультета аэрокосмической техники Делфтского технологического университета, где большая часть исследований и разработок для GLARE проводилась в 1970-х и 1980-х годах [3].

В России разработками материала типа GLARE занимается ВИАМ, где разработаны несколько типов алюмокомпозитов СИАЛ 1-1, СИАЛ 2-1, СИАЛ 3-1 и другие, а также металлополимерных материалов на основе титана (титанокомпозит (ТИОП); титаноуглепластик (ТИГРАН)) и алюмоуглепластики [2].