

УДК 629.7.063(075.8)

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ТЕРМОСИЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

© 2019 г. В. А. Афанасьев¹, П. В. Никитин¹ *, О. В. Тушавина¹ **

¹Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*E-mail: petrunecha@gmail.com

**E-mail: solgtu@gmail.com

Поступила в редакцию 10.05.2017 г.

После доработки 13.12.2017 г.

Принята к публикации 13.03.2018 г.

Выполнено экспериментальное моделирование механизма разрушения углеродных теплозащитных материалов (полиграфиты и углеродные композиты) с шероховатой поверхностью при обтекании сверхзвуковым высокотемпературным воздушным потоком. При больших скоростях набегающего потока шероховатость таких материалов может соответствовать толщине пограничного слоя. Такие свойства поверхности способствуют более интенсивному разрушению материалов вследствие механического уноса массы, обусловленного газодинамикой течения и термохимическими процессами на шероховатой поверхности. Настоящая работа посвящена анализу методов и средств исследования в наземных условиях механизма разрушения углеродных теплозащитных материалов, которые могут быть использованы в конструкции тепловой защиты изделий ракетно-космической и высокоскоростной авиационной техники.

DOI: 10.1134/S004036441904001X

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение тепловой защиты при полете гиперзвуковых летательных аппаратов в плотных слоях атмосферы определяется комплексом экстремальных внешних термо-газодинамических и тепловых факторов, воздействующих на поверхность тепловой защиты. В результате этого воздействия в объеме тепловой защиты реализуется ряд внутренних факторов, возникающих в качестве реакции материала на такие воздействия.

В ряде работ [1–3] показано, что моделирование на газодинамических стендах натуральных условий теплосилового воздействия (внешних факторов) можно осуществить лишь в ограниченном диапазоне критериев Маха (M) и Рейнольдса (Re). Как правило, на стендах скорость истечения высокотемпературного потока соответствует $M \leq 5$. Расчеты показывают, что для увеличения критерия Маха до $M > 6$ требуются громадные значения параметров воздуха в форкамере электродугового нагревателя газа – плазмотрона: давление $P_k > 30$ МПа, температура газа $T_k \geq 10^4$ К. Нереальность таких параметров приводит к отказу от моделирования по критерию Re , пропорциональному давлению торможения. Все это вынуждает строить принципиально новую методологию воспроизведения в эксперименте теплосиловых факто-

ров воздействия на тепловую защиту гиперзвуковых летательных аппаратов.

Интенсивное эрозионное разрушение поверхностного слоя тепловой защиты, выполненной, например, из углеродных материалов, может происходить в результате воздействия силовых факторов, обусловленных поверхностным касательным напряжением и силами напорного давления. В зависимости от условий, в которых происходит обтекание, интенсивность эрозии может значительно изменяться при гиперзвуковых скоростях (температурах) потока. В таких условиях термоэрозионное разрушение углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) сопровождается интенсивными гетерогенными процессами химического реагирования углерода с активными компонентами набегающего потока, процессами сублимации, а также возникающими термическими и газодинамическими напряжениями.

В работах [4–6] проведено исследование теплоэрозионного разрушения полиграфитов при обтекании исследуемого образца сверхзвуковым высокотемпературным газовым потоком. Предложенная при этом авторами модель разрушения углеродных материалов строится с учетом влияния шероховатости поверхности. Установлено, что даже в случае стационарности процесса обте-

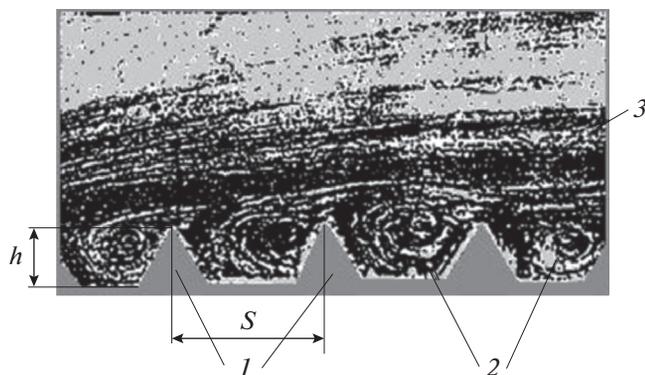


Рис. 1. Картина обтекания потоком газа модели, имитирующей шероховатость поверхности: 1 – выступы – имитаторы шероховатости, 2 – картина вихревого течения во впадинах, 3 – газовый поток над поверхностью.

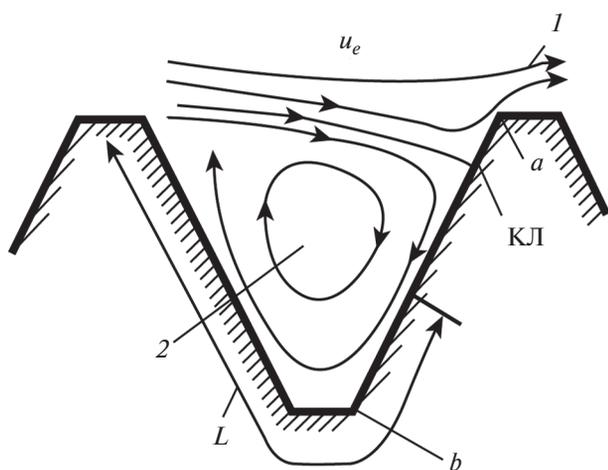


Рис. 2. Схема течения во впадине при большой скорости набегающего потока: 1 – набегающий поток, 2 – вихревое течение во впадине, u_e – скорость потока в пограничном слое над выступами, ab – наветренная сторона выступа, КЛ – критическая линия на наветренной поверхности впадины, L – длина поверхности впадины.

кания образца шероховатость способствует развитию в аномалиях поверхности нестационарных процессов, аналогичных течению газа в отрывных зонах. Это приводит к возникновению пульсирующего движения газового потока между выступами и впадинами на шероховатой поверхности. Теплообмен и трение на шероховатых поверхностях широко исследовались в [7–9].

В данной работе для более глубокого понимания механизма термохимического и силового разрушения углеродных теплозащитных материалов анализируются особенности газодинамики течения потока на шероховатой поверхности и ее влияния на теплообмен.

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ НА ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Картина течения при обтекании модели, имитирующей шероховатость поверхности высотой $h = 0.5$ мм и шагом шероховатости $S = 1.5$ мм, представлена на теневой фотографии (рис. 1), полученной в ходе эксперимента. Параметры набегающего потока в зоне обтекания плоской модели следующие: энтальпия торможения потока $I_0 = 1.42 \times 10^4$ кДж/кг, давление торможения $P_0 = 5 \times 10^4$ Па, температура поверхности модели $T_w = 2170$ К.

Схема вихревого течения во впадине при критерии Рейнольдса $Re_{w,h} = \rho u_e h / \mu > 530$ изображена на рис. 2.

Течение газового потока 3 (рис. 1) вдоль шероховатой поверхности 1 сопровождается образованием вихревых течений 2 во впадинах. Это значит, что наличие на поверхности шероховатости вносит дополнительные возмущения в течение в пограничном слое. Последнее способствует потере устойчивости ламинарного режима. Уровень возмущений, вызываемых шероховатостью, зависит от высоты выступов h (рис. 1) и параметров набегающего потока 3, а значит, и от значения критерия Рейнольдса.

По результатам анализа экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, установлено, что при малых числах Рейнольдса ($Re_{w,h} < 100$) возмущения, вызываемые шероховатостью, по своей интенсивности не оказывают заметного влияния на процессы теплообмена и трения в пограничном слое. Влияние шероховатости на указанные процессы становится заметным начиная с некоторого значения, которое в данном случае составляло 1200.

Результаты экспериментов с ламинарным пограничным слоем показали, что теплообмен и трение при шероховатой поверхности в области значений $Re_h < 100$ на 10–15% меньше, чем при гладкой поверхности и прочих равных условиях. С увеличением значений $Re_{w,h}$ теплообмен и трение возрастают и достигают при $Re_{w,h} = 100$ значений, соответствующих гладкой поверхности, а затем превосходят их. В диапазоне значений $100 < Re_{w,h} < 530$ реализуется переходный режим. Установлено, что в этом интервале значений критерия Рейнольдса происходит постепенное развитие вихревого течения на шероховатой поверхности наступает при $Re_{w,h} > 530$. При этом в случае плотной шероховатости (малый шаг S) во впадине наблюдается одновихревое течение, при котором центр вихря примерно соответствует центру впадины (рис. 2).

На наветренной стороне выступа ab образуется критическая линия, от которой происходит растекание потока в направлении вершины выступа и его основания (рис. 2).

Таким образом, распределение давления во впадине имеет весьма сложный характер. На наветренной стороне выступа уровень давления значительно превосходит значение на подветренной стороне. При наличии возмущений во внешнем потоке, омывающем поверхность, распределение сил давления приобретает переменный, циклический характер. Все это говорит о том, что шероховатость углеродных теплозащитных материалов может вносить заметный вклад в механизм поверхностного разрушения тепловой защиты. Это, прежде всего, объясняется тем, что основную роль в процессе обтекания шероховатой поверхности высокоскоростным потоком начинает играть сопротивление формы, а не сопротивление трения, как на гладкой поверхности.

В случае шероховатой поверхности существенно меняется механизм действия газодинамических сил. Экспериментальные исследования позволили установить, что модель течения, представленная на рис. 2, характерна для поверхности тепловой защиты, выполненной из поликристаллических графитов, а также и для углерод-углеродных композиционных материалов с шероховатой поверхностью. Нетрудно показать, что в условиях реального полета гиперзвуковых летательных аппаратов значения критерия $Re_{\eta} \gg 530$.

В дальнейшем проанализируем влияние шероховатости на механизм разрушения поликристаллических графитов при обтекании сверхзвуковым высокотемпературным потоком. Однако вначале установим природу образования шероховатости на поверхности углеродных теплозащитных материалов при взаимодействии с высокотемпературным химически активным газовым потоком. Очевидно, эта природа определяется химическим гетерогенным реагированием графитов и УУКМ с кислородом и атомами азота набегающего высокотемпературного потока воздуха [2].

Как известно, принцип технологического процесса создания поликристаллических графитов и углерод-углеродных композиционных материалов таков: связующее – кристаллические зерна углерода (в случае графитов) или углеродная ткань (в случае УУКМ), – скрепляется в единое целое наполнителем – конденсированным углеродом. При этом структурные исследования показывают, что плотность кристаллических зерен, так же как и плотность нитей углеродной ткани, значительно превышает плотность наполнителя (пористого углерода). В таком случае пористый углеродный наполнитель, вступая в химическое реагирование с кислородом набегающего потока, разрушается (выгорает) более интенсивно, чем плот-

ная углеродная ткань. В результате этого процесса на поверхности полиграфитов и УУКМ появляются выступы (зерна углерода или углеродная ткань) и впадины (выгоревший пористый углерод).

Далее проанализируем особенности конвективного теплообмена на шероховатой поверхности углеродных теплозащитных материалов.

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В теории конвективного теплообмена и классической газовой динамике при анализе течения газа на гладкой пластине с использованием аналогии между теплообменом и трением зависимость между безразмерным коэффициентом теплообмена и коэффициентом трения легко получается в виде аналитического критерия Стантона (критерий Стантона)

$$St = 0.5C_f Pr_w^{-2/3}, \quad (1)$$

где C_f – коэффициент аэродинамического сопротивления.

В отдельных случаях делаются попытки использовать соотношение (1) для расчета теплообмена на шероховатой поверхности. Это неправильный подход, не подтверждаемый экспериментальными исследованиями. Дело в том, что при обтекании гладкой поверхности в процессе теплообмена большое значение имеет сопротивление поверхностного трения, в то время как при течении газа у шероховатой поверхности основную роль начинает играть сопротивление формы. При прочих равных условиях конвективный теплообмен на гладкой стенке должен заметно отличаться от теплообмена на шероховатой поверхности (рис. 3).

Как видно, значения критерия Стантона $St_{гд}$, вычисленные для гладкой пластины, существен-

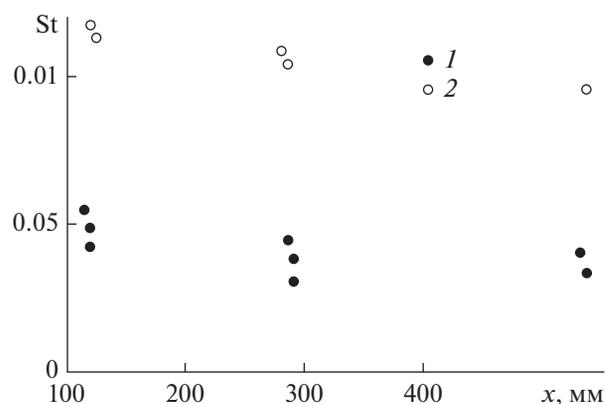


Рис. 3. Сравнение теплообмена на гладкой (1) и шероховатой (2) поверхностях.

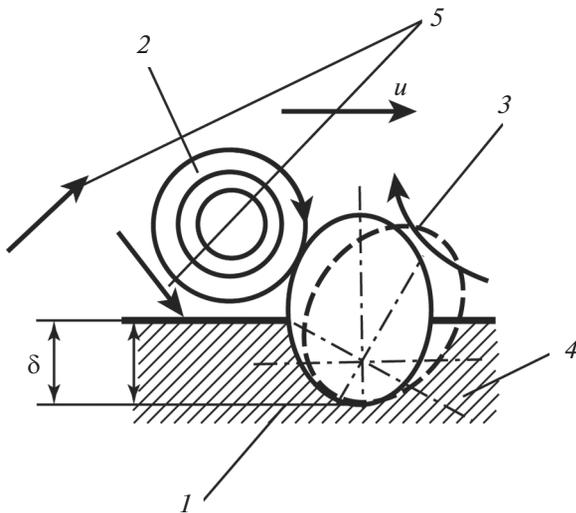


Рис. 4. Модельная схема силового воздействия газодинамических вихрей на стенки выступов шероховатой поверхности: 1 – выступ, углеродная нить или зерно; 2 – вихрь с наветренной стороны; 3 – вихрь с подветренной стороны; 4 – УУКМ или графит; 5 – поверхностные касательные напряжения; u – скорость набегающего потока; δ – глубина сцепления нити наполнителем.

но отличаются от $St_{\text{шер}}$, рассчитанного по измеренной в эксперименте величине коэффициента теплоотдачи для шероховатой поверхности.

Таким образом, при обтекании шероховатой пластины нельзя для расчета теплообмена и трения использовать зависимости, полученные для гладкой поверхности.

Из проведенных в работе [7] результатов исследований теплообмена и трения на шероховатой поверхности можно сделать важный для инженерной практики вывод относительно минимальной шероховатости поверхностей летательных аппаратов, обтекаемых потоками большой скорости. Расчет теплообмена для разной шероховатости поверхностей выполнен при следующих допущениях.

При расчете теплообмена под допустимой высотой шероховатости $h_{\text{кр}}$ понимается тот предельный размер выступов, при котором наблюдается при прочих равных условиях увеличение теплового потока по сравнению с тепловым потоком на гладкой пластине. Критическая величина выступа $h_{\text{кр}}$ определяется по соотношению

$$Re_{\text{кр}} = \frac{\rho u h_{\text{кр}}}{\mu_{\text{впад}}} = 100,$$

где $\mu_{\text{впад}}$ – коэффициент динамической вязкости газа во впадине, определяемый по температуре газа во впадине; u – скорость на внешней границе пограничного слоя.

Предельная величина выступов для отдельных случаев имеет следующие значения:

– $h_{\text{кр}} = 5 \times 10^{-6}$ м при полете сверхзвукового самолета со скоростью $1 < M < 2$ на небольшой высоте с давлением $P_{\text{н}} = 1.0 \times 10^5$ Па;

– $h_{\text{кр}} = 1.7 \times 10^{-6}$ м при полете гиперзвукового самолета на высоте $H = 40$ км.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОСИЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Опытные данные, полученные в ряде работ, указывают на то, что шероховатость теплозащитного покрытия может двояким образом оказывать влияние на интенсификацию процесса разрушения углеродных теплозащитных материалов:

– шероховатость интенсифицирует теплообмен вследствие перехода ламинарного режима течения в турбулентный;

– образование выступов и впадин на поверхности вызывает неравномерное, циклическое силовое воздействие вихрей потока на выступы, ослабляя их механическую прочность и вызывая выкрашивание частиц материала с поверхности в форме механического (силового) уноса.

В результате образования вихрей вдоль стенок выступов с наветренной и подветренной сторон образуются разные по величине силы поверхностного трения, создающие на выступе крутящий момент. Как известно, при обтекании реальных (шероховатых) тел сверхзвуковыми потоками течение на поверхности нестабильное. Появляются зоны отрывных течений. Кроме того, согласно законам аэродинамики, на поверхности тел возникают акустические волны (колебания). Все эти факторы являются причиной возникновения периодического изменения сил трения на стенках выступов, вызывая их механическую эрозию. Модельная схема механического, силового воздействия вихрей на стенки выступов разрушающегося поликристаллического графита или УУКМ показана на рис. 4.

Видно, что касательные напряжения, распределенные по поверхности выступа, создают крутящий момент, который стремится вырвать выступ из зоны его заделки в объеме наполнителя. Такое силовое воздействие на структуру теплозащитного материала усугубляется, когда аэродинамическая силовая нагрузка изменяется во времени и становится периодической.

Кроме того, известно, что выступы, как любое тело, имеют собственную, резонансную частоту колебаний. В свою очередь, частота колебаний аэродинамических сил, образованных вихрями на стенке выступа, может рассматриваться как частота возмущающих колебаний по отношению

к зернам (нитям) поверхностного слоя материала. Под действием возмущающих периодических сил зерна (нити) переходят в вынужденные колебания, частота которых определяется частотой колебаний возмущающей силы. Эти колебания разупрочняют сцепление выступа, вызывая, в конечном счете, его выкрашивание. Таков механизм разрушения композиционных углеродных теплозащитных материалов получил наименование теплосилового.

Микроструктурное исследование графитовых материалов, испытанных в высокотемпературном химически нейтральном потоке аргона, показало, что в поверхностном слое образцов наблюдаются структурные изменения, характерные для усталостного разрушения поликристаллических материалов. К таким изменениям относятся каверны удаленных графитовых зерен или нитей, полосы скольжения зерен по поверхности, микротрещины, разукрупнение зерен и др.

Таким образом, модель эрозионного разрушения углеродных теплозащитных материалов, например поликристаллического графита, представляет собой процесс усталостного разрушения поверхностного слоя материала.

Поскольку углерод-углеродные композиционные материалы по химическому составу и отчасти по структуре близки к полидисперсному графиту, закономерность эрозионного разрушения графита можно распространить на механизм разрушения УУКМ. При этом структуру этих материалов следует рассматривать как механическую систему, отдельные элементы которой (зерна матрицы или волокна каркаса) подвергаются усталостному разрушению под действием пульсирующих нагрузок при обтекании высокотемпературным газовым потоком.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изложенная выше картина газодинамического течения на шероховатой поверхности и сопутствующее ему механическое разрушение углеродных теплозащитных материалов с определенной степенью приближения может быть описана уравнениями механики сплошной среды: движения и неразрывности [8, 9]

$$\text{Re} \frac{d\bar{V}}{d\tau} = -\text{grad} \bar{P} + \nabla^2 \bar{V}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\bar{\rho} \bar{V}) = 0,$$

где $\bar{V} = V/V_\infty$ – безразмерная скорость, V – скорость набегающего потока, ρ – плотность газа в пограничном слое, $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_\infty}$, $\bar{P} = \text{EuRe}$ – безразмерное давление, $\bar{\tau} = 1/\text{Sh}$ – безразмерное время,

$\text{Eu} = P/\rho V_\infty^2$ – критерий Эйлера, $\text{Sh} = h/\tau V_\infty$ – критерий Струхалю, τ – характерное время (период пульсаций течения во впадинах).

Записанная система дифференциальных уравнений решается численным методом с граничными, крайевыми условиями, удовлетворяющими концепции автомодельности вязкого течения с линейным законом изменения скорости невозмущенного потока около твердой поверхности.

Решение представляется критериальными уравнениями, характеризующими периодическое изменение аэродинамической силовой нагрузки по поверхности теплозащитного материала. В общем случае такое решение имеет вид

$$\text{Sh} = F_\tau(\bar{h})^{-1}, \quad (2)$$

$$\text{Eu Re}_h = F_p(\bar{h}), \quad (3)$$

где $\bar{h} = l/h$ – безразмерная координата по поверхности выступа высотой h .

Соотношение (2) описывает распределение инерционных силовых нагрузок на выступ, обусловленных периодичностью аэродинамических поверхностных напряжений.

Критериальное соотношение (3) представляет собой распределение силовых нагрузок, вызванных неравномерностью распределения давления по поверхности выступа.

Полученные решения (2) и (3) позволяют после серии соответствующих выкладок вывести зависимость для частоты пульсаций аэродинамических сил на шероховатой поверхности. Оказалось, что частота пульсаций пропорциональна поперечному градиенту скорости потока у шероховатой поверхности. В общем случае эта зависимость имеет вид

$$\omega = C(dV/dy)_{y=0}, \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Вопросу определения коэффициента пропорциональности C в (4) посвящена работа [10]. В [10] проведено экспериментальное исследование по моделированию течения газа около шероховатой поверхности в гидротомке на моделях. Неровности на поверхности моделей выполнялись в соответствии с условием геометрического подобия шероховатой поверхности графита [11]. Анализ результатов исследования показал, что в качестве коэффициента пропорциональности можно с достаточной точностью использовать критерий Струхалю. В таком случае выражение (4) принимает вид

$$\omega = \text{Sh}(dV/dy)_{y=0}. \quad (5)$$

УСЛОВИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полученное выражение позволяет сделать важные рекомендации для моделирования теплоэрозионного разрушения углеродных теплозащитных материалов с шероховатой поверхностью. Согласно (5), при моделировании теплосилового воздействия не накладывается каких-либо ограничений относительно, например, химического состава набегающего потока или размера и формы исследуемой модели [12]. Необходимо лишь обеспечить выполнение следующего физического условия:

$$\frac{\omega_{\text{Мод}}}{\omega_{\text{Натур}}} = \left. \left(\frac{dV}{dy} \right) \right|_{y=0} \Big|_{\text{Мод}} / \left. \left(\frac{dV}{dy} \right) \right|_{y=0} \Big|_{\text{Натур}}. \quad (6)$$

Последнее означает, что в процессе моделирования необходимо установить соотношение между частотой пульсаций на модели и натурном объекте. Как видно, соотношение (6) определяется уровнями градиентов скорости в соответствующих точках на модели и натурном высокоскоростном летательном аппарате. Если далее обеспечить в эксперименте условие линейности профиля скорости у поверхности модели, то можно принять

$$\left(\frac{dV}{dy} \right)_{y=0} = u_e / h. \quad (7)$$

Таким образом, для обеспечения моделирования теплосилового воздействия при течении газа около шероховатой поверхности необходимо выполнить следующие условия подобия на модели и натурном объекте:

- геометрическое подобие профилей выступов на шероховатых поверхностях;
- линейность профиля скорости у поверхности материала для выполнения условия (7);
- режим обтекания – ламинарный или турбулентный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ особенностей газовой динамики течения на шероховатой поверхности углерод-углеродных композиционных материалов. Показано, что образование в результате аэродинамического нагрева на поверхности углеродных теплозащитных материалов выступов и впадин существенно изменяет структуру пограничного слоя.

2. Проведен анализ конвективного теплообмена на шероховатой поверхности теплозащитных

материалов углеродного класса. Установлен механизм теплосилового эрозии углеродных материалов в условиях воздействия сверхзвуковым высокотемпературным воздушным потоком.

3. В результате анализа физической модели установлены условия моделирования эрозионного разрушения углеродных теплозащитных материалов. Предложена математическая модель эрозионного разрушения углеродных теплозащитных материалов с учетом частоты пульсаций потока на шероховатой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полежаев Ю.В., Шишков А.А.* Газодинамические испытания тепловой защиты. Спр. М.: Промедэк, 1992. 250 с.
2. *Никитин П.В.* Тепловая защита. Учеб. высш. школы. М.: МАИ, 2006. 510 с.
3. *Никитин П.В.* Разрушение графитов неоднородной структуры в режиме интенсивной сублимации. В кн.: *Высокотемпературный тепло- и массоперенос.* Минск, 1975. С. 248.
4. *Ханин М.В., Крагельский И.В.* Единство механизмов эрозионного разрушения материалов при трении и обтекании их поверхности потоком жидкости или газа // *ДАН СССР.* 1968. Т. 181. № 6. С. 1372.
5. *Звягин Ю.В.* Химическая эрозия искусственных графитов в потоке химически активного газа. В кн.: *Вопросы теории горения.* М.: Наука, 1970. С. 108.
6. *Афанасьев В.А., Никитин П.В., Тушавина О.В., Чудецкий Ю.В.* Проблемы испытаний углерод-углеродных композитов для тепловой защиты высокоскоростных ЛА // *Полет.* 2004. № 3. С. 40.
7. *Крюков В.Н., Солнцев В.П.* Исследование теплообмена на шероховатой пластине. В кн.: *Тепло- и массоперенос.* Т. 5. Ч. 1. Минск: АН БССР, 1972. С. 57.
8. *Шлигтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 203 с.
9. *Ханин М.В.* Исследование механизма эрозии разрушения поликристаллического графита // *ДАН СССР.* 1966. Т. 168. № 6. С. 201.
10. *Авдуевский В.С., Галицкий Б.М., Данилов Ю.И. и др.* Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. Авдуевского В.С., Кошкиной В.К. М.: Машиностроение, 1991.
11. *Менделеев В.Я.* Влияние ориентации канавок шероховатости на спектральную отражательную способность поверхности в диапазоне длин волн теплового излучения // *ТВТ.* 2016. Т. 54. № 3. С. 371.
12. *Амиров Р.Х., Киселев В.И., Менделеев В.Я., Полищук В.П. и др.* Образование расплава на поверхности графитовых электродов в диффузном дуговом разряде // *ТВТ.* 2016. Т. 54. № 5. С. 681.