

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА НА ПЕРЕХОД ЭРОЗИЯ–НАПЫЛЕНИЕ*

Т.В. ЕРШОВА², В.Ф. КОСАРЕВ¹, Д.С. МИХАТУЛИН²

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Институт высоких температур РАН, Москва*

Публикация является продолжением работ, посвященных проблемам гетерогенных технологий. Изучается вопрос параметров, определяющих переход от эрозии поверхности к напылению частиц на нее. В частности, экспериментально исследуется влияние температуры сверхзвукового гетерогенного потока (температуры несущего газа и температуры содержащихся в нем частиц), взаимодействующего с обтекаемой преградой, на возможность реализации разрушения поверхности преграды или напыления частиц на эту поверхность.

ВВЕДЕНИЕ

Желание подробно исследовать переход от разрушения поверхности к напылению на нее при обтекании тел сверхзвуковым гетерогенным потоком появилось у исследователей в результате накопления экспериментально-теоретического материала при изучении каждого из этих процессов. Названные явления исследованы достаточно подробно, разработаны теоретические модели, позволяющие предсказать отдельные аспекты взаимодействия гетерогенных потоков с преградами различной формы [1–4], немало публикаций посвящено теплообмену, эрозии и напылению частиц на обтекаемую поверхность [5–16]. Анализ этих и других результатов показал, что приблизительно при одинаковых параметрах взаимодействия может реализовываться и процесс эрозии и процесс напыления. Появились первые публикации, в которых пока только ищутся подходы к этой проблеме, сравниваются методики исследований в том и другом случае [17, 18]. В работе [17] рассматриваются газодинамические проблемы, в работе [18] — проблемы взаимодействия частиц с преградой. В настоящей работе переход эрозия–напыление будем изучать на примере исследования взаимодействия с поверхностью сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока (продукты сгорания + частицы окиси алюминия) со стороны теплоэрозионного разрушения. Настоящая статья, конечно, не решает проблему перехода эрозия–напыление, но делает определенный шаг в этом направлении.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-16603).

ВОЗМОЖНЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

В основу физической модели теплоэрозионного разрушения материалов положено предложение, высказанное в работе [19] и существенно упрощающее схему изучаемого процесса. Предполагается, что суммарный унос массы при комплексном воздействии потока на поверхность тела состоит из трех составляющих — теплохимической, эрозионной и газомеханической: $G_{\Sigma} = G_T + G_{er} + G_M$. При низких давлениях торможения перед обтекаемым телом ($p_0 \leq 6,0$ МПа) последней составляющей можно пренебречь. Если температура гетерогенного потока меньше температуры теплового разрушения, первым слагаемым также можно пренебречь. В рассматриваемой модели все частицы сгруппированы в некие эшелоны, последовательно подходящие по нормали к поверхности тела (рис. 1).

Количество частиц в эшелоне выбирается таким, чтобы обеспечить полное перекрытие экспонируемой поверхности тела. В процессе взаимодействия с преградой каждый такой эшелон частиц мгновенно сносит слой материала толщиной δ_{er} . Поэтому температура в каждой точке поверхности меняется циклически. Снос слоя прогретого материала приводит к мгновенному падению температуры поверхности до значения на глубине δ_{er} и прекращению теплового уноса массы. В течение некоторого времени τ_T после удара происходит нестационарный конвективный нагрев неразрушающейся поверхности до температуры теплового разрушения $T_w = T_m$. Если этот период времени больше интервала между последовательными соударениями частиц τ_{er} , то теплохимическое разрушение так и не начнется, а суммарный унос будет включать только эрозионную составляющую. Если τ_T меньше τ_{er} , тогда тепловой унос будет иметь место, но лишь после установления на поверхности температуры теплохимического разрушения T_m и до следующего соударения, т. е. его интенсивность будет заметно меньше, чем при чисто теплохимическом разрушении.

На рис. 2 показана зависимость изменения суммарной скорости уноса массы в зависимости от плотности потока массы (при постоянной плотности потока массы газа — от концентрации) частиц в потоке.

Допустим, что эрозионная стойкость материала не зависит от его нагрева. Тогда зависимость $G_{er}(G_p)$ будет линейной, а теплохимическая компонента G_T будет

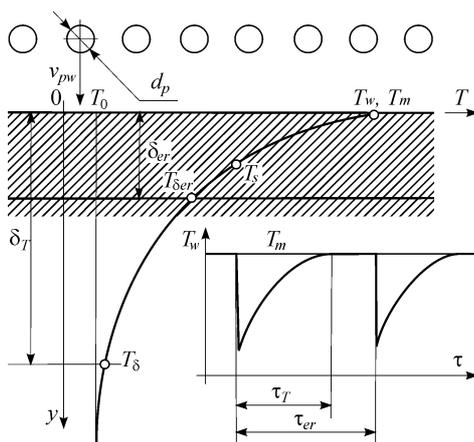


Рис. 1. Схема взаимодействия эшелона частиц с поверхностью преграды при теплоэрозионном воздействии.

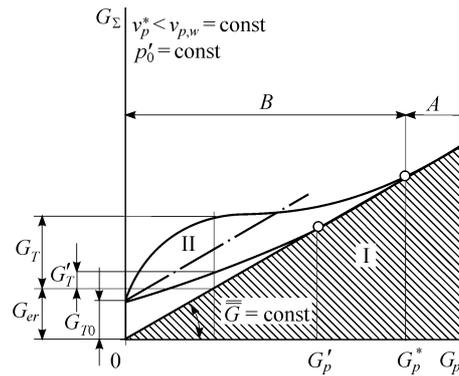


Рис. 2. Схема теплоэрозионного разрушения материалов.

Области: эрозионного механизма разрушения (А), теплоэрозионного механизма разрушения (В), эрозионной компоненты разрушения (заштрихованная) (I), тепловой компоненты разрушения (II).

уменьшаться. Но учитывая, что с ростом концентрации частиц в потоке конвективный теплообмен увеличивается [5], зависимость $G_T(G_p)$ будет иметь экстремум. То есть теплоэрозионный механизм разрушения переходит в теплехимический при $G_p = 0$ и в чисто эрозионный при G_p^* . На схемах рис. 3 показано изменение теплехимической компоненты разрушения, температуры поверхности и профиля температуры в поверхностном слое при переходе от чисто теплехимического разрушения к теплоэрозионному, а затем к чисто эрозионному, с увеличением концентрации частиц в потоке, т. е. с уменьшением времени между ударами частиц τ_{er} . Таким образом, концентрация частиц является одним из определяющих параметров процесса теплоэрозионного разрушения, отвечающим за переход между механизмами разрушения.

Определяющими параметрами являются также скорость удара и размер частиц. При их увеличении частица проникает на большую глубину внутрь материала, в его менее нагретые слои. Увеличение глубины кратера приводит к увеличению времени нагрева поверхностного слоя τ_T , которое, в конце концов, приведет к той же ситуации $\tau_{er} < \tau_T$, и теплоэрозионный механизм разрушения перейдет в чисто эрозионный. При наличии зависимости эрозионной стойкости материала от температуры прогрева поверхностного слоя зависимость $G_{er}(G_p)$ уже не будет линейной.

Физическая модель теплоэрозионного разрушения материалов позволила построить концепцию его математической модели, которая подробно описана в работе [5]. Здесь вводится понятие критерия теплового подобия при стационарном теплоэрозионном разрушении материалов E . Оно получено из сравнения величин, характеризующих линейную скорость разрушения поверхности (δ_{er}/τ_{er}) и скорость распространения в материале разрушаемой стенки тепловой волны (δ_T/τ_T).

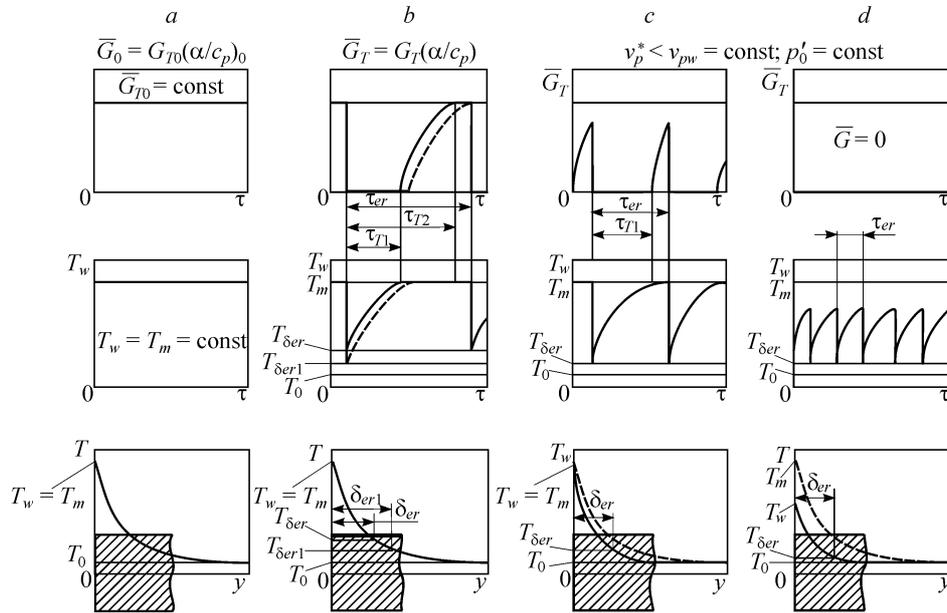


Рис. 3. Схемы изменения интенсивности теплехимического уноса \bar{G} , температуры поверхности T_w и температурного поля внутри испытываемого образца.

a — теплехимический механизм разрушения, b и c — теплоэрозионный механизм разрушения, d — эрозионный механизм разрушения.

После подстановки в это соотношение составляющих его величин из работы [5] получается такое выражение:

$$E = \frac{\delta_{er}}{\delta_T} \frac{\tau_T}{\tau_{er}} = \left[\frac{G_p v_{pw}^2}{2q_\Sigma} \right]^2 \left[\frac{c_M (T_w - T_{1-s}) + \Delta Q_w + \Gamma \gamma (H_e - h_w)}{H_{er}} \right]^2 \left[\frac{G_T}{G_{er}} + 1 \right]$$

или в отсутствии теплхимического уноса массы более простая формула:

$$E = \left[\frac{G_p v_{pw}^2}{2q_\Sigma} \right]^2 \left[\frac{c_M (T_w - T_{1-s})}{H_{er}} \right]^2.$$

В эти выражения входят все описанные раньше определяющие параметры изучаемой задачи. В первой скобке стоит отношение воздействующих факторов набегающего потока — эрозионного (плотность потока кинетической энергии частиц) и теплового (уровень поглощенного стенкой тепла). Во второй скобке находится отношение свойств материала, характеризующих эту энергию, — эрозионную в знаменателе (эффективная энтальпия эрозионного разрушения) и тепловую в числителе (эффективная энтальпия теплхимического разрушения). Видно, что число E представляет собой отношение количества рассеянной вследствие эрозионного разрушения тепловой энергии поверхностного сносимого слоя толщиной δ_{er} к количеству накопленной тепловой энергии в прогретом слое толщиной δ_T .

На основе обобщения большого экспериментального материала с использованием предложенного критерия теплового подобия E получен график (рис. 4), на котором представлены данные для материалов с большими различиями в теплофизических и переносных свойствах (от меди до стеклопластика).

Металлы характеризуются низким значением числа E . Для них характерна близость температуры поверхности T_w и среднеинтегральной температуры сносимого слоя T_s (безразмерная среднеинтегральная температура $\theta_s \approx 1$). У стеклопластиков

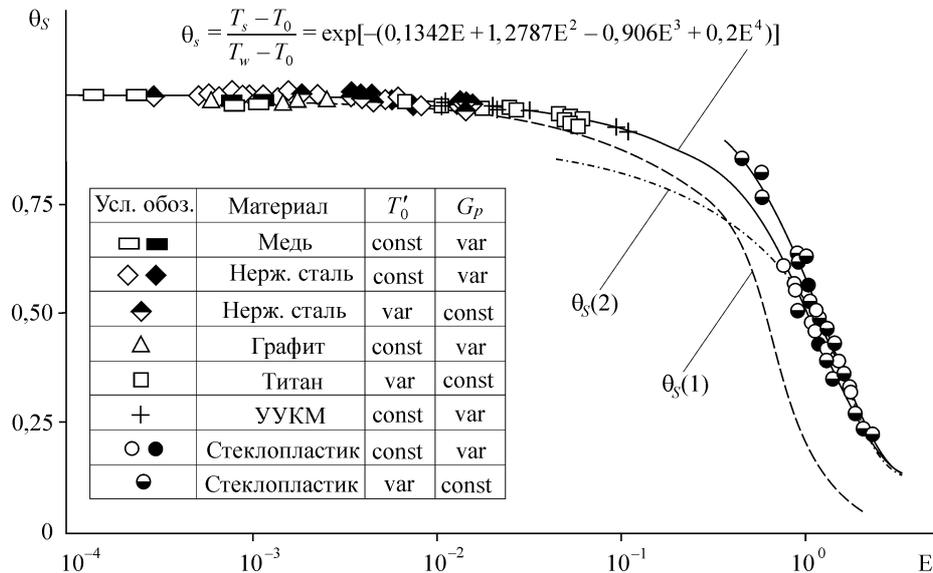


Рис. 4. Зависимость от числа E безразмерной среднеинтегральной температуры поверхностного слоя материалов, реализующейся при их испытаниях в сверхзвуковом высокотемпературном гетерогенном потоке.

наблюдается расслоение зависимостей $T_s(E)$ и $T_w(E)$. При этом температура поверхности T_w достигает температуры теплохимического разрушения T_m вплоть до критического значения числа $E^* \approx 1$. Критическое значение делит рис. 4 на две области, характерные для теплоэрозионного ($E < E^*$) и эрозионного ($E \geq E^*$) механизмов разрушения. Значение числа $E = 0$ определяет область теплохимического механизма разрушения. Таким образом, теплохимический и эрозионный механизмы разрушения являются частными случаями теплоэрозионного механизма.

Как указывалось выше, одним из определяющих параметров процесса теплоэрозионного разрушения является интенсивность конвективного теплообмена при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного потока с обтекаемой поверхностью, которая существенно зависит от температуры набегающего потока. Далее приведены экспериментальные данные зависимости теплоэрозионного разрушения двух принципиально отличающихся материалов — стеклопластика и нержавеющей стали, от температуры набегающего гетерогенного потока.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные исследования зависимости H_{er} от среднеинтегральной температуры T_s проводились на стенде комплексных теплоэрозионных исследований, подробно описанном в работе [20]. Там же описаны измерительная система и методика проведения испытаний. Для работы, представленной в настоящей статье, стенд был существенно доработан с целью расширения диапазона изменения температуры продуктов сгорания (900–3200 К). В форкамеру стенда вводились частицы окиси алюминия со средним размером 50 мкм.

Механизм эрозионного разрушения в отличие от теплохимического обусловлен разрывом механических связей материала стенки на значительной глубине, соизмеримой с размером ударяющей частицы d_p (см. рис. 1). При этом в процессе участвуют слои материала при различных температурах, а, следовательно, имеющие различную энергию разрыва связей. При неравномерном распределении температуры внутри материала стенки в момент удара в качестве параметра, определяющего тепловое состояние поверхностного сносимого слоя, предлагается среднеинтегральное по глубине кратера δ_{er} значение температуры

$$T_s = \frac{1}{\delta_{er}} \int_0^{\delta_{er}} T(y) dy.$$

Она достаточно полно характеризует тепловое состояние материала, с которым взаимодействует частица, поскольку учитывает многие параметры и условия взаимодействия, а именно: температурный профиль, реализующийся в материале в момент удара частицы; глубину образующегося кратера δ_{er} и через нее размер d_p и плотность материала ρ_p частицы, а также скорость соударения v_{pw} ; теплофизические, теплопрочностные характеристики материала частицы и преграды и т. п. Изменять температуру T_s в процессе испытания образцов материалов в гетерогенном потоке на газодинамической установке и изучать эрозионную стойкость материалов при различных температурах можно разными методами.

За основной метод исследования эрозионных характеристик материалов в зависимости от температуры прогрева материала в настоящей работе принят метод, основанный на изменении концентрации частиц в набегающем потоке. Зависимость уноса массы материала G_{er} от расхода частиц G_p в большинстве случаев ($v_p > v_p^*$) [10] линейна при обтекании тела холодным гетерогенным потоком, когда характеристики материала неизменны, а процесс эрозионного разрушения

установившийся [9]. Отсюда следует постоянство значений интенсивности \bar{G} и эффективной энтальпии H_{er} эрозионного разрушения. Однако при увеличении расхода частиц G_p в высокотемпературном гетерогенном потоке с постоянным расходом газа G_g , что равносильно увеличению их концентрации, среднеинтегральная температура сносимого слоя T_s уменьшается. Изменение теплового состояния поверхностного слоя приводит к изменению энергии разрыва механических связей, и поэтому должно повлиять на эрозионную стойкость материала. Аналогичным же образом ведет себя и тепловая компонента в суммарном теплоэрозионном уносе массы.

Достоинство предлагаемого метода испытаний заключается в том, что при изменении концентрации частиц в высокотемпературном потоке газа все остальные параметры потока остаются неизменными. Метод позволяет исследовать зависимость эффективной энтальпии эрозионного разрушения материалов от среднеинтегральной температуры T_s . При использовании этого метода можно добиваться значительных линейных скоростей разрушения и изменять температуру T_s в широких пределах. Результаты подобных исследований представлены в работе [5].

Следующим методом исследования теплоэрозионных характеристик материалов (построения зависимости H_{er} от T_s), является метод, основанный на изменении температуры потока. Температура в форкамере газодинамической установки может задаваться изменением соотношения компонентов химического топлива. С повышением температуры изменяется скорость разгона газа и частиц, химический состав газовой фазы (продуктов сгорания), температура и даже фазовое состояние и дисперсный состав частиц. Выделить влияние каждого фактора в отдельности на теплоэрозионный унос массы при использовании только этого метода исследования не представляется возможным. Им рекомендуется пользоваться только для сравнения результатов испытаний, полученных с помощью указанного метода, с результатами других исследователей или других методов.

Испытаниям при варьировании температурой газа в форкамере T_{00} на стенде комплексных теплоэрозионных исследований подвергались цилиндрические образцы с плоским торцом из двух принципиально разных материалов: нержавеющей стали 12X18H10T ($D_{ex} = 40$ мм) и стеклопластика СТКТ-П ($D_{ex} = 80$ мм). Результаты этих испытаний представлены на рис. 5. Число Маха на срезе сопла составляло около 2,3. Оно менялось в пределах первой “бочки” струи до величины 4,3 вблизи диска Маха, поскольку на срезе сопла струя существенно недорасширенная. Все испытания, представленные на рис. 5, проводились в пределах первой “бочки”, скорости и температуры частиц, как на срезе сопла, так и в момент соударения рассчитывались. Различие диаметров образцов учитывалось при приведении скорости удара частиц к одному значению.

Видно, что материалы ведут себя в этих условиях принципиально differently. С ростом температуры продуктов сгорания в форкамере интенсивность уноса

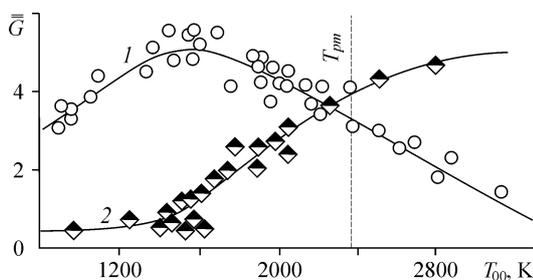


Рис. 5. Зависимость интенсивности эрозионного разрушения материалов от температуры газа в форкамере стенда на жидких химических компонентах в гетерогенном потоке.

Частицы Al_2O_3 , $D \approx 50$ мкм, $p'_0 \approx 3,5$ МПа. Обтекаемые тела: 1 — стеклопластик, 2 — нержавеющая сталь.

стеклопластика \overline{G} сначала (до $T_{00} < 1500$ К) увеличивается, а затем уменьшается. В то же время для нержавеющей стали с увеличением T_{00} отмечается увеличение \overline{G} до температуры плавления частиц $T_{00} \approx T_{pm} \approx 2350$ К с дальнейшей стабилизацией \overline{G} .

Следует отметить, что на поверхности стеклопластика сразу после испытаний при максимальной температуре рабочего тела в форкамере были заметны следы напыления окиси алюминия.

Различный характер поведения нержавеющей стали и стеклопластика при варьировании T_{00} можно объяснить изменением способности набегающего потока производить эрозионное разрушение материалов, то есть проявлением побочных эффектов, свойственных этому методу газодинамических исследований. Известно [21], что с ростом температуры происходит резкое падение прочностных свойств частиц тугоплавких окислов. Например, у используемой в настоящей работе окиси алюминия наблюдается 15-кратное уменьшение предела прочности в интервале температур 1500–1800 К. Наиболее вероятно, что именно это явление в основном влияет на эрозионные характеристики потока.

Данные расчетов, приведенные в работе [21], свидетельствуют о том, что при движении в форкамере установки частицы Al_2O_3 размером до 200 мкм приобретают температуру газа. Следует отметить, что на данной установке расплавленные частицы окиси алюминия практически невозможно перевести в твердое состояние даже при расширении потока в длинных соплах до больших чисел Маха, что объясняется выделением скрытой теплоты фазового перехода. Результаты численного исследования гетерогенных сверхзвуковых потоков показали, что частицы Al_2O_3 размером больше 10 мкм остаются жидкими в ядре струи ракетного двигателя на участке более 10 м за срезом сопла [22]. С другой стороны, известны работы (например, [23]), в которых на газогенераторах с более низкими параметрами продуктов сгорания, чем на стенде комплексных теплоэрозионных исследований, удается сохранить частицы Al_2O_3 в твердом состоянии.

Падение прочности частиц может сказываться, во-первых, на скорости разрушения модели, во-вторых, на разрушении потерявших свою прочность частиц из-за температурных напряжений, возникающих при вводе их в форкамеру, при их взаимодействии с конической дозвуковой частью сопла и, наконец, при взаимодействии между собой частиц разного размера, имеющих в сверхзвуковой части сопла разницу в скорости. Во всех перечисленных случаях разрушение частиц приводит к неопределенности их размера, и, следовательно, скорости их соударения.

Сравнение экспериментальных данных двух материалов различных классов позволяет выделить характеристику способности гетерогенного потока производить эрозионное разрушение, не зависящую от испытываемого материала. Имея зависимость $H_{er}(T_s)$ для стеклопластика, полученную, например, методом изменения концентрации частиц в потоке G_p [5], которую можно принять за базовую, появляется возможность обработать экспериментальные данные, полученные методом изменения температуры газа в форкамере T_{00} и оценить побочные явления этого метода. Сравнивая результаты испытаний стеклопластика и нержавеющей стали, попробуем выделить характеристику гетерогенного потока газодинамического стенда. Для этого необходимо полученную для стеклопластика зависимость $\overline{G}(T_{00})$ (см. рис. 5) привести сначала к одной скорости взаимодействия (рис. 6),

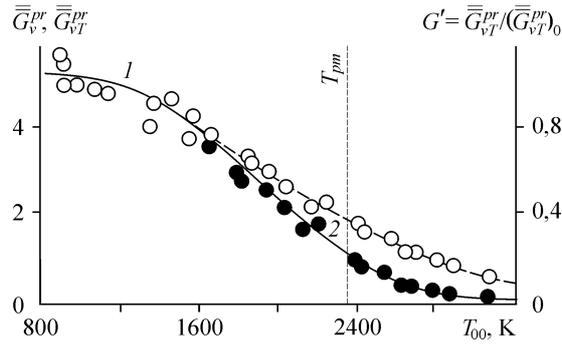


Рис. 6. Зависимость приведенной интенсивности эрозионного разрушения стеклопластика от температуры газа в форкамере: $T_{00}^{pr} = 1500$ К, $T_{pw}^{pr} = 1170$ м/с, $T_s^{pr} = 900$ К.

$$1 - G_v^{pr} = G \left[\frac{v_{pw}^{pr}}{v_{pw}} \right]^2, \quad 2 - G_{vT}^{pr} = G_v^{pr} \left[\frac{G^{pr}}{G(T_s)} \right], G'.$$

а затем исключить влияние температуры поверхностного слоя, приведя ее к одной величине (см. рис. 6) в соответствии с выражениями:

$$G_v^{pr} = G \left[\frac{v_{pw}^{pr}}{v_{pw}} \right]^2, \quad G_{vT}^{pr} = G_v^{pr} \left[\frac{G^{pr}}{G(T_s)} \right], \quad (1)$$

используя при этом $v_{pw}^{pr} = 1170$ м/с и зависимость $\overline{G}(T_s)$, полученную для стеклопластика методом изменения концентрации частиц в потоке [5]. Характерной особенностью полученной таким образом зависимости $\overline{G}'(T_{00}) = \overline{G}_{vT}^{pr} / \left(\overline{G}_{vT}^{pr} \right)_0$

$\left(\overline{G}_{vT}^{pr} \right)_0$ (интенсивность эрозионного уноса при $T_{00} = T_{00}^{pr} = 1500$ К) является ее слабая чувствительность к T_{00} при $T_{00} < 1500$ К, при которой частицы Al_2O_3 не разрушаются (что подтверждается взятием проб из потока), линейный характер уменьшения $\overline{G}'(T_{00})$ в диапазоне $T_{00} = 1500 - 2350$ К, то есть примерно от температуры, при которой частицы начинают терять свою прочность, до температуры их плавления; и, наконец, уменьшение этой величины практически до нуля при $T_{00} > T_{pm} \approx 2350$ К.

Теперь покажем для принципиально другого материала — нержавеющей стали, что, используя выделенную характеристику потока $\overline{G}'(T_{00})$, удастся согласовать экспериментальные данные, полученные двумя разными методами, основанными на изменении температуры набегающего потока и концентрации частиц в нем. Можно доказать, что эта характеристика не зависит от испытываемого материала, а является принадлежностью только высокотемпературного гетерогенного потока установки и отражает изменение параметров потока из-за перегрева частиц в нем и их возможного разрушения. Для этого необходимо привести зависимости $\overline{G}'(T_{00})$ для нержавеющей стали (см. рис. 5) к одной скорости взаимодействия (рис. 7) по соотношению (1) и, используя выделенную характеристику потока

$\overline{G}'(T_{00})$, построить зависимость $G_{vT}^{pr}(T_{00}) = G_v^{pr} \left[\frac{\overline{G}'(T_{00}^{pr})}{\overline{G}'(T_{00})} \right]$, представленную на

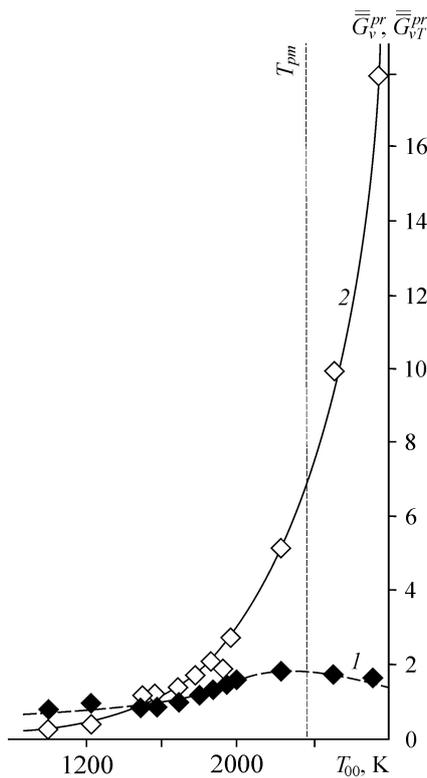


Рис. 7. Зависимость приведенных интенсивностей эрозионного разрушения нержавеющей стали от температуры газа в форкамере.

1 — $G_v^{pr} = G(v^{pr}/v)^2$, где $v^{pr} = 1170$ м/с,
 2 — $G_{vT}^{pr}(T_{00}) = G_v^{pr} \left[\frac{\overline{G'}(T_{00}^{pr})}{\overline{G'}(T_{00})} \right]$, где $T_{00}^{pr} = 1500$ К.

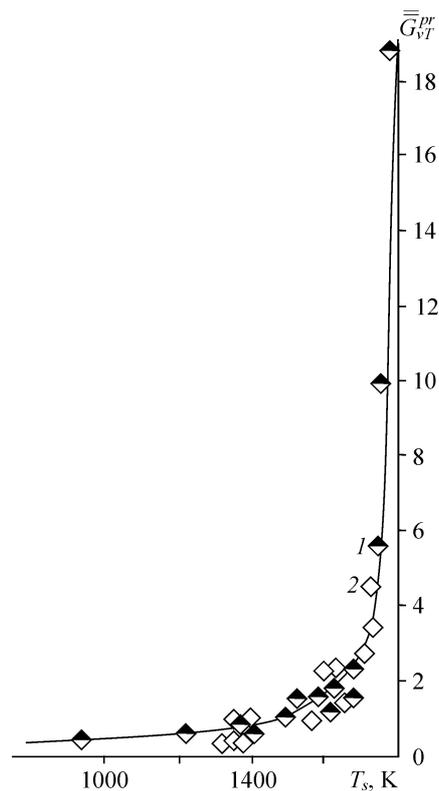


Рис. 8. Зависимость приведенной интенсивности эрозионного разрушения нержавеющей стали от среднеинтегральной температуры поверхностного слоя,

$v^{pr} = 1170$ м/с, $T_{00}^{pr} = 1500$ К.

Методы: $T_{00} = \text{var}$ (1), $G_p = \text{const}$ (1); $T_{00} = \text{const}$ (2), $G_p = \text{var}$ (2).

рис. 7, а затем, определив среднеинтегральную температуру поверхностного слоя, зависимость $\overline{G}(T_s)$ (рис. 8).

При этом изменение температуры T_w или, что в данном случае почти одно и то же, T_s в зависимости от T_{00} показано на рис. 9. После нанесения на зависимость $\overline{G}(T_s)$ (см. рис. 8) экспериментальных данных, полученных методом изменения концентрации частиц в потоке при $T_{00} \sim 1500$ К и $T_{00} \sim 2000$ К [5], можно увидеть их удовлетворительное совпадение. Факт интересен сам по себе уже тем, что показывает: в области малых концентраций основное влияние на изменение безразмерного уноса массы в зависимости от G_p оказывает именно температура поверхностного слоя.

Из экспериментальных данных [24, 25] следует, что глубина образующегося в результате высокоскоростного удара кратера обратно пропорциональна твердости материала частиц при данной температуре в степени 0,3, а его объем имеет еще более слабую зависимость. То есть объяснить только этим 25-кратное падение способности потока производить эрозионное разрушение материалов не удастся.

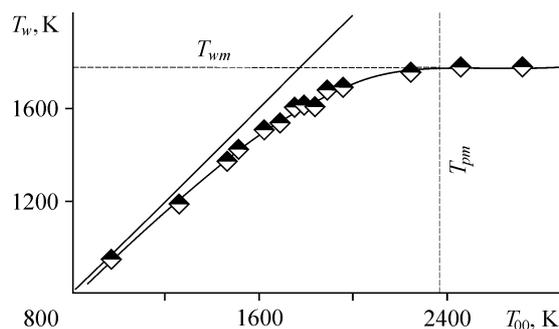


Рис. 9. Зависимость температуры поверхности нержавеющей стали от температуры газа в форкамере.

С другой стороны, разрушение частиц при падении их прочности с ростом T_{00} скажется на их среднем размере, фактической скорости разгона в сопловом тракте и торможения в ударном слое, коэффициенте осаждения и т. п. Таким образом, налицо неопределенность условий испытания при $T_{00} > 1500$ К. Выделить или замерить каждую из этих составляющих пока не представляется возможным. Но, пользуясь интегрально учитывающей все это эффективной характеристикой потока, можно переносить результаты испытаний в условиях, где каждый из этих факторов неизвестен, на известные условия при $T_{00} \approx 1500$ К, при которых частицы не разрушаются. Тогда появляется возможность, конечно, не исключая попытки измерения фактических параметров гетерогенного потока, использовать метод изменения температуры газа в форкамере для исследования температурной зависимости эрозионной стойкости материалов, что особенно важно для металлов и т. п.

Данная эффективная характеристика потока газодинамической установки найдена для случая ввода в форкамеру частиц Al_2O_3 со средним размером ≈ 50 мкм. Использование частиц из другого материала или иного размера потребует повторения аналогичной, трудоемкой и дорогостоящей работы. Поэтому для вновь создаваемых или модернизируемых теплоэрозионных стендов рекомендуется другая схема ввода частиц в форкамеру. Частицы вводятся в районе критического сечения соплового тракта, в котором газ имеет более низкое значение температуры и давления, и, кроме того, время нахождения частиц в высокотемпературной области течения существенно меньше. Это позволит поднять температуру газа в форкамере заметно выше 1500 К и соответственно увеличить скорость частиц и газа на выходе из соплового тракта без потери их прочности. Также в этом случае существенно ослабляется тепловой удар при вводе частиц и исключается их взаимодействие с конической стенкой форкамеры в дозвуковой части сопла, которые были двумя из трех предполагаемых причин разрушения частиц при потере ими прочности. Тем самым можно расширить температурный диапазон исследований теплоэрозионной стойкости материалов и конструкций из них.

ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования влияния температуры продуктов сгорания в форкамере стенда комплексных теплоэрозионных исследований на теплоэрозионную стойкость материалов.

Сравнение результатов испытаний материалов двух принципиально разных классов (стеклопластика и нержавеющей стали) позволило выделить эрозионную характеристику гетерогенного потока стенда. Согласно этой характеристике, превышение температурой продуктов сгорания значения температуры потери прочности материала частиц приводит к неопределенности результатов испытаний материалов в таком гетерогенном потоке. Рекомендуется вводить частицы в поток в районе критического сечения сопла, в котором, с одной стороны, температура газа меньше, а с другой — и время нахождения частиц в высокотемпературной области потока также меньше.

Показано, что температура набегающего сверхзвукового гетерогенного потока является одним из определяющих параметров процесса перехода эрозия–напыление. Механизмы такого перехода требуют дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. — М.: Мир, 1975. — 380 с.
2. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Под ред. Л.Е. Стернина. — М.: Машиностроение, 1980. — 172 с.
3. Сукомел А.С., Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах. — М.: Энергия, 1977. — 194 с.
4. Розенбаум Р.Б., Тодес О.М. Движение тел в псевдооживленном слое. — Л.: Изд. ЛГУ, 1980. — 166 с.
5. Полежаев Ю.В., Михатулин Д.С. Теплообмен в гетерогенных потоках // Машиностроение: Энциклопедия в 40 т. Т. I–2. Теоретическая механика, термодинамика, теплообмен. Разд. 5. — М.: Машиностроение, 1999. — С. 383–433.
6. Dunbar L.E., Courtney J.F., McMillen L.D. Heating augmentation in erosion hypersonic environments // AIAA Journal. — 1975. — Vol. 13, No. 7. — P. 908–912.
7. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. и др. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. Сер. Низкотемпературная плазма. Т. 18 / Под ред. М.Ф. Жукова и В.М. Фомина. — Новосибирск: Наука, 2000. — 425 с.
8. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар // Физика быстропотекающих процессов Т. II / Под ред. Н.А. Златина. — М.: Мир, 1971. — С. 204–246.
9. Полежаев Ю.В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении с частицами // ИФЖ. — 1979. — Т. 37, № 3. — С. 389–394.
10. Панченко В.И., Полежаев Ю.В. Основные закономерности кинетики эрозионного разрушения материалов // ИФЖ. — 1987. — Т. 52, № 5. — С. 709–716.
11. Harris F.C. A study of parameters influencing the erosion of reentry material // AIAA Paper. — 1975. — P. 75–217.
12. Ральф А.У., Видерхорн С.М. Эрозия при ударе твердых частиц // Эрозия / Под ред. К. Прис. — М.: Мир, 1982. — С. 80–139.
13. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Исследование плоской сверхзвуковой двухфазной струи // ПМТФ. — 1977. — Т. 38, № 2. — С. 177–183.
14. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследование взаимодействия двухфазного потока с нагретой поверхностью // Теплофизика и аэромеханика. — 1998. — Т. 5, № 1. — С. 67–73.
15. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // ПМТФ. — 1998. — Т. 39, № 2. — С. 182–188.
16. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Течение в сверхзвуковом сопле большого удлинения с прямоугольным сечением. // Теплофизика и аэромеханика. — 1999. — Т. 6, № 1. — С. 51–58.
17. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Гетерогенные технологии: газодинамические проблемы // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 3. — С. 449–461.
18. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Гетерогенные технологии: проблемы взаимодействия частиц с преградой // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 3. — С. 415–432.
19. Васин А.В., Полежаев Ю.В. Унос массы при совместном эрозионном и тепловом воздействии двухфазного потока // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1984. — № 1. — С. 120–126.

20. **Материалы** и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее (в 3 т.) // Т. 3. Экспериментальные исследования / Полежаев Ю.В., Резник С.В., Михатулин Д.С. и др. Под ред. Ю.В. Полежаева и С.В. Резника. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 264 с.
21. **Григорович В.К.** Механические свойства веществ при высоких температурах // Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1983. — 928 с.
22. **Игнатов С.Ф.** Плавление и кристаллизация частиц в высокотемпературном двухфазном потоке // Тез. докл. Межотрасл. конф. “Воздействие двухфазных сред на элементы конструкции и материалы”. — ГОНТИ-1. — 1980. — С. 88–89.
23. **Цимбалюк А.Ф.** Кристаллизация и плавление частиц оксидов в сопле и в сверхзвуковой полидисперсной струе // Теплофизика высоких температур. — 1996. — Т. 34, № 2. — С. 330.
24. **Леонтьев Л.В., Тарасов А.В., Терешкин И.А.** Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной мишени // Космические исследования. — 1971. — Т. 9, вып. 5. — С. 796–798.
25. **Леонтьев Л.В.** О форме кратеров, образующихся при высокоскоростном ударе // Космические исследования. — 1976. — Т. 14, вып. 2. — С. 278–286.

Статья поступила в редакцию 13 июня 2006 г.