

УДК 629.7.018.3

Ю. В. Полежаев¹, Д. С. Михатулин¹, Г. А. Фролов²

¹ Об'єднаний Інститут високих температур РАН, Москва (Росія)

² Інститут проблем матеріалознавства Національної академії наук України, Київ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Розглянуто фізику ерозійного руйнування при ударі одиночної частки і багатократній дії часток на руйновану поверхню. Показано, що між одиночними і множинними зіткненнями є принципові відмінності, які виключають пряме порівняння їх по будь-якому фізичному параметру. Представлено моделі ерозійного руйнування матеріалів. Встановлено три ділянки ерозійного руйнування. Із збільшенням швидкості удару дискретних часток об перешкоду і діаметра часток на обтічній поверхні реалізуються або режим ерозійного руйнування, або адгезійного прилипання.

ВВЕДЕНИЕ

Активное изучение гетерогенных потоков началось в 1970-х гг. Частицы попадают в газовый поток за счет естественных и искусственных причин. В атмосфере Земли и других планет всегда есть пыль или облака, содержащие жидкие (дождь) или твердые (снег, град) частицы. Поэтому испытания материалов для ракетно-космической техники, например теплозащитных, необходимо проводить не только в рамках моделирования теплового, но эрозионного воздействия гетерогенного газового потока. В последнее время на пути дальнейшего развития авиационно-космической техники и энергетики всё более чётко вырисовывается препятствие, которое по аналогии со звуковым и тепловым называют барьером эрозионным.

Мельчайшие частицы пыли и влаги оказались мощным разрушителем для сверхпрочных материалов. Не только скорость удара, но и многократность соударений отличают эрозию в гетерогенных потоках от всех других видов нагружения. Возможно, именно этим объясняется отсутствие явной связи интенсивности эрозионного разрушения с любым из известных параметров теории упругости и пластичности.

Гетерогенные потоки обладают исключительной способностью к разрушению. Линейная скорость разрушения (или скорость уноса массы) обтекаемого тела может увеличиться в несколько раз, если концентрация частиц в них достигнет уровня 1 %. Важно и то, что эрозия начинается уже при скорости гетерогенного потока 100–200 м/с. Эти цифры на порядок меньше порога теплового барьера для неохлаждаемых металлических конструкций.

Механизм эрозионного разрушения складывается из многих элементарных физических процессов. В связи с этим весьма полезным на начальном этапе оказалось выявление неких границ или «порогов», по достижении которых можно пренебречь влиянием тех или иных факторов и использовать более простые функциональные соотношения. Созданная за последние четверть века экспериментальная база имела ограничения как по воспроизводимому уровню скорости полёта частиц (центрифуги), так и по их размерам (газодинамические генераторы). Для субмикронного диаметра частиц ограничения были связаны с возможностями техники оптических измерений. Разгон частиц до скоростей 1000 м/с требовал новых способов профилирования и оптимизации газодинамических сопел.

Именно по причине несовершенства экспериментальной и диагностической базы пробле-

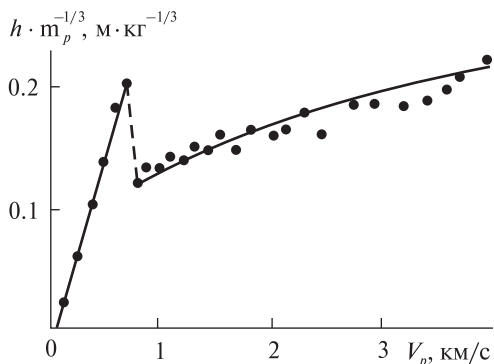


Рис. 1. Зависимость глубины h кратера от скорости V_p удара стального шара по преграде

мы напыления в гетерогенных потоках вышли на первый план только в последнее десятилетие. Этому способствовало создание кооперации академической и вузовской науки. Данная работа содержит описание части результатов, полученных в работах [1, 3].

ДИНАМИКА КРАТЕРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ УДАРЕ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ

Внедрение одиночных частиц в преграду исследовано в артиллерии в диапазоне скоростей от сотен метров в секунду до нескольких километров в секунду. На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость глубины кратера от скорости удара V_p в случае соударения стальных шаров по свинцовой преграде. В области малых скоростей

V_p глубина кратера h линейно увеличивается по мере увеличения V_p . Максимум глубины h соответствует $V_p \approx 0.7$ км/с. Начиная с этого значения скорости V_p ударник деформируется, увеличивается площадь его миделевого сечения, что сразу отражается на глубине внедрения.

При $V_p > 0.8$ км/с зависимость глубины кратера от скорости удара приобретает нелинейный характер. За этим порогом на поверхности контакта частицы с преградой развивается давление, многократно превышающее предел текучести обоих материалов (ударника и преграды). Внутри преграды образуется кратер, по стенкам которого растекается материал ударника в виде полой трубки (или плёнки). Температура в зоне контакта частицы с преградой будет зависеть от интенсивности процессов теплопередачи. Как будет показано далее, важную роль играет размер ударяющих частиц и кратность соударений (концентрация частиц в набегающем потоке).

При введении в поток частиц бронзы с диаметром $d_p = 100$ мкм их осаждение на преграде не наблюдалось даже при скорости $V_p = 750$ м/с. В то же время частицы алюминия с $d_p = 10$ мкм закреплялись внутри кратера (т. е. от эрозии перешли в фазу напыления) при $V_p \approx 550 \dots 600$ м/с. В этом же направлении смещается граница раздела между эрозией и напылением при увеличении числа частиц или их концентрации в гетерогенном потоке.

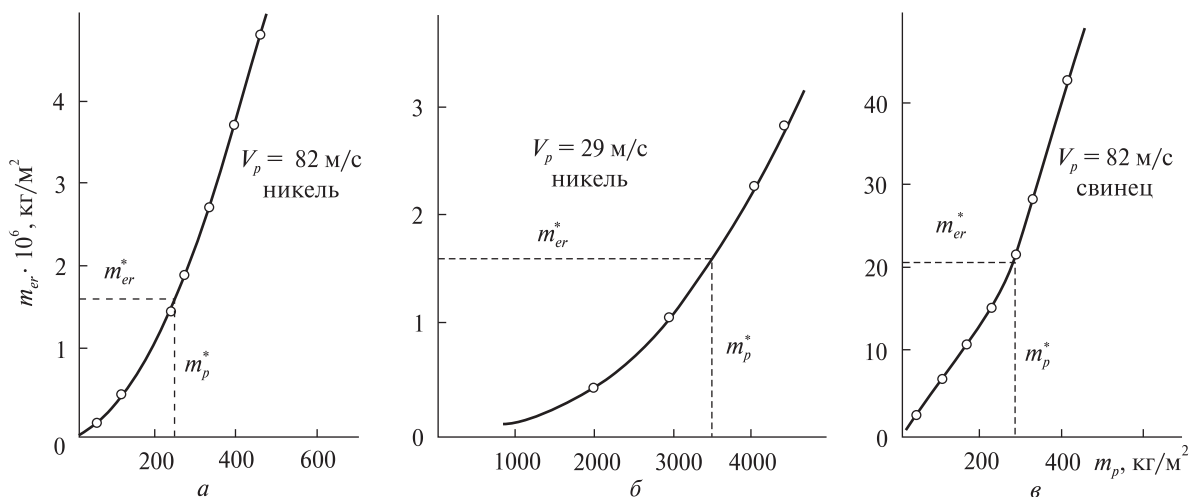


Рис. 2. Зависимость массы унесенного вещества от массы выпавших частиц для пластин из никеля (а, б) и свинца (в)

МОДЕЛИ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

Под термином «эрозионное разрушение» подразумевается процесс уноса массы какого-либо материала (преграды) под действием потока падающих дисперсных частиц, которые могут быть как жидкими, так и твердыми.

Многочисленное воздействие частиц на разрушаемую поверхность складывается из последовательных ударов одиночных частиц. Однако между одиночными и множественными соударениями есть принципиальные различия, которые исключают прямое сравнение их по любому физическому параметру.

Даже при постоянной скорости удара о поверхность преграды V_p при многократных воздействиях скорость уноса массы постепенно увеличивается, пока не достигнет некоего установившегося значения. Масса m_p^* частиц, которую необходимо затратить на установление процесса эрозионного разрушения в основном зависит только от скорости удара V_p , так что величина кинетической энергии $(m_p^* \cdot V_p^2)/2 = a^* = \text{const} \sim 1 \text{ МДж/м}^2$ мало изменяется в экспериментах с различными материалами. Масса унесенного слоя преграды m_{er}^* за весь процесс установления зависит от энтальпии эрозионного разрушения H_{er} :

$$m_{er}^* \cdot H_{er} = \frac{m_p^* \cdot V_p^2}{2}.$$

На рис. 2 и 3 схематично показано, как происходит процесс установления эрозионного разрушения при постоянных скоростях удара V_p и диаметрах частиц d_p .

Здесь интересно отметить аналогию процессов установления постоянной скорости уноса массы при тепловом и эрозионном разрушении. В процессе теплового разрушения материала, как и при эрозионном уносе массы, также есть достаточно четкая граница между нестационарным и установившимся режимами (рис. 4). При тепловом разрушении значительная часть входящего в тело тепла (энергии) отводится за счет теплопроводности вглубь материала. Поэтому говорить о постоянном для всех случаев количестве энергии (1 МДж/м²) не имеет смысла. Однако оценки [2]

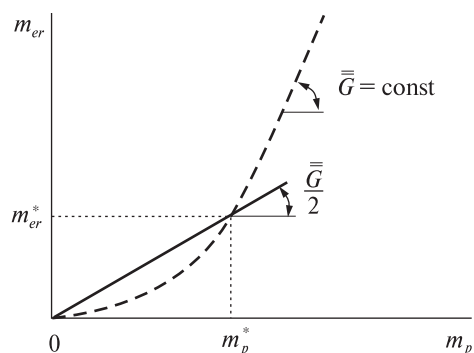


Рис. 3. Зависимость массы унесенного вещества от массы выпавших частиц m_p при $V_p = \text{const}$

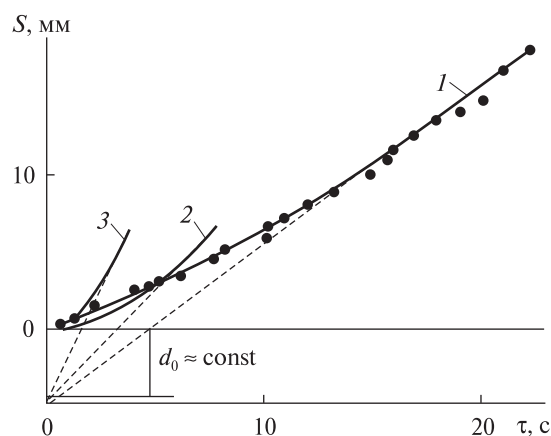


Рис. 4. Зависимости линейного уноса S графита от времени нагрева в диапазоне давлений 0.15–5 МПа: 1 — тепловой поток $q_k = 52 \text{ МВт/м}^2$, энтальпия торможения $I_e = 42 \text{ МДж/кг}$, давление торможения $P_e = 0.154 \text{ МПа}$, скорость линейного уноса массы $\bar{V}_\infty = 1 \text{ мм/с}$; 2, 3 — данные работы [5]; 2 — $q_k = 90.85 \text{ МВт/м}^2$, $I_e = 16.3 \text{ МДж/кг}$, $P_e = 2.5 \text{ МПа}$, $\bar{V}_\infty = 1.46 \text{ мм/с}$; 3 — $q_k = 113.6 \text{ МВт/м}^2$, $I_e = 11.5 \text{ МДж/кг}$, $P_e = 5 \text{ МПа}$, $\bar{V}_\infty = 3.5 \text{ мм/с}$; кружки — эксперимент [4]

показывают, что по мере уменьшения теплопроводности материала количество тепла, поглощенного за время нестационарного режима, снижается и стремится к значению, полученному при эрозионном разрушении материала. Так, для графита при температуропроводности $a = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ эта величина равна 5.8 МДж/м^2 , а для легированной кварцевой стеклокерамики при $a = 0.65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ она почти равна величине, установленной для эрозионного разрушения —

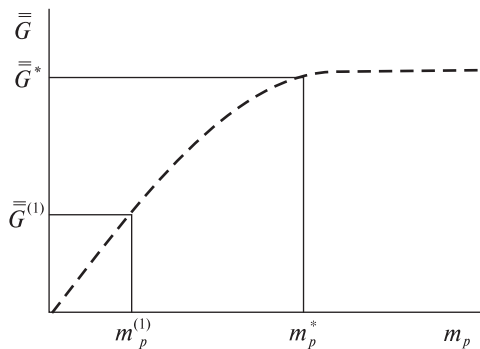


Рис. 5. Зависимость интенсивности \bar{G} эрозионного разрушения от массы $m_p^{(1)}$ выпавших частиц

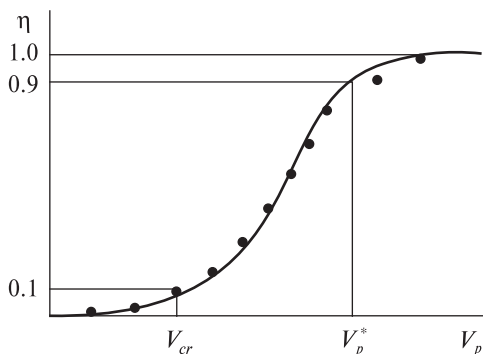


Рис. 6. Относительная доля η энергии разрушения преграды в кинетической энергии удара частиц

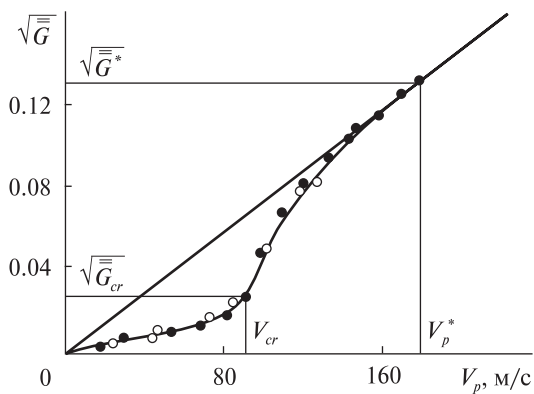


Рис. 7. Зависимость скорости уноса массы алюминиевой преграды от скорости удара крупных и тяжелых частиц ($d_p = 1.58$ мм; $\rho_p = 14500$ кг/м³)

1 МДж/м². Это также подтверждается постоянством параметра нестационарного уноса массы d_0 , который практически зависит только от теплопроводности материала (рис. 4) [4].

На рис. 5 изображена динамика увеличения интенсивности эрозионного разрушения \bar{G} в широком диапазоне скоростей соударения частиц V_p с преградой для двух различных случаев: одно- и многократного взаимодействия (в установленном режиме). Как было показано на рис. 2 и 3, в процессе установления при увеличении массы выпавших части интенсивность эрозионного разрушения также растет, но после достижения $m_p = m_p^*$ производная $\frac{dm_{er}}{dm_p} = \bar{G}$ стабилизируется.

При этом из баланса энергии следует:

$$\eta(m_p V_p^2)/2 = m_{er} H_{er} \text{ или } \bar{G} = \eta \frac{V_p^2}{2H_{er}}.$$

Здесь введен новый параметр η – коэффициент преобразования кинетической энергии удара частицы в энергию разрушения материала преграды. Чем меньше скорость удара V_p , тем больше та часть кинетической энергии частицы, которая успевает рассеяться в виде упругих колебаний в преграде и, в конце концов, переходит в тепло. Наоборот, при большой скорости V_p преобладают процессы разрушения над диссипацией энергии в неповрежденной части материала преграды ($\eta \rightarrow 1$). Зависимость η от V_p имеет асимптотический характер (рис. 6). В качестве подтверждения этой модели эрозионного разрушения на рис. 7 представлена экспериментальная зависимость скорости уноса массы алюминиевой преграды \bar{G} от скорости соударения с потоком твердых частиц диаметром $d_p = 1.58$ мм и плотностью $\rho_p = 14500$ кг/м³.

Важно отметить, что на рис. 7 четко проявились три участка изменения интенсивности эрозии \bar{G}_w с увеличением скорости удара частиц V_p . В первом диапазоне $V_p < V_{cr}$ скорость уноса массы \bar{G} в пределе только достигает уровня 10^{-3} . Здесь в процессе ударного взаимодействия превалируют силы упругости, а параметр V_{cr} можно принять за критическую скорость или нижнюю границу эрозионного разрушения.

Переходный участок $V_{cr} \leq V_w < V_p^*$ интересен для практических приложений прежде всего резким увеличением темпов возрастания интенсивности эрозионного разрушения. Практически двукратное увеличение скорости удара V_p приводит к увеличению интенсивности \overline{G} в 100 раз. После достижения второго «порогового» уровня скорости $V_p = V_p^*$ устанавливается так называемый режим гидродинамического разрушения, где справедливым будет квадратичный закон интенсивности эрозионного разрушения: $\overline{G} = V_p^2 / (2H_{er})$ с постоянной эффективной энтальпией эрозионного разрушения H_{er} . Резкий излом кривой $\overline{G} = f(V_p)$ при достижении критической скорости V_{cr} является удобным способом для экспериментального определения этой величины. Доказано на практике, что второе пороговое значение V_p^* вдвое превышает критическое V_{cr} , а также то, что при меньших значениях скоростей удара $V_p \leq V_{cr}$ интенсивность эрозии пренебрежимо мала ($\overline{G} < 10^{-3}$).

Вернемся к анализу зависимостей для одиночного удара и сравнению их с теми, что установлены для многократных соударений. Формально можно вместо геометрических размеров кратера ввести энергетические – эффективную энтальпию $H_{er}^{(1)}$, затраченную на его образование. Масса $m_p^{(1)}$ выброшенного из кратера материала преграды рассчитывается как отношение массы m_p частицы-ударника к площади S_p её миделя:

$$m_p^{(1)} = m_p / S_p = (2/3)\rho_p d_p.$$

Теперь нетрудно получить отношение эффективных энтальпий однократного и группового (установившегося) разрушений

$$H_{er}^{(1)} / H_{er} = (m_p^{(1)} / m_p^*) = \overline{G} (1) / \overline{G} (m_p^*) = 1 + m,$$

где $m = m^{(1)} / m_p^* = \rho_p d_p V_p^2 / (3a^*)$, $a^* \approx 1$ МДж/м².

Как видим, воздействие потоков частиц и одиночной частицы различаются как количественно, так и качественно.

На рис. 8 показано, что для всех частиц с размерами меньше некоторого значения $d_p < d_p^* = 3a^* / (\rho_p V_p^2)$ эффективная энтальпия $H_{er}^{(1)}$ оказывается выше установившегося значения H_{er} . Пропорционально уменьшается повреждение преграды или размер кратера.

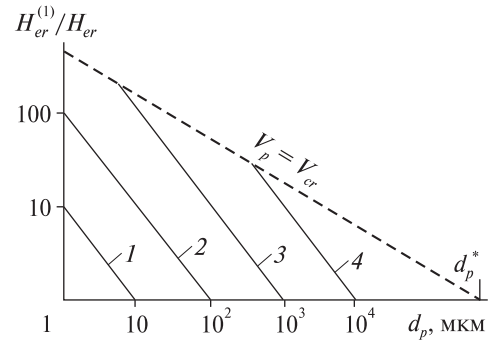


Рис. 8. Отношение значений эффективной энтальпии эрозионного разрушения при одно- и многократном (установившемся) процессе ($\rho_p = 3000$ кг/м³): 1 – $V_p = 10$ км/с, 2 – $V_p = 3$ км/с, 3 – $V_p = 1$ км/с, 4 – $V_p = 0.3$ км/с

Критическая скорость $V_{cr}^{(1)}$ начала разрушения при однократном ударе в отличие от ранее введенного V_{cr} зависит не только от величины H_{er} , но и от размера частицы (масштабный эффект):

$$\frac{V_{cr}^{(1)}}{V_{cr}} = \sqrt{\frac{H_{er}^{(1)}}{H_{er}}} = \sqrt{V_{cr}^{0.5} [3a^* / (\rho_p d_p)]^{0.5}}.$$

Эта закономерность удовлетворительно подтверждается экспериментально.

УСЛОВИЯ НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Анализ большого объема экспериментов с высокоскоростными гетерогенными потоками позволил сделать вывод о том, что в зависимости от ряда параметров, среди которых главными являются скорость ударного взаимодействия дискретных частиц о преграду и диаметр частиц, на обтекаемой поверхности реализуются либо режим эрозионного разрушения, либо адгезионного прилипания (напыления).

В процессе высокоскоростного удара одно или оба соударяющихся тела могут внедряться друг в друга, разлетаться в виде осколков, распыляться либо вступать в адгезионную связь. Как показали результаты численного моделирования, для частиц с диаметром $d_p < 50$ мкм важны процессы теплопередачи за время контакта, причём в вязком пограничном слое формируется тонкий слой расплавленного металла. Между атомами

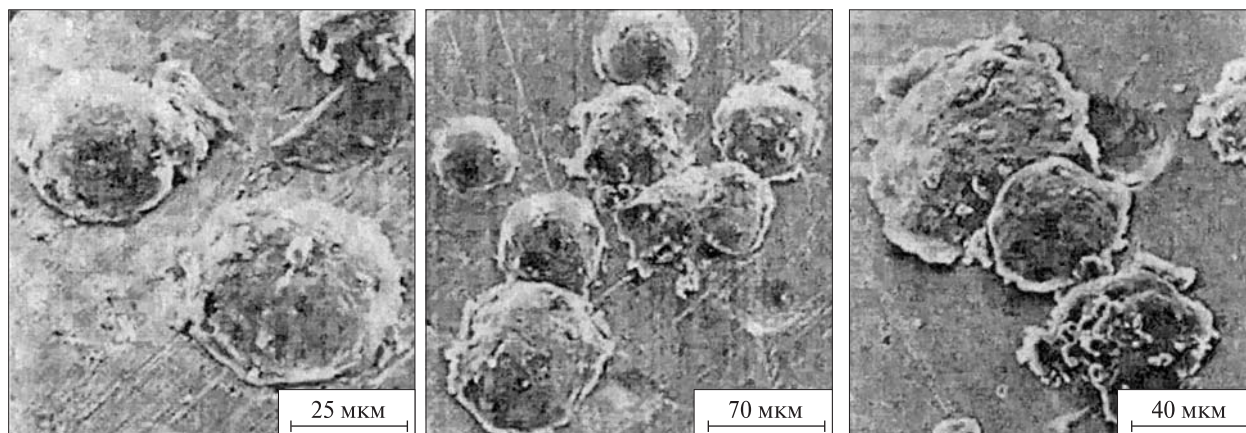


Рис. 9. Микрофотографии медной подложки после взаимодействия с ней частиц алюминия ($d_p = 30$ мкм): а — $V_p = 625$ м/с; б — $V_p = 730$ м/с; в — $V_p = 850$ м/с

материалов частицы и подложки образуются адгезионные связи, которые стремятся закрепить частицы на поверхности. Параллельно происходит процесс перекачки части кинетической энергии частицы в упругую, которая впоследствии стремится оторвать частицу от поверхности подложки.

На рис. 9 показаны микрофотографии медной подложки после взаимодействия с ней частиц алюминия, диаметр которых $d_p = 30$ мкм. После увеличения скорости удара V_p до 850 м/с на под-

ложке наряду с кратерами от отраженных частиц начинают появляться отдельные закрепившиеся частицы.

Взвешивание моделей показало, что из общей массы выпавших частиц доля закрепившихся на поверхности преграды стремится к 50 %. Для различных металлов (Al, Cu, Ni) скорость ударного взаимодействия, при которой происходит напыление, составляет 500—700 м/с.

Использование воздушной струи при комнатной температуре $T_0 = 300$ К не обеспечивает формирование пленочных покрытий, достаточной плотности и адгезионной прочности. Для увеличения скорости газовой струи, а следовательно, и скорости частиц было предложено подогреть воздух на 100—200 °С (рис. 10).

Вследствие некоторого изменения свойств материала частиц с увеличением температуры этот прием дал положительный эффект. Важно, что при этом химического влияния на материалы (окисления) и уменьшения адгезионной прочности не произошло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что ударное взаимодействие гетерогенных потоков с преградой в зависимости от скорости и диаметра частиц реализуется на поверхности преграды либо в виде эрозионного разрушения, либо адгезионного осаждения (напыления).

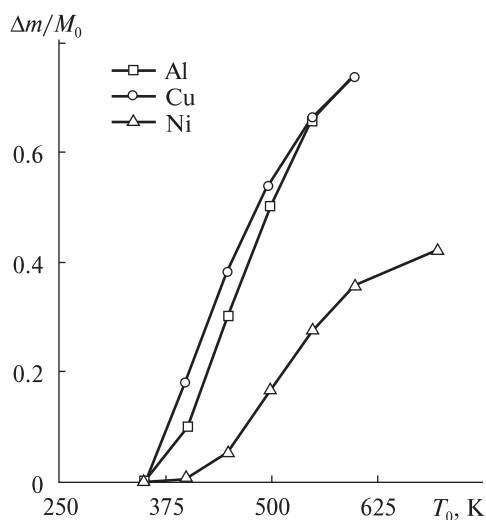


Рис. 10. Зависимость коэффициента напыления порошков металлов с $d_p = 30$ мкм и предварительным подогревом воздуха

2. Для обоих процессов эрозионно-адгезионного взаимодействия обнаружены пороговые скорости взаимодействия частиц с обтекаемой преградой, при которых происходит смена режимов.

3. Установлено наличие инкубационного периода взаимодействия частиц с преградой, в процессе которого происходит установление интенсивности соответствующего процесса при неизменной скорости удара.

1. Михатулин Д. С., Полежаев Ю. В., Ревизников Д. Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. — М.: Янус-к, 2007. — 392 с.
2. Полежаев Ю. В., Фролов Г. А. Тепловое разрушение материалов. — Киев: Академперіодика, 2006. — 354 с.
3. Эванс А., Рафф А., Видерхорн С. И. и др. Эрозия. — М.: Мир, 1982. — 464 с.
4. Frolov G. A. The constant of thermal destruction and its role in the processes of heating and entrainment of mass of a material // J. Eng. Phys. and Thermophys. — 2004. — 77, N 3. — P. 489—520.

5. Williamson R. A., Rinehart W. A., Williams R. R. Lazer activated, model surface recession compensator system for testing ablative materials // J. Space-craft and Rocket. — 1973. — 10, N 10. — P. 1—6.

Надійшла до редакції 25.10.10

Yu. V. Polezhaev, D. S. Mikhatulin, G. A. Frolov

INTERACTION OF SUPERSONIC HETEROGENEOUS STREAMS WITH SOLID BODY SURFACE

Some physical processes during erosive destruction are considered for a single particle impact and for repeated actions of particles on a destroyed surface. It is shown that there are basic differences between single and repeated collisions and because of this they can not be directly compared by any physical parameter. Some models for erosive destruction of materials are presented. Three sites of erosive destruction are determined. As the velocity of a discrete particle impact on an obstacle and a particle's diameter increase, either the erosive destruction or adhesive sticking is realized on a streamline surface.