

Д.С. Михатулин<sup>1</sup>, Д.Л. Ревизников<sup>2</sup>, А.В. Способин<sup>2</sup>, Ю.Л. Шехтер<sup>1</sup>

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия (1)

Московский авиационный институт (технический университет), Россия (2)

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОЛИДИСПЕРСНОМ ПОТОКЕ

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению теплоэрозионного воздействия сверхзвукового запыленного потока на теплозащитные материалы. Используемая математическая модель основана на понятии эффективной энтальпии эрозионного разрушения и учитывает импульсный послойный снос материала в процессе соударения с частицами. Проведено исследование аэродинамического нагрева и эрозионного разрушения теплозащиты из стеклопластика и углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) в условиях горизонтального полета при наличии в потоке частиц двух размеров. Показан неоднозначный характер влияния мелкодисперсной примеси на суммарную интенсивность теплоэрозионного разрушения стеклопластика.

Присутствие в набегающем потоке твердых и жидких частиц, даже при малых их концентрациях, резко изменяет картину воздействия потока на теплозащитные материалы. К термохимическому и силовому воздействию газовой составляющей потока добавляется эрозионное воздействие дискретной фазы. В работах [1, 2] на основе обобщения широкого спектра экспериментальных данных была предложена комплексная модель теплоэрозионного разрушения материалов. В работах [3, 4] данная модель применялась для численного исследования разрушения теплозащиты из стеклопластика и углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) в сверхзвуковых монодисперсных потоках. Настоящая работа является развитием [3, 4] на случай присутствия в потоке частиц двух характерных размеров.

Рассматривается окрестность передней критической точки сферического затупления при бесконечной протяженности облака частиц и постоянных параметрах набегающего потока. Для определения скорости соударения частиц с преградой решаются уравнения движения частиц в сжатом газе за ударной волной. При этом взаимодействие частиц между собой и обратное воздействие частиц на газовую фазу не учитывается, что соответствует относительно низкой их концентрации. В целях учета зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения от температуры решается нестационарное уравнение теплопроводности в разрушающемся материале.

В качестве базовых параметров выбраны следующие: число Маха набегающего потока — 8, высота полета — 10 км, радиус затупления — 0,04 м, удельные массовые потоки крупных и мелких частиц одинаковы —  $5 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$ , размер крупных час-

тиц, присутствующих в потоке, —  $D_p = 50 \text{ мкм}$ , мелких частиц —  $d_p = 5 \text{ мкм}$ , плотность материала частиц —  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Теплофизические характеристики материалов брались из [1, 5]. При таких параметрах набегающего потока реализуются достаточно высокие тепловые воздействия на лобовую поверхность, которые могут приводить к термохимическому разрушению теплозащитного материала.

На рис. 1 показан ход процесса теплоэрозионного разрушения стеклопластика на начальном этапе, соответствующем входу в пылевое облако. Здесь представлено временное изменение температуры поверхности  $T_w$  (кривые 1), среднеинтегральной температуры поверхностного слоя  $T_s$  (кривые 2), а также величины унесенного слоя  $\Delta_T$  (кривые 3). Первые две зависимости соответствуют левой шкале (здесь и далее температуры отнесены к темпера-

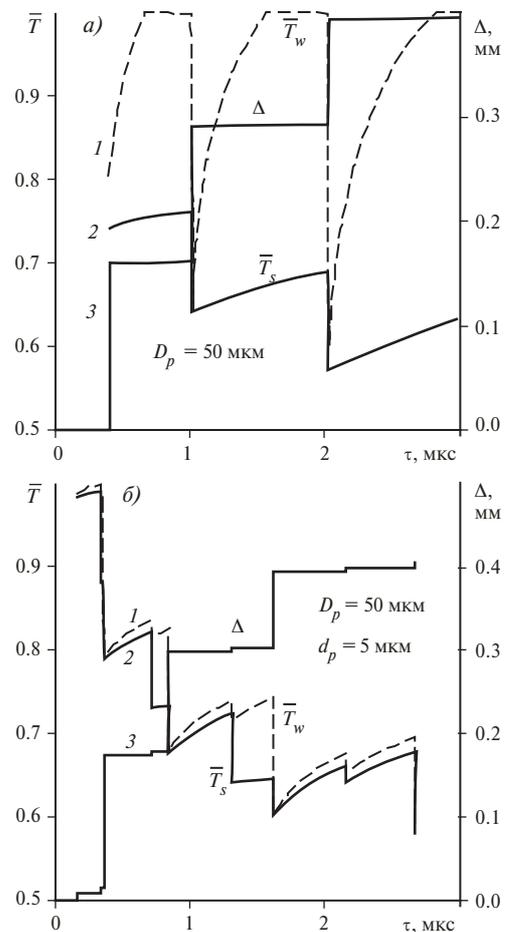


Рис. 1

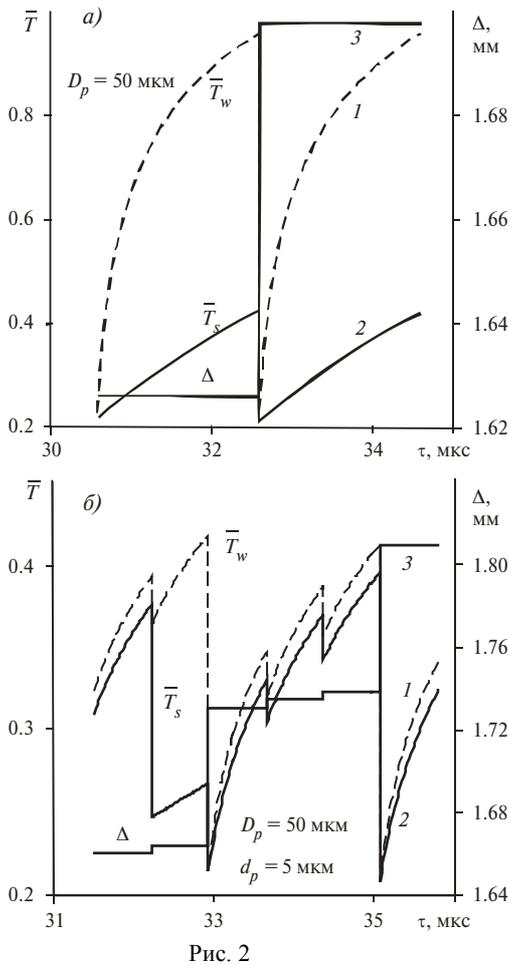


Рис. 2

туре термохимического разрушения материала), третья — правой. Рис. 1а соответствует монодисперсной примеси с частицами только крупного размера, рис. 1б — полидисперсной примеси, где наряду с крупными присутствуют мелкие частицы.

Анализ кривых на верхнем рисунке (монодисперсная примесь) показывает, что для крупных частиц изменение профиля температуры в поверхностном слое идет вначале путем обрезания высокотемпературной его части на глубину, равную глубине кратера, а затем на временном интервале между последовательными ударами частиц происходит нагрев и восстановление температуры термохимического разрушения.

Присутствие мелких частиц в потоке (рис. 1б) приводит к неоднократному сносу поверхностного слоя на временном интервале между двумя последовательными моментами взаимодействия крупных частиц с преградой. В результате восстановления температурного профиля не происходит и температурный уровень поверхностного слоя снижается.

В целом отмеченные выше тенденции, характерные для стартового участка, сохраняются по мере развития процесса теплоэрозионного разрушения. Поведение характерных температур и толщины уносимого слоя на развитой стадии (близкой к выходу процесса на квазистационарный участок) показано на рис. 2. Здесь, как и ранее, верхний рисунок соответствует монодисперсной примеси, нижний

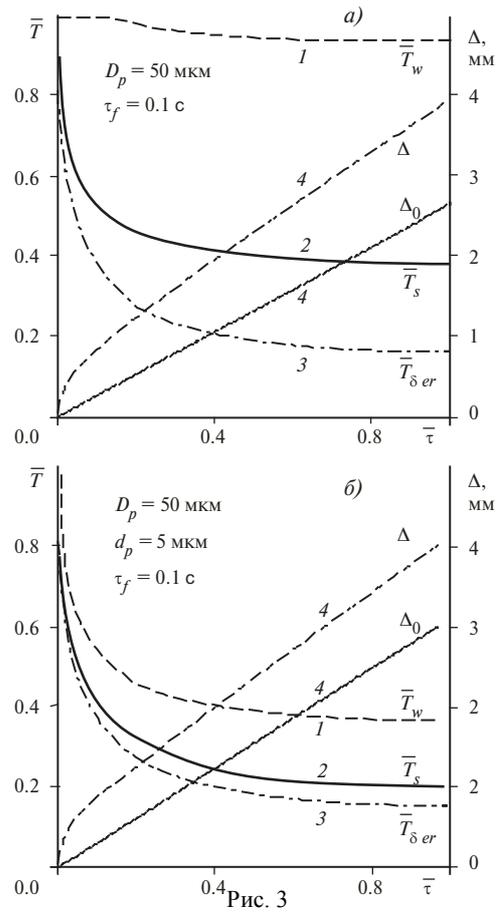


Рис. 3

— полидисперсной. Соответствие кривых аналогично рис. 1. Видно заметное понижение среднеинтегральной температуры поверхностного слоя за счет воздействия частиц мелкодисперсной фракции.

На рис. 3 показан ход процесса теплоэрозионного разрушения в целом. Приведены временные зависимости температуры поверхности, среднеинтегральной температуры и температуры на дне кратера (соответственно кривые 1—3, отнесенные к левой шкале), а также зависимость количества унесенного материала (кривые 4, правая шкала). Все величины здесь рассчитаны в моменты взаимодействия крупных частиц с поверхностью. Время относительно к характерному времени процесса. Штриховой кривой 4 показана линейная зависимость уноса, характерная для чисто эрозионного разрушения с постоянной, не зависящей от температуры, энтальпией. Отличие сплошных и штриховых кривых иллюстрирует, таким образом, влияние зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения от температуры на толщину унесенного материала. Рис. 3а соответствует монодисперсной примеси, рис. 3б — наличию в потоке как крупных, так и мелких частиц. В последнем случае штриховая кривая соответствует аддитивному воздействию на материал обеих фракций.

Сравнение этих вариантов указывает на две противоречивые тенденции, проявляющиеся при пере-

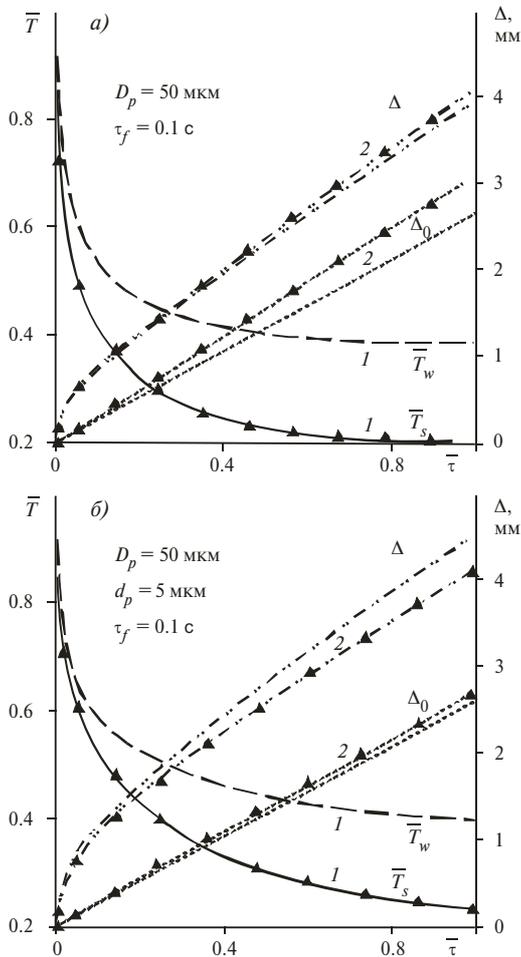


Рис. 4

ходе от монодисперсной примеси к полидисперсной. Первая из них непосредственно связана с наличием дополнительной фракции частиц, что приводит к дополнительному разрушению материала. Вторая — проявляется опосредованно через понижение среднеинтегральной температуры поверхностного слоя за счет ударов мелких частиц, что приводит к повышению энтальпии эрозионного разрушения и уменьшению разрушающего воздействия крупных частиц.

Результирующий эффект проиллюстрирован на рис. 4. Здесь кривые 1 отнесены к левой шкале и показывают временное изменение среднеинтегральной температуры поверхностного слоя, кривые 2 отнесены к правой шкале и соответствуют количеству унесенного материала. Маркерами обозначены зависимости, полученные для полидисперсной примеси. Штриховые кривые, как и ранее, соответствуют постоянной энтальпии эрозионного разрушения.

На рис. 4а, соответствующем базовому расчетному варианту, видно, что отличие гладкой и маркированной штриховых кривых, характеризующее влияние полидисперсности потока, более значительно, чем это имеет место для сплошных кривых. Т.е. дополнительное разрушающее воздействие мелкодисперсной фракции частично компенсируется уменьшением температуры поверхностного слоя. Наиболее ярко этот эффект проявляется, когда

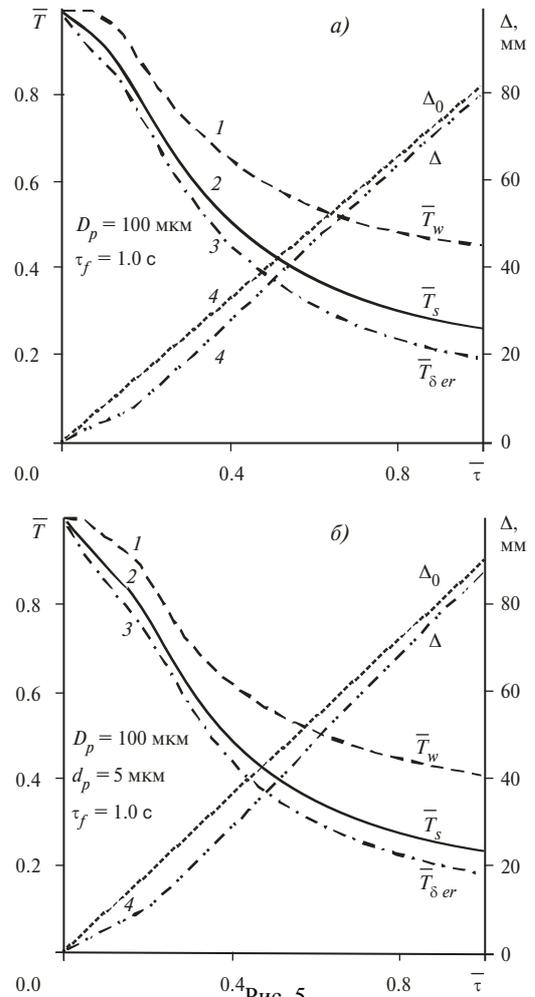


Рис. 5

ударный слой достаточно мощен и оказывает сильное тормозящее воздействие на частицы. Так увеличение радиуса затупления  $R_N$  обтекаемого тела (рис. 4б, радиус — 0.1 м) приводит к ослаблению разрушения материала при добавлении мелкодисперсной фракции.

Перейдем к рассмотрению процесса термоэрозионного разрушения теплозащиты, выполненной из углерод-углеродного композиционного материала УУКМ. Соответствующие результаты приведены на рис. 5. В качестве частиц крупной фракции рассматривались частицы диаметром  $D_p = 100$  мкм, размер мелкодисперсной примеси —  $d_p = 5$  мкм. Остальные параметры аналогичны рассмотренным выше для стеклопластика.

УУКМ характеризуется немонотонной, но менее сильной, зависимостью энтальпии эрозионного разрушения от температуры. При этом для диапазона «рабочих» параметров характерна область, в которой энтальпия эрозионного разрушения с ростом температуры повышается. Таким образом, отмеченные выше для стеклопластика тенденции сохраняются, но перестают быть противоречивыми. Видно, что толщина унесенного слоя, рассчитанная с учетом температурной зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения от температуры несколько меньше, чем аналогичная величина, рассчитанная для постоянной энтальпии. При этом

влияние дополнительной, мелкой, фракции частиц для обоих вариантов отличается незначительно, что позволяет сделать вывод о возможности аддитивного учета полидисперсности потока на разрушение углеродного теплозащитного материала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-02-16603-а).

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Машиностроение.** Энциклопедия в 40 т. Т. 1—2. Гео-

ретическая механика, термодинамика, теплообмен / Под ред. К.С. Колесникова, А.И. Леонтьева. М.: Машиностроение, 1999. 600 с.

2. **Полежаев Ю.В., Михатулин Д.С.** Эрозия поверхностей в гетерогенных потоках. Препринт №2-227 М.: ИВТ РАН, 1989. 67 с.
3. **Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л.** Исследование разрушения стеклопластика при полете в запыленной атмосфере // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39. № 4. С. 640—648.
4. **Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л.** Исследование разрушения углеродного теплозащитного материала при полете в запыленной атмосфере // Теплофизика высоких температур. 2003. Т. 41. № 1. С. 98—105.
5. **Полежаев Ю.В., Юревич Ю.Б.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.