

УДК 629.73.004.82:532.525.6

А.В. ГАЙДАЧУК, А.М. ГРУШЕНКО, Т.П. НАБОКИНА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Выполнен теоретический анализ особенностей теплового воздействия сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй на элементы конструкций объектов аэрокосмической техники. Интерпретированы результаты экспериментальных исследований, связанных с граничными режимами такого воздействия, когда материал конструкции подвергается разрушению термомеханическому или термометаллургическому (разрушению плавлением). Предложено обобщить полученные результаты с помощью модифицированного критерия Био, который учитывает известные и установленные экспериментально особенности подвода тепла к конструкции посредством сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй. Обозначены критериальные границы возможных последствий такого воздействия. Предлагается использовать полученные результаты при расчете технико-экономических показателей утилизации АКТ, а также для прогнозирования состояния элементов конструкции летательных аппаратов при газоструйном воздействии.*

**Ключевые слова:** утилизация объектов, тепловое состояние аэрокосмической техники, сверхзвуковые высокоскоростные струи, перфорация материалов обшивок летательных аппаратов

### Введение

Процессы разупрочнения элементов конструкций из алюминиевых сплавов, предшествующие их разрушению под воздействием сверхзвуковых высокоскоростных струй, представляют научный и практический интерес при реализации утилизационной резки объектов аэрокосмической техники (АКТ) [1], при оценке термомеханической прочности объектов АКТ [2]. В первом случае мы сталкиваемся с необходимостью выбора тепловой мощности огнеструйных резаков, определением времени резки, а, в итоге, с определением технико-экономических показателей процесса утилизации. Во втором случае мы определяем безопасное для конструкции время комбинированного теплового и динамического воздействий сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй (СВГС) заданной тепловой мощности.

И в том, и в другом случае необходимо совместное решение трех задач – генерации СВГС заданной тепловой мощности, распространения тепла в конструкции и, наконец, термомеханической прочности конструкции.

### 1. Формулирование проблемы

Совместное аналитическое решение упомянутых выше задач в силу неопределенности граничных условий, условности принимаемых расчетных схем при формулировании прочностной задачи, а

также из-за необходимости включать в расчеты эмпирические зависимости прочностных характеристик материала конструкции от температуры, не дает достоверных аналитических значений времен воздействия СВГС, предшествующих разрушению конструкции. Однако теоретический анализ зависимостей, описывающих совместное протекание процессов, позволяет обосновать выбор критериев подобия этих процессов. Этот путь плодотворен по двум причинам – критериальный вид уравнений, описывающих сложные процессы взаимодействия, позволяет существенно минимизировать экспериментальные исследования, а неточности расчетных схем, допущений и граничных условий, приводящие к неточности аналитических решений, в случае критериальных оценок могут быть учтены соответствующими эмпирическими коэффициентами.

Проанализируем упомянутые выше процессы и их зависимость от определяющих параметров. Рассмотрим ортогональное натекание СВГС на плоскую неограниченную пластину из алюминиевого сплава, которая имеет начальную температуру  $T_n$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ; теплоемкость  $C$ ; плотность  $\rho$ .

Будем считать, что условия нагрева пластины соответствуют известной задаче одностороннего нагрева неограниченной пластины с интенсивностью, определяемой величиной коэффициента теплопередачи  $\alpha_{эф}$  от СВГС к пластине. Если считать, что нагрев конструкции с характерной толщиной  $b$

осуществляется в струе с параметрами соответствующими соотношению

$$\dot{m}_\Sigma p_k \geq (\dot{m}_\Sigma p_k)_{пр}, \quad (1)$$

где  $\dot{m}_\Sigma$  – массовый расход режущей струи;

$p_k$  – давление в камере сгорания резака;

$(\dot{m}_\Sigma p_k)_{пр}$  – граничное значение технологического параметра  $\dot{m}_\Sigma p_k$  для данной толщины, увеличение которого в дальнейшем не приводит к заметному увеличению характерного времени процесса разрушения  $\tau_{пр}$ ;

то, как показали многочисленные экспериментальные исследования, диаметр „теплового пятна“ СВГС на поверхности конструкции будет всегда больше, чем характерная ее толщина, что позволяет говорить об адекватности упомянутого допущения.

Так как для значений  $\dot{m}_\Sigma p_k \geq (\dot{m}_\Sigma p_k)_{пр}$  характерно асимптотическое поведение эмпирических зависимостей [4]  $\tau_{возд} = f(b; \dot{m}_\Sigma p_k)$  (рис. 1), то для каждого значения  $b$  может быть найдена величина  $(\dot{m}_\Sigma p_k)_{пр}$ .

$\tau_{возд}, c$

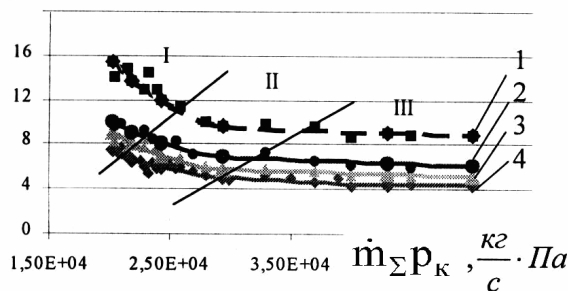


Рис. 1. Зависимость времени прожига от технологического параметра  $\dot{m}_\Sigma \cdot p_k$ :

- 1 –  $b = 8 \cdot 10^{-3} m$ ; 2 –  $b = 4 \cdot 10^{-3} m$ ;
- 3 –  $b = 3 \cdot 10^{-3} m$ ; 4 –  $b = 2 \cdot 10^{-3} m$

Исходя из эргономических ограничений на конструкцию существующих резаков реактивного типа, мы можем задаться величиной  $p_k$ . Тогда потребный расход продуктов сгорания, который гарантированно обеспечит разупрочнение и так называемый „пробой“ конструкции, можем найти следующим образом:

$$\dot{m}_\Sigma = \frac{(\dot{m}_\Sigma p_k)_{пр}}{p_k}. \quad (2)$$

С другой стороны, удельный тепловой поток от СВГС в преграду согласно [5] определяется по зависимости

$$q_w \cong C_w \cdot p_k \cdot T_k,$$

где  $C_w$  – эмпирический размерный коэффициент;

$p_k, T_k$  – внутрикамерные параметры резака – полное давление и температура.

Тогда можно определить и значение  $\alpha_{эф}$ :

$$\alpha_{эф} \approx \frac{q_w}{\Delta T}, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – перепад температур в СВГС ( $T_k$ ) и на поверхности преграды ( $T_{пр}$ ).

Можно считать, что  $\Delta T \approx T_k$ , так как  $T_k \gg T_{пр}$ . Предположим, что „пробой“ материала происходит, когда на внутренней поверхности преграды напряжения среза  $\tau_{ср}$  достигают значения  $[\tau]_{ср}$ . Температурная зависимость  $\sigma_b = f(T)$  [3] в диапазоне температур  $643K < T < 933K$  и с учетом, что  $[\tau]_{ср} = 0,77 \sigma_b$ , аппроксимируется выражением:

$$[\tau]_{ср} = 0,77 \left[ 30 \cdot 10^6 - \frac{T_{пл}}{30 \cdot 10^6 \cdot T} \right], \quad (4)$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления. Для большинства алюминиевых сплавов  $T_{пл} \approx 933K$ .

Если предположить, что напряжения среза при воздействии на преграду СВГС равны

$$\tau_{ср} \approx \frac{\sigma \cdot p_k \cdot \pi \cdot d_{пр}^2}{4\pi \cdot d_{пр} \cdot b}, \quad (5)$$

где  $d_{пр}$  – диаметр „пробоя“;

$\sigma$  – коэффициент восстановления давления струи на преграде;

то условие разупрочнения с разрушением будет иметь вид

$$\frac{\sigma \cdot p_k \cdot d_{пр}}{4b} = 0,77 \left[ 30 \cdot 10^6 - \frac{933}{30 \cdot 10^6 \cdot T} \right], \quad (6)$$

где  $T$  – текущая температура конструкции.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования, величина  $d_{пр}$  связана с величиной критического сечения огнеструйной горелки  $d_{кр}$  соотношением

$$d_{пр} \approx (1,2 \dots 1,3) d_{кр}. \quad (7)$$

Известно, что для камер сгорания ракетного (реактивного) типа со сверхкритическим соплом значения  $p_k, \dot{m}_\Sigma$  и  $f_{кр}$  связаны между собой так называемым расходным комплексом  $\beta_{теор}$  или  $\beta_{эксп}$ :

$$\beta_{теор} = \frac{f_{кр} \cdot p_k}{\dot{m}_\Sigma}. \quad (8)$$

Для критериального анализа целесообразно использовать значение  $\beta_{теор}$ , так как предполагаемые критериальные обобщения предусматривают введение соответствующих поправочных коэффициентов. Расходный комплекс  $\beta_{теор}$  зависит в основном от

вида применяемого топлива, коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ок}$  и практически не зависит от давления в камере сгорания [6].

Тогда с учетом (2) и (8) можем определить величину  $f_{кр}$

$$f_{кр} = \frac{\beta_{теор} \cdot \dot{m}_{\Sigma}}{p_k} = \frac{(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр} \cdot \beta_{теор}}{p_k^2};$$

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4f_{кр}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр} \cdot \beta_{теор}}{p_k^2}}. \quad (9)$$

Соотношение (6) в правой части имеет параметрически зависящую от времени теплового воздействия текущую температуру конструкции  $T$ . Условие разрушения может быть сформулировано следующим образом – прочностное разрушение материала под воздействием СВГС произойдет в момент времени  $\tau_{пр}$  от начала воздействия, когда напряжения среза по диаметру  $d_{пр}$  превысят  $[\tau]_{ср}$  при температуре, которую приобретет конструкция в процессе нагрева:

$$\frac{\sigma \cdot p_k \cdot d_{пр}}{4b} \geq 0,77\sigma_B(\tau), \quad (10)$$

где  $\sigma_B$  – зависит от температуры материала конструкции, а, значит, и от времени воздействия  $\tau_{возд}$ .

Известно [7], что процессы распространения тепла при одностороннем нагреве бесконечной пластины могут быть обобщены критериями Фурье и Био

$$Fo = \frac{a\tau}{b^2}; \quad Bi = \frac{\alpha_{эф} \cdot b}{\lambda}, \quad (11)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  
 $b$  – толщина нагреваемого листового материала;  
 $\tau$  – время теплового воздействия;  
 $\lambda$  – теплопроводность материала конструкции.

Очевидно, что в нашем случае время  $\tau$  является временем, прошедшим с начала теплового воздействия до термомеханического разрушения материала и равно  $\tau = \tau_{пр}$ , а число размерных параметров и безразмерных критериев, которые определяют это время и является основной задачей наших исследований.

## 2. Критерийный анализ тепловых процессов при разупрочнении материалов и их перфорации

Так как  $\alpha_{эф} \approx \frac{q_w}{T_k} \cong C_w \cdot p_k$ , можно утверждать, что коэффициент теплопередачи зависит от произведения двух составляющих процесса – давления струи на преграду и эмпирического коэффициента  $C_w$ , который характеризует интенсивность СВГС.

Так как для преград определенной толщины существуют предельные значения технологического параметра  $(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр}$ , при которых реализуются процессы разупрочнения и перфорации материала, установим взаимную связь критерия Био с величинами  $C_w$  и  $(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр}$ .

Для идеальных процессов истечения высокоэнтальпийных газов из камеры сгорания через сверхкритические сопла справедлива зависимость [4]:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \frac{f_{кр} \cdot p_k}{\beta_{теор}}, \quad (12)$$

где  $f_{кр}$  – площадь критического сечения сопла;

$p_k$  – давление в камере;

$\beta_{теор}$  – теоретическое значение расходного комплекса.

С другой стороны, массовый расход продуктов сгорания, который обеспечивает „пробой” материала конструкции толщиной  $b$  может быть найден на основании полученных экспериментальных данных

$$\dot{m}_{\Sigma, b_i} = \frac{(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр, b_i}}{p_k}, \quad (13)$$

где индекс  $b_i$  указывает на соответствие величины с этим индексом определенной толщине исследуемой конструкции.

Очевидно, что, приравняв правые части выражений (12) и (13), получим

$$\frac{(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр, b_i}}{p_k} = \frac{f_{кр} \cdot p_k}{\beta_{теор}} \quad (14)$$

или

$$p_k = \frac{2 \cdot \sqrt{(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр, b_i} \cdot \beta_{теор}}}{d_{кр} \sqrt{\pi}}. \quad (15)$$

Тогда

$$\alpha_{эф} \cong C_w \cdot p_k = \frac{2C_w \cdot \sqrt{(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр, b_i} \cdot \beta_{теор}}}{d_{кр} \sqrt{\pi}}, \quad (16)$$

а критерий  $Bi$ , характеризующий условия подвода тепла к конструкции с характерной толщиной  $b$  посредством натекания СВГС, может быть определен следующими образом:

$$Bi = \frac{2C_w \cdot b \cdot \sqrt{(\dot{m}_{\Sigma} p_k)_{пр, b_i} \cdot \beta_{теор}}}{\lambda \cdot d_{кр} \sqrt{\pi}}. \quad (17)$$

Проанализируем полученный на основании теоретических и эмпирических данных результат.

Подобие процессов подвода энергии от СВГС к конструкции, которое в конечном результате определяет и подобие процессов разупрочнения и механического разрушения, зависит от величин  $d_{кр}/b$  и

технологического параметра  $(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр, b_i}$ . Таким образом, необходимым условием подобия тепловых процессов является соизмеримость с толщиной разрезаемого материала тепловая мощность струи, которая характеризуется величиной  $(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр, b_i}$ . Однако для подобия тепловых процессов, непосредственно предшествующих разрушению, это необходимое, но недостаточное условие – требуется выполнение геометрического подобия по параметру  $\frac{d_{кр}}{b}$ . Эти выводы хорошо согласуются с эмпирическими наблюдениями. Так для относительно толстых элементов конструкции АКТ ( $b \approx 15 \dots 20$  мм) возможна реализация явления „пробоя” материала конструкции под действием СВГС, если

$$(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр} \geq (\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр, b_i=25\text{мм}}, \quad \text{а} \quad \frac{d_{кр}}{b} \geq 2,5 \dots 2,7.$$

Другими словами, если величина технологического параметра достигается за счет высокого давления  $p_k$  и соответственно уменьшенного значения  $d_{кр}$ , то при  $\frac{d_{кр}}{b} < 2,5 \dots 2,7$  не происходит „пробоя” материала, а реализуется процесс резки плавлением. И наоборот, если технологический параметр достаточен для перфорации материала и при этом величина  $\frac{d_{кр}}{b} \geq 2,5 \dots 2,7$ , что соответствует допущению об одностороннем нагреве пластины с постоянным по поверхности значением  $\alpha_{эф}$ , происходит механическое разрушение разупрочненного металла за счет динамического напора СВГС.

### 3. Результаты критериальных оценок теплового состояния конструкций предшествующих их разрушению

В качестве источника СВГС при выполнении экспериментальных исследований теплового состояния металлоконструкций применялись термогазоструйные резаки воздушно-реактивного типа, в качестве горючего использовался бензин марки А-76. Диапазон  $\alpha_{ок}$  поддерживался на уровне  $\alpha_{ок} = 1,2$ , диапазон давлений  $p_k = (5 \dots 14) \cdot 10^5$  Па, что определило значение  $\beta_{теор} \approx 1184 \text{ м/с}$ ;  $\alpha_{эф} = 5800 \dots 16250 \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}$ . Диапазон характерных толщин металлоконструкций изменялся в диапазоне  $b = (1 \dots 20) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Установлено, что существует три возможных результата (следствия) теплового воздействия СВГС на объекты АКТ, зависящие от критерия Био (17).

1. При малых значениях технологического параметра для любых соотношений  $d_{кр}/b$  конструк-

ции рассеивают подведенное по средствам СВГС тепло и остаются целостными работоспособными. Режим назван нами „радиаторным”. Параметрические условия реализации радиаторного режима могут быть сформулированы следующим образом:  $(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{b_i} \leq (\dot{m}_{\Sigma P_k})_{рад, b_i}$ ,  $Bi \leq Bi_{рад}$  для всего диапазона  $\frac{d_{кр}}{b}$ .

2. Диапазон диаметрально противоположного по результату теплового воздействия – для толщин  $b_i$  существуют значения технологического параметра  $(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{b_i} \geq (\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр, b_i}$  при которых происходит механический „пробой” материала без признаков его плавления в области реза. При этом должно выполняться дополнительное условие –  $\frac{d_{кр}}{b} \geq 2,5 \dots 2,7$ . При меньших значениях  $\frac{d_{кр}}{b}$  процесс „пробоя” трансформируется в перфорацию конструкции плавлением.

3. Существует обширный диапазон значений технологического параметра  $(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{рад, b_i} < (\dot{m}_{\Sigma P_k})_{b_i} < (\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр, b_i}$ , при которых реализуется комбинированный процесс перфорации – плавление металла в области воздействия СВГС с последующим „пробоем” нерасплавленной остаточной толщины материала.

### Заключение

В результате теоретического анализа и проведения экспериментальных исследований установлены критериальные границы трех режимов теплового воздействия СВГС на элементы конструкции АКТ: долговременного сопротивления тепловому и динамическому воздействию; плавление конструкций под действием СВГС с последующим „пробоем” оставшейся толщины металла динамическим напором струй; быстрый процесс „пробоя” материала без плавления.

Установлено также, что результаты обозначенных событий в широком диапазоне определяющих параметров могут быть обобщены с помощью критерия Био, в котором учитываются особенности подвода тепла к исследуемым объектам посредством СВГС

$$Bi = \frac{2C_w \cdot b \cdot \sqrt{(\dot{m}_{\Sigma P_k})_{пр, b} \cdot \beta_{теор}}}{\lambda \cdot d_{кр} \sqrt{\pi}},$$

а также безразмерного геометрического параметра, характеризующего соотношение размеров СВГС с толщиной элемента конструкции.

## Литература

1. Набокина Т.П. Анализ технологий утилизационной фрагментации планеров воздушных судов / Т.П. Набокина // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 2 (18). – С. 22-27.

2. Полежаев Ю.В. Тепловое разрушение материалов / Ю.В. Полежаев, Г.А. Фролов. – К.: Академперіодика, 2006. – 352 с.

3. Набокина Т.П. Влияние режимных параметров ЖРД МТ на процессы разупрочнения алюминиевых сплавов в зоне воздействия сверхзвуковой газовой струи / Т.П. Набокина, А.В. Гайдачук, А.М. Грушенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 7 (43). – С. 78-80.

4. Спесивцев В.В. Методика инженерного расчета теплообмена сверхзвуковой газовой струи с преградой в окрестности критической точки / В.В. Спесивцев, А.П. Фурсов // *Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика: сб. науч. тр.* – Х., 1982. – С. 83-92.

5. *Машиностроение: энциклопедический справочник в 15 т.* – Т. 1, кн. 1. – М.: Машиностроение, 1947. – 444 с.

6. *Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник в 5 т.* – Т. 1. – М.: АН СССР, 1971. – 267 с.

7. Орлов Б.В. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе / Б.В. Орлов, Г.Ю. Мазинг. – М.: Машиностроение, 1968. – 536 с.

Поступила в редакцию 13.05.2009

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

#### КРИТЕРІАЛЬНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПЕРЕД ГАЗОДИНАМІЧНИМ РУЙНУВАННЯМ КОНСТРУКЦІЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

*О.В. Гайдачук, О.М. Грушенко, Т.П. Набокіна*

Виконано теоретичний аналіз особливостей теплового впливу надзвукових високотемпературних газових струменів на елементи конструкцій об'єктів аерокосмічної техніки. Інтерпретовані результати експериментальних досліджень, зв'язаних із граничними режимами такого впливу, коли матеріал конструкції піддається руйнуванню термомеханічному чи термометалургійному (руйнуванню плавленням). Запропоновано узагальнити отримані результати за допомогою модифікованого критерію Біо, що враховує відомі і встановлені експериментально особливості підведення тепла до конструкції за допомогою надзвукових високотемпературних газових струменів. Позначені критеріальні границі можливих наслідків такого впливу. Пропонується використовувати отримані результати при розрахунку техніко-економічних показників АКТ, а також для прогнозування стану елементів конструкції літальних апаратів при газоструменевому впливі.

**Ключові слова:** утилізація об'єктів, тепловий стан аерокосмічної техніки, надзвукові високоенергетичні струмені, перфорація матеріалу обшивань літальних апаратів.

#### CRITERION DEPENDENCES FOR DEFINING OF HEAT CONDITION ALUMINIUM ALLOYS CONSTRUCTIONS BEFORE THEIR GAS-DYNAMIC DESTRUCTION

*A.V. Gaydachuk, A.M. Grushenko, T.P. Nabokina*

Theoretical analysis of features supersonic high-temperature gas stream heat influence on construction elements of aerospace equipment is done. Results of experimental investigations connected with marginal conditions such influence when construction material subjected to thermomechanical or thermometallurgical (melting) destruction are construed. It is suggest to summarize findings with the help of modified Bio criterion which take into account known and experimentally defined features of heat application to the construction with the help of supersonic hightemperature gas streams. Criterion boundaries of possible consequences of such influence are indicated. It is propose to use obtained results at calculation of aerospace equipment technical and economic characteristics and also for prognostication of aircraft construction elements condition under gas streams influence.

**Key words:** objects utilization, heat condition of aerospace equipment, supersonic high-enthalpy streams, aircraft skin material perforation.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.gaydachuk@khai.edu.

**Грушенко Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aagrushenko@mail.ru.

**Набокина Татьяна Петровна** – инженер 1-й категории кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ttabokina@ukr.net.