

УДК 629.73.004.8:532.525.6

Т.П. НАБОКИНА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ СВЕРХЗВУКОВЫМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СТРУЯМИ**

При реализации технологии разделительной резки в процессе утилизации летательных аппаратов установлено существенное влияние динамического напора режущих струй на формирование зоны реза. Проведен анализ физических процессов плавления, разупрочнения и разрушения материала в зоне реза. На основании этого создана расчетно-аналитическая модель исследуемых процессов. Выполнены тестовые расчеты процесса разделительной резки с учетом так называемого «пробоя» разупрочненного материала и установлено приемлемое соответствие теоретической модели экспериментальным данным.

**утилизационная фрагментация, разупрочнение, пробой, разрушение преграды, зона реза****Введение**

В настоящее время как на Украине, так и во всем мире остро стоит проблема сбережения запасов природных ресурсов. Истощение месторождений, а также увеличение затрат на добычу природного сырья заставляет уделять большее внимание использованию вторичного сырья, особенно в машиностроении [1, 2]. Утилизация непригодной для эксплуатации или списанной техники, в том числе и авиационной – один из вариантов решения проблемы.

В ряде работ [3 – 6] отмечается универсальность использования сверхзвуковых высокотемпературных струй (СВС) продуктов сгорания для фрагментации конструкций из различных материалов в широком диапазоне их теплофизических свойств и геометрических характеристик.

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» руководителем НИЛ «Энергия» к.т.н. А.М. Грушенко впервые в практике утилизации списанной авиационной техники было установлено существенное влияние динамического воздействия СВС на формирование зоны реза. Данное явление проявляется в примерно полуторакратном увеличении скорости резки корпусов авиационной техники по сравнению с распространенной тех-

нологией резки трансзвуковыми струями кислородно-пропановых резаков конструкции Самарского авиационного университета. Физический смысл происходящих при этом процессов не исследовался ранее, однако понятен и может быть обоснован следующим образом. При воздействии на разрезаемый материал СВС реализуется процесс эффективного концентрированного подвода тепла в зону реза. Разрезаемый материал при этом разупрочняется, что приводит к явлению, названному нами пробоем – удалению фрагмента материала в зоне реза за счет напряжений, возникающих при динамическом воздействии заторможенной сверхзвуковой струи. Исследование указанных явлений является актуальной задачей, так как позволит минимизировать энергопотребление при утилизации авиационной техники.

**Целью работы** является разработка модели и расчет характерных параметров процесса разрушения преграды при действии на нее стационарной сверхзвуковой высокотемпературной струи продуктов сгорания. В качестве преграды рассматривается листовая алюминиевый материал, как наиболее часто применяемый в конструкциях планеров самолетов; в качестве источника СВС – генератор струй конструкции ХАИ, работающий на топливной паре «сжатый воздух + углеводородное горючее».

### Анализ процесса воздействия стационарной СВС на преграду

СВС продуктов сгорания, обеспечивая высокую концентрацию энергии на относительно малой площади, позволяет резать материалы с различными теплофизическими свойствами, в том числе и алюминиевые сплавы. При этом формируется узкая зона реза, а потери металла за счет уноса его СВС минимальны [3]. Воздействие газовой струи на листовый материал представляет собой сложный физический процесс, связанный с поглощением и отражением тепла металлом, его распространением по преграде за счет теплопроводности, а также механическими напряжениями, возникающими за счет динамического напора СВС.

Теоретическое исследование указанных процессов сводилось к совместному решению сопряженных задач подвода и распространения тепла в преграде и ее прочности. Основные геометрические характеристики и параметры исследуемых процессов представлены на рис. 1, где:

- 1 – генератор СВС;
- 2 – струя продуктов сгорания;
- 3 – разрушаемая преграда;
- 4 – шарнирная модель закрепления разрушаемой преграды в зоне реза;

$p$  – распределенная нагрузка при динамическом воздействии СВС;

$r_c$  – радиус струи при встрече с преградой;

$R$  – расстояние от оси струи до шарнирной опоры;

$b$  – толщина материала;

$Q$  – тепловой поток.

Общие физические представления о происходящих процессах позволяют на этапе теоретического описания сделать следующие допущения.

1. Материал преграды однороден и изотропен.
2. Контакт стационарной СВС при ортогональной встрече с преградой имеет форму круга радиусом  $r_c$ .

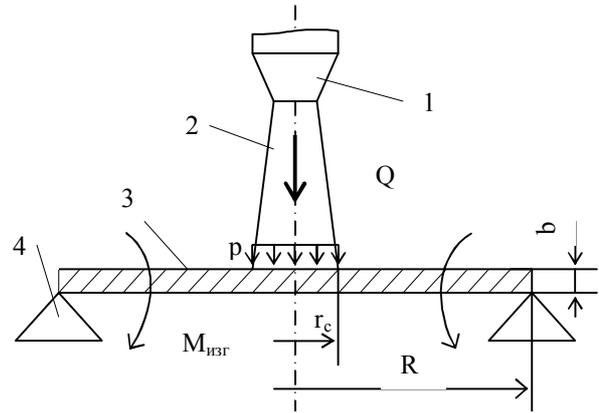


Рис. 1. Геометрические характеристики и параметры исследуемых процессов разрушения преграды СВС

3. Газодинамическое и тепловое воздействие равномерно распределено по площади круга радиусом  $r_c$ .

4. При решении прочностной задачи принята модель осесимметричного кругового шарнирного закрепления пластины, характеризующаяся размером  $R$ .

5. Предполагается, что подвод тепла к тонкой жесткой пластинке завершается в пределах радиуса шарнирного закрепления  $R$ .

6. Тепловыми потерями излучения с зоны реза пренебрегаем.

7. Распределение температуры по толщине пластины принимаем постоянным.

Напряжения, возникающие в материале пластинки от динамического воздействия струи с учетом допущений, могут быть выражены известным соотношением [7]:

$$(\sigma_r)_{\max} = \pm \frac{6M_r}{b^2},$$

где  $M_r$  – изгибающий момент, Н;  $b$  – толщина пластинки, м.

Величина  $M_r$  получена при решении статически неопределимой задачи изгиба круглой пластинки, нагруженной по центру распределенной силой

$$M_r = D \cdot C1 - \frac{3pr^2}{16} + \mu \left( D \cdot C1 - \frac{pr^2}{16} \right),$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость, Н м;  $C1$  – коэф-

коэффициент интегрирования;  $p$  – распределенная нагрузка, Н/м<sup>2</sup>;  $r$  – текущая координата, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Коэффициент интегрирования  $C1$  определен из условий закрепления пластинки и выражается соотношением

$$C1 = \frac{pr_c^2}{8D} - \frac{pr_c^2}{4D} \ln r_c + \frac{pr_c^2}{8D} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)} + \frac{pr_c^2}{4D} \ln R - \frac{pr_c^4}{16DR^2} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)}.$$

Для решения задачи распространения тепла по преграде использовалось основное уравнение теплопроводности для исследуемого участка преграды, взаимодействующего со струей:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\alpha_{эф}(T_{cmp} - T)}{c\rho b}$$

и для участков, непосредственно не взаимодействующих со струей:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right),$$

где  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/мК;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/кгК;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – расстояние от центра струи до точки, м;  $\alpha_{эф}$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> К;  $b$  – толщина пластины, м;  $T_{cmp}$  – температура струи, К.

Сопряженное решение обеих задач выполнялось для следующих величин основных геометрических и режимных параметров воздействия СВС на преграду:

$$b = 4 \times 10^{-3} \text{ м}; r_c = 14,44 \times 10^{-3} \text{ м};$$

$$R = 50 \times 10^{-3} \text{ м}; p = 1,388 \times 10^5 \text{ МПа};$$

$$T_{cmp} = 1500 \text{ К}; \alpha_{эф} = 10135 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Полученные в результате теоретического анализа значения напряжений  $\sigma_r$ , возникающие при динамическом воздействии сверхзвуковых струй на утилизируемый материал, представлены на рис. 2.

Решение задачи теплопроводности выполнялось

на ПЭВМ методом конечных разностей [8 – 10]. На рис. 3 показана зависимость изменения температуры материала преграды по времени и расстоянию до оси симметрии струи продуктов сгорания.

Для сопряжения тепловой и прочностной задач с целью дальнейшего исследования явления пробоя проведен теоретический и численный анализ разупрочнения материала в зоне реза. Результаты анализа представлены на рис. 4. Для построения распределения  $\sigma_B$  по материалу преграды в процессе его температурного разупрочнения в реальном масштабе времени использовались данные зависимости  $\sigma_B$  от  $T$  приведены в [11].

Вполне очевидно, что время соприкосновения поверхностей, характеризующих зависимость  $\sigma_r(r)$  и зависимость  $\sigma_B(T, r, \tau)$  определяет возникновение явления разупрочнения металла в точке соприкосновения  $K$  (рис. 4), которое в последующие моменты времени распространяется и формирует зону границы разупрочнения металла (линия  $L$ , рис. 4). На этапе теоретического анализа будем считать, что явление пробоя возникает при локализации границы разупрочнения на размере  $r$ , равном диаметру выходного сечения сопла, что обуславливают многочисленные экспериментальные наблюдения. Таким образом, можно определить время пробоя материала. Для данных параметров струи и теплофизических характеристик материала это время составляет около 2 с. При этом температура материала (рис. 3) достигает порядка 900 К, что ниже температуры плавления алюминиевых сплавов (922 – 933 К).

Эксперименты, проведенные на огневом стенде НИЛ «Энергия» ХАИ с параметрами инструмента, соответствующими теоретическим данным, подтверждают полученные результаты: нарушение целостности металла (пробой) происходит через 1,8 – 2с после начала нагрева СВС. Таким образом, получено достаточно хорошее соответствие расчетно-теоретической модели экспериментальным данным.

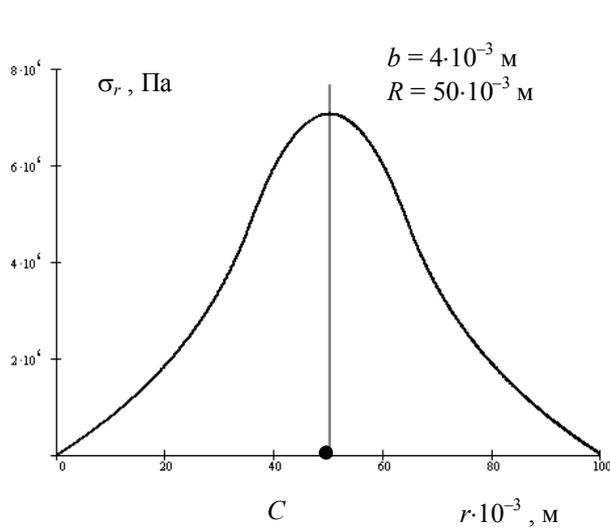


Рис. 2. Распределение напряжений  $\sigma_r$ , возникающих в преграде при динамическом воздействии струи (точка  $C$  – точка оси струи)

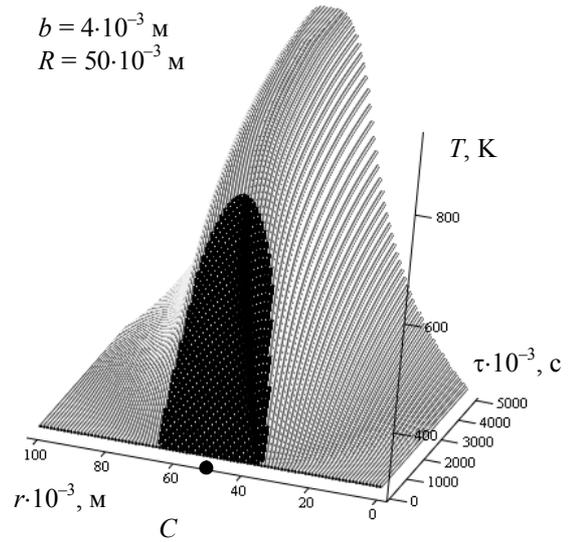


Рис. 3. Зависимость температуры материала преграды при тепловом воздействии струи (точка  $C$  – точка оси струи)

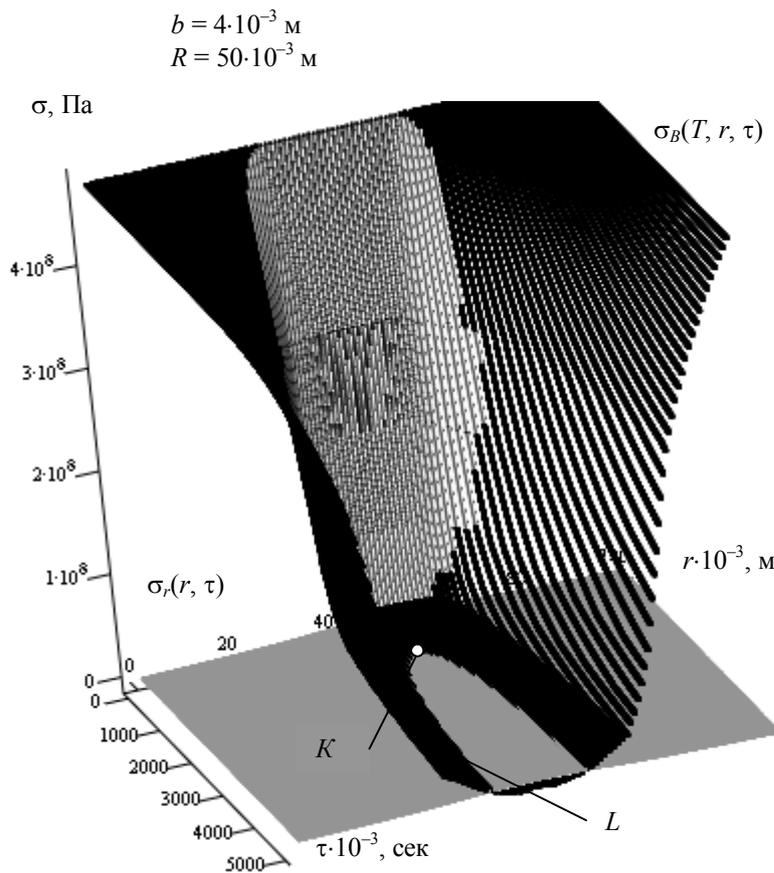


Рис. 4. Характер развития явления разупрочнения материала во времени от динамического и теплового воздействия струи (точка  $C$  – точка оси струи;  $K$  – точка начала возникновения явления разупрочнения;  $L$  – граница разупрочнения)

### Заключение

В результате проведенных исследований и анализа физических процессов, происходящих в зоне реза, создана расчетно-аналитическая модель, учитывающая силовые и тепловые особенности воздействия СВС на утилизируемую преграду. Теоретически подтверждено возникновение явления пробоя материала и таким образом обосновано явление увеличения скорости реза листовых материалов СВС. Получена хорошая сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего исследования процесса утилизационной резки материалов с учетом явления пробоя. Это позволит минимизировать энергозатраты на процесс резки и оценить экономическую целесообразность применения СВС для утилизации списанной авиационной техники.

### Литература

1. Белецкий В.М., Андрийко А.А., Билецкий А.К. Рециклинг алюминиевого лома после демонтажа авиакосмической техники // Труды Междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (МЕЕ-2000). – Кацивели, Крым. – 2000. – С. 162.
2. Гайдачук А.В. Информационные аспекты нетрадиционного подхода к проблеме утилизации конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов // Открытые информационные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2002. – Вып. 15. – С. 94 – 104.
3. Заботин В.Г., Косенко А.И., Осипов А.И., Первышин А.Н. Тепловой механизм разрушения преграды трансзвуковой струей продуктов сгорания ракетных топлив // ИФЖ. – 1983. – Т. 44, № 5. – С. 755 – 760.
4. Набокина Т.П. Анализ технологий утилизационной фрагментации планеров воздушных судов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – Вып. 2. – С. 22 – 27.
5. Спесивцев В.В. Особенности взаимодействия сверхзвуковой струи с поверхностью теплообмена в окрестности критической точки // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. – Х.: ХАИ. – 1981. – С. 53 – 56.
6. Жердев Г.С. Исследование и внедрение термической резки гранита в массиве воздушными газоструйными инструментами: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Х., 1974. – 199 с.
7. Сопротивление материалов / Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка и др.; под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища шк., 1986. – 775 с.
8. Яльницкий Л.Ф. Анализ распределения температуры в частном случае нагрева тела распределенным источником // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Х. – 1974. – Вып. 11. – С. 84 – 88.
9. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы (введение в теорию). – М.: Наука, 1973. – 400 с.
10. Амброжевич А.В. Методы численного моделирования теплофизических процессов в двигателях летательных аппаратов: Конспект лекций. – Х.: ХАИ, 2001. – 36 с.
11. Машиностроение. Энциклопедический справочник в 15 т. – М., 1947. – Т.4. – С. 218.

*Поступила в редакцию 4.09.2005*

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