

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 .

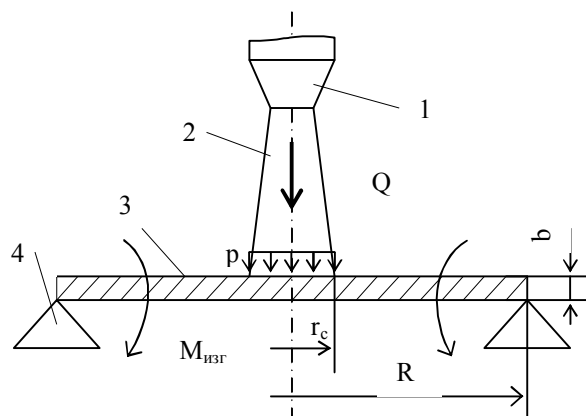


Рис. 1. Геометрические характеристики и параметры исследуемых процессов разрушения преграды СВС

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/м²; r – текущая координата, м; μ – 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; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/мК; c – удельная теплоемкость, Дж/кгК; ρ – плотность, кг/м³; r – расстояние от центра струи до точки, м; $\alpha_{эф}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² 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 σ_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 σ_B по материалу преграды в процессе его температурного разупрочнения в реальном масштабе времени использовались данные зависимости σ_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.

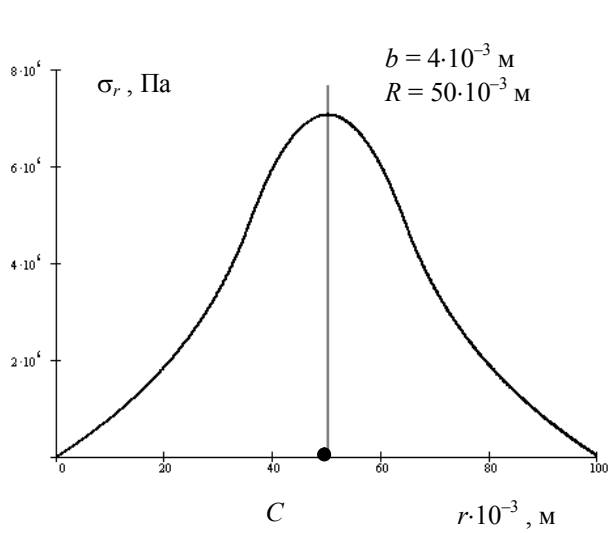


Рис. 2. Распределение напряжений σ_r , возникающих в преграде при динамическом воздействии струи (точка C – точка оси струи)

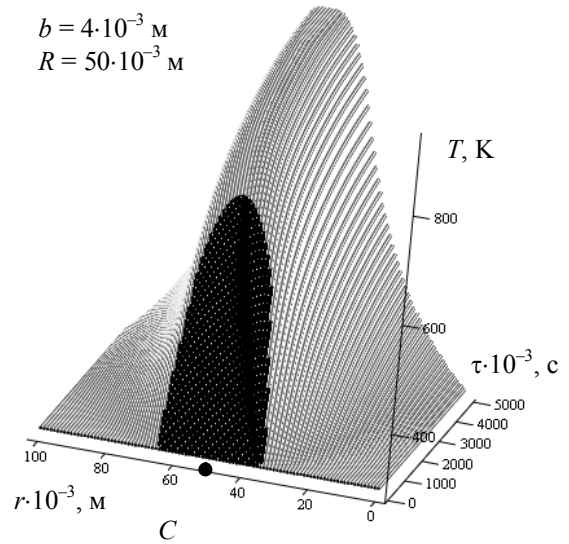


Рис. 3. Зависимость температуры материала преграды при тепловом воздействии струи (точка C – точка оси струи)

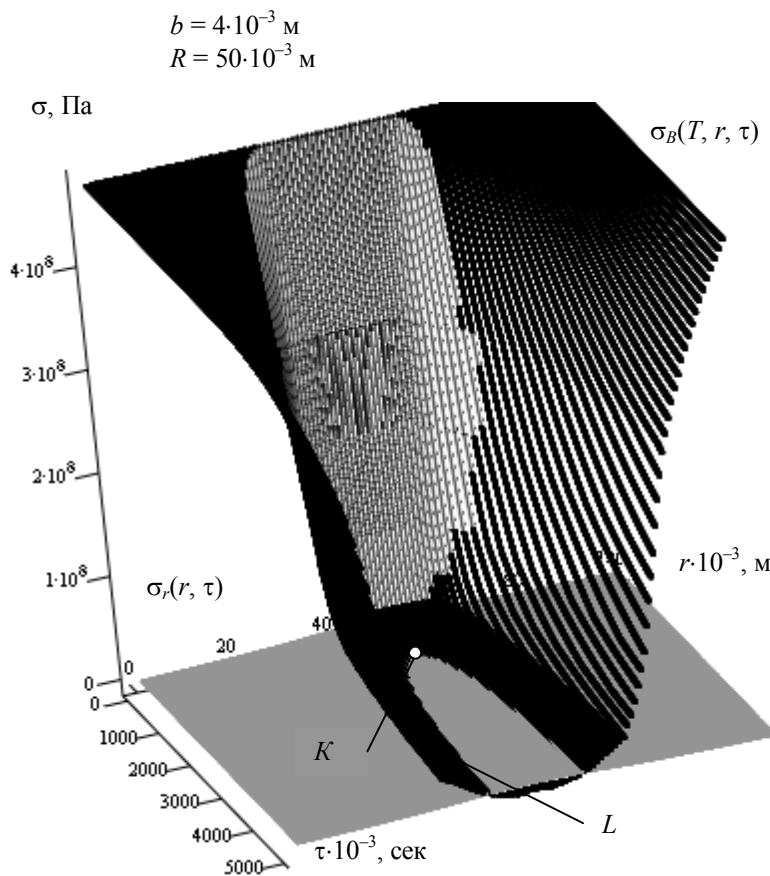


Рис. 4. Характер развития явления разупрочнения материала во времени от динамического и теплового воздействия струи (точка C – точка оси струи; K – точка начала возникновения явления разупрочнения; L – граница разупрочнения)

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 сходимости 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.