

УДК 532.525.6

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

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

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГАЗОСТРУЙНЫХ РЕЗАКОВ В РУЧНОМ И МЕХАНИЗИРОВАННОМ (МАШИННОМ) ВАРИАНТАХ ИСПОЛНЕНИЯ

Выполнен совместный анализ режимных, технологических и эргономических параметров термогазоструйных резаков, реализующих утилизационную резку объектов аэрокосмической техники (АКТ). На основании совместного решения эмпирических соотношений и теоретических зависимостей установлена связь между реактивной тягой термогазоструйных резаков и толщиной утилизируемого материала. Построена номограмма для нахождения реактивной тяги в зависимости от толщины обшивки АКТ и давления в камере сгорания резака. На номограмме установлены границы определяющих величин, которые обуславливают реализацию ручной или механизированной технологий резки.

**Ключевые слова:** утилизационная фрагментация, термогазоструйный резак, эргономические показатели, реактивная тяга.

### Введение

Применение экономически целесообразной технологии термогазоструйной резки разупрочнением материала (ТГРРМ) при утилизации объектов аэрокосмической техники предполагает оценку эргономических показателей термогазоструйных резаков, работа которых сопровождается специфическими воздействиями на оператора. Одним из них является реактивная тяга. Ее нормирование в зависимости от режимных параметров резаков и особенностей утилизируемых объектов подлежит специальному исследованию с целью выработки рекомендаций по применению резаков данного типа.

### Анализ эргономических ограничений при использовании термогазоструйных резаков

Ограничение действующих на оператора усилий при использовании ручных механизмов и инструментов регламентируется санитарными нормами [1], а в Евросоюзе – соответствующими директивами. Существующие ограничения массы ручных инструментов лимитируют нагрузку на кисть оператора и непосредственно связаны с безопасностью их применения. Для двуручных и одноручных механизмов такие ограничения существенно различаются. Термогазоструйные резаки и очистители предполагают использование оператором только одной руки при их применении (рис. 1).

В силу конструктивной и функциональной специфичности таких устройств, анализ их эрго-

номических показателей и соответствующих им рекомендаций по ручному или механизированному применению предполагает учет многих факторов.



Рис. 1. Выполнение типовой технологической операции термогазоструйным резаком

На рис. 2 приведена схема резака с ручкой пистолетного типа, а также расчетная схема действующих на него усилий.

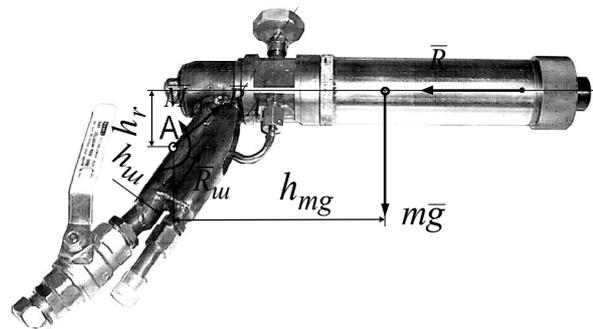


Рис. 2. Расчетная схема действующих на термогазоструйную установку усилий

На приведенной схеме точкой А обозначено место приложения усилий оператора, которое ха-

рактируется силой  $\bar{R}_A$  и моментом  $M_A$ , где  $\bar{R}_A$  – равнодействующая всех внешних сил, действующих на инструмент, а  $M_A$  – равнодействующий момент.

К внешним силам относятся:  $\bar{R}$  – реактивная тяга, развиваемая камерой сгорания реактивного типа;  $(m\bar{g})$  – вес инструмента;  $\bar{R}_{ш}$  – результирующая сила от присоединяемых шлангов.

Очевидно, что при равновесии резака в руке оператора должно выполняться условие равенства нулю всех сил и моментов:

$$\bar{R} + m\bar{g} + \bar{R}_{ш} + \bar{R}_A = 0; \quad (1)$$

$$R \cdot h_r + R_{ш} \cdot h_{ш} + M_A = m\bar{g} \cdot h_g. \quad (2)$$

При этом точка А – центр условной опоры (кистевой сустав руки оператора).

Так как основные размеры резаков известны, приведенные уравнения могут быть проанализированы.

Очевидно, что рука оператора создает внешнее усилие на резак  $\bar{R}_A$ , а оператор воспринимает усилие  $-\bar{R}_A$ . Аналогично, кисть оператора создает уравновешивающий момент  $M_A$ , а сама воспринимает момент  $-M_A$ .

Как правило, директивные документы ограничивают усилие на кисть оператора от массовых сил величиной  $|m\bar{g}| = 30 \dots 50$  Н. Так как на инструмент также действуют внешние силы от присоединенных магистралей и реактивная тяга  $\bar{R}$ , замыкающее усилие  $\bar{R}_A$  может быть определено расчетно-эмпирическим методом и должно также лимитироваться величиной в  $30 \dots 50$  Н. Вполне очевидно, что конструкция резака существенно влияет на решение векторного уравнения (1). Для широко применяемых резаков:

$$|m\bar{g}| \approx 35 \text{ Н}; \quad |\bar{R}| \approx 30 \dots 150 \text{ Н}; \quad |\bar{R}_{ш}| \approx 15 \dots 20 \text{ Н}.$$

Тогда векторная диаграмма действующих на резак внешних сил будет иметь вид, представленный на рис. 3.

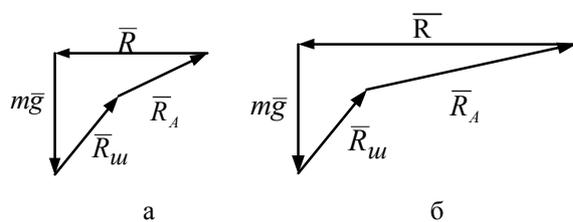


Рис. 3. Векторная диаграмма действия внешних сил ( $K_v = 3$  Н/мм – масштаб векторной диаграммы):

$$а - |\bar{R}| = 50 \text{ Н}; \quad б - |\bar{R}| = 90 \text{ Н}$$

Графическое представление векторного уравнения (1) приведено для двух различных скалярных

величин тяги  $|\bar{R}| = 50$  Н,  $|\bar{R}| = 90$  Н. Видно, что замыкающий вектор  $\bar{R}_A$  в первом случае по абсолютной величине  $|\bar{R}_A| < |m\bar{g}|$ , а при  $|\bar{R}| \approx 90$  Н становится примерно равным  $|\bar{R}_A| \approx 50$  Н. Дальнейшее увеличение реактивной тяги приводит к увеличению значения  $|\bar{R}_A| > 50$  Н. Так как оператор воспринимает именно величину  $|\bar{R}_A|$ , то, исходя из вышеизложенного, для принятой конструкции газоструйных резаков величина реактивной тяги не должна превышать 90 Н. В противном случае необходимо принимать конструктивные решения по уравновешиванию тяги и (или) переходить на двуручную систему удержания резака, что позволит увеличить допустимую нагрузку на оператора до  $130 \dots 150$  Н [1]. При тяге более 150 Н необходимо применять манипуляторы, т.е. механизировать процесс резки.

Проанализируем уравнение моментов (2). Для резаков существующей конструкции известны величины рычагов внешних сил (рис. 2) относительно кистевого сустава оператора. Так  $h_r = 0,105$  м;  $h_{mg} = 0,162$  м;  $h_{ш} = 0,05$  м, тогда равнодействующий момент по формуле (2) при тяге  $|\bar{R}| = 50$  Н будет равен  $M_A = 1,53$  Н·м. Таким образом, при умеренной реактивной тяге резака в 50 Н оператор воспринимает кистью руки незначительный опрокидывающий момент  $M_A = 1,53$  Н·м по часовой стрелке, который он легко парирует кистью руки. По мере возрастания тяги  $|\bar{R}| > 50$  Н, опрокидывающий момент  $M_A$  становится равным нулю (при значении  $|\bar{R}| = 65,3$  Н), а затем при значениях тяги, которая принята за предельно возможную для ручного управления резаком  $|\bar{R}| = 90$  Н, опрокидывающий момент меняет знак и становится равным  $M_A = -2,47$  Н·м, что вполне приемлемо по условиям эргономики (например, ручная дрель мощностью 0,8 кВт при оборотах шпинделя 600 – 800 об/мин создает реактивный крутящий момент  $M_A \approx 10$  Н·м, допускаемый нормативными документами [1]).

Таким образом, можно сделать вывод, что основным эргономическим ограничением применимости термогазоструйных резаков является величина реактивной тяги, которая в ручном режиме резки не должна превышать  $|\bar{R}| = 90$  Н. При реактивной тяге резака от 90 до 130 Н необходимо удерживать резак двумя руками, а при  $|\bar{R}| > 130$  Н необходимо механизировать процесс резки – устанавливать резак на манипулятор.

Следует также отметить, что реактивная тяга, неизбежно возникающая при эксплуатации реактивных резаков, не является негативным явлением, так как позволяет сбалансировать резак по опрокидывающему моменту и таким образом обеспечить его приемлемые эргономические характеристики.

### Эргономические аспекты применения технологий ручной и механизированной утилизационной резки объектов АКТ методом ТГРРМ

Известно [2], что при реализации резки методом ТГРРМ материалов на основе алюминиевых сплавов путем разупрочнения их в зоне реза, необходимо обеспечить значение так называемого термогазодинамического параметра резаков в диапазоне  $\dot{m}_T P_k = (2,5...4,5) \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \text{Па}$ .

Так как величина давления в камере сгорания резака  $P_k$  и расход продуктов сгорания  $\dot{m}_T$  определяют величину возникающей реактивной тяги  $\bar{R}$ , необходим соответствующий анализ, который на этапе выбора технологий утилизации и применяемого оборудования позволит сделать вывод о реализации ручного режима резки или о необходимости его механизации.

В зависимости от характерной толщины обшивки утилизируемых объектов целесообразно применять резаки, которые выполняют фрагментацию материала с наименьшими материальными затратами. Термогазодинамический параметр для таких резаков определяется эмпирическим соотношением

$$\dot{m}_T P_k = 3 \cdot 10^{11} b^3 - 4 \cdot 10^9 b^2 + 2 \cdot 10^7 b - 2048,1, \quad (3)$$

где  $\dot{m}_T P_k$  – термогазодинамический параметр,  $\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \text{Па}\right)$ ;  $b$  – толщина разрезаемого материала, м.

Известно, что реактивная тяга, возникающая при работе резака ракетного типа с расчетным или недорасширенным сверхзвуковым соплом, определяется зависимостью [3]

$$R = \dot{m}_T w_a = \dot{m}_T \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_{пр} T_k \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

где  $w_a$  – скорость истечения продуктов сгорания из сопла;

$P_a$  – давление на срезе сопла; для расчетных сопел  $P_a = P_n$ ,  $P_n$  – давление окружающей среды;

$R_{пр}$ ,  $T_k$ ,  $k$  – термодинамические характеристики продуктов сгорания.

Так как величина  $\dot{m}_T$  может быть выражена из уравнения (3), то величина реактивной тяги, возникающей при работе газоструйного резака с учетом выражения (4) может быть определена по формуле

$$R = \left( 3 \cdot 10^{11} b^3 - 4 \cdot 10^9 b^2 + 2 \cdot 10^7 b - 2048,1 \right) \times \frac{1}{P_k} \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_{пр} T_k \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (5)$$

Значения  $k$ ,  $R_{пр}$ ,  $T_k$  могут быть определены для топливной пары «сжатый воздух+керосин» расчетным методом или по справочным данным [4] с учетом того, что камеры сгорания газоструйных резаков данного типа работают при значениях коэффициента избытка окислителя

$$\alpha_{ок} = 1,2 : k = 1,33; R_{пр} = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); T_k = 1500\text{К}.$$

Для  $P_a = P_n \cong 10^5 \text{Па}$  уравнение (3) может быть преобразовано к окончательному виду, удобному для непосредственного определения реактивной тяги резаков с расчетными соплами, которые позволяют осуществлять резку методом ТГРРМ алюминиевых обшивок объектов АКТ с характерной толщиной  $b$ :

$$R = (5,59 \cdot 10^{14} b^3 - 7,45 \cdot 10^{12} b^2 + 3,73 \cdot 10^{10} b - 3,82 \cdot 10^6) \frac{1}{P_k} \sqrt{1 - 17,42 P_k^{-0,25}}. \quad (6)$$

Отметим, что соотношение (6) получено на основании эмпирических и теоретических данных, поэтому размерность входящих в это соотношение величин следующая:  $[R] = \text{Н}$ ;  $[b] = \text{м}$ ;  $[P_k] = \text{Па}$ .

Для анализа эргономических характеристик резаков удобно графическое представление соотношения (6), представленное на рис. 4.

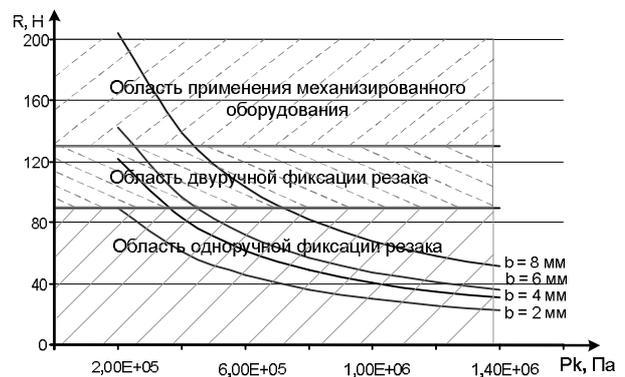


Рис. 4. Зависимость реактивной тяги термогазоструйных резаков  $R$  от давления в камере сгорания  $P_k$  для различных значений толщины материала  $b$

Представленная на рис. 4 номограмма позволяет уточнить алгоритм определения основных параметров термогазоструйных установок воздушно-реактивного типа для проведения утилизационной фрагментации объектов АКТ методом ТГРРМ и дать рекомендации о возможности реализации ручного режима резки или о необходимости его механизации.

### Заключение

Полученные в работе соотношения (3) и (6) позволяют определить технологические и режимные параметры процесса разделительной резки конструкций из алюминиевых сплавов методом ТГРРМ, а также рекомендовать ручной или механизированный процесс работы в зависимости от характерной толщины конструкций.

### Литература

1. ДСТУ EN 1005-2:2005. Безпечність машин. Фізичні можливості людини. Ч.3 Рекомендовані обмеження зусиль під час роботи з машинами. – На заміну ДСТУ EN 1005-3:2003, IDT; чинний з 2006-10-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 24 с.
2. Гайдачук А.В. Критеріальні залежності для визначення теплового стану, передшествуючого газодинамічному руйнуванню конструкцій з алюмінієвих сплавів / А.В. Гайдачук, А.М. Грушенко, Т.П. Набокіна // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2009. – № 8 (65). – С. 18-22.
3. *Ракетні двигатели: учебник / под ред. М. Баррер*. – М.: Оборонгиз, 1962. – 799 с.
4. Глушко В.П. *Термодинамічні та теплофізичні властивості продуктів згорання. В 5 т. Т. 3. Топлива на основі кислорода і воздуха / В.П. Глушко*. – М.: ВИНТИ, 1973. – 624 с.

Поступила в редакцію 19.01.2011

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

### ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОГАЗОСТРУМЕНЕВИХ РІЗАКІВ У РУЧНОМУ ТА МЕХАНІЗОВАНОМУ (МАШИННОМУ) ВАРІАНТАХ ВИКОНАННЯ

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

Виконано сумісний аналіз режимних, технологічних і ергономічних параметрів термогазоструменевих різаків, що реалізують утилізаційне різання об'єктів авіаційно-космічної техніки (АКТ). На підставі спільного рішення емпіричних співвідношень і теоретичних залежностей встановлено зв'язок між реактивною тягою газоструменевих різаків і товщиною утилізованого матеріалу. Побудована номограма для знаходження реактивної тяги в залежності від товщини обшивки АКТ і тиску в камері згорання різаків. На номограмі встановлені межі визначальних величин, які зумовлюють реалізацію ручної або механічної технології різання.

**Ключові слова:** утилізаційне фрагментування, термогазоструменевий різак, ергономічні показники, реактивна тяга.

### FEATURES OF TERMOGAZ-JET CUTTERS IN HAND AND MECHANIZED (MACHINE) VERSIONS

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

Has been performed a joint analysis of operating, technological and ergonomic parameters termogaz-jet cutters, whose implementing the utilization cutting of AST objects. Based on the joint decision of the empirical correlations and theoretical dependences the link between the gas thrust of termogaz-jet cutters and thickness of the utilized material has been established. A nomogram has built for being of thrust, depending on the thickness of AST plating and pressure in a cutter's combustion chamber. On a nomogram the borders of defining variables which stipulate realization hand or mechanized cutting technologies has set.

**Key words:** utilization fragmentation, termogaz-jet cutter, ergonomic parameters, reactive traction.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, 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.

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