

## **РІЗКА МЕТАЛУ НАДЗВУКОВИМИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМИ ГАЗОВИМИ СТРУМИНАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ ЗНЕМІЦНЮВАННЯ\***

### **Вступ**

У рамках «Договору про скорочення та обмеження стратегічних наступальних озброєнь» і програми робіт з ліквідації стратегічних авіаційних комплексів і засобів ураження до них, при реалізації програми утилізації списаних об'єктів аерокосмічної техніки (АКТ) за участю фахівців ХАІ вперше було виявлено ефект термічного різання алюмінієвих сплавів за допомогою надзвуків високотемпературних газових струмин (НВГС) без доведення матеріалу в зоні різку до плавлення [1]. Формування зони різку в цьому випадку відбувалося за рахунок швидкого термічного знеміцнювання матеріалу в зоні різку внаслідок сфокусованого високо-ефективного підведення тепла надзвуків струминами з подальшим винесенням знеміцненого фрагмента із зони різку динамічним впливом НВГС [2]. Розділове різання термічними методами є основною складовою будь-якого процесу утилізації великогабаритних об'єктів, до яких відносяться об'єкти АКТ. Метод різки на основі виявленого ефекту показав високу ефективність при утилізаційній фрагментації та економічну доцільність на етапі практичного використання [3].

Сьогодні технологічні процеси утилізаційної фрагментації, набори технологій для її проведення використовують за наявності того чи іншого обладнання, що позначається на рентабельності проведення утилізації. У зв'язку з цим пошук і дослідження нових технологій утилізації, способів їх комплексного використання, визначення їх вартісних показників є актуальним завданням. При обґрунтованому виборі технологій, чіткому створенні технологічних процесів, урахуванні сортності отриманого металобрухту можна значно збільшити дохід від утилізації.

Тому виникла необхідність продовження досліджень нового методу різки, який був названий авторами «теплова (термічна) газодинамічна різка знеміцнюванням матеріалу (ТГРЗМ)» [2], визначення технологічних параметрів його реалізації, області застосування та місця серед відомих термічних методів різання.

### **Основна частина**

Наведено огляд матеріалів, присвячених утилізації об'єктів АКТ, як одному з напрямів вирішення актуальної проблеми цивілізації, що пов'я-

---

\* Матеріали, що містяться в статті, опубліковані за результатами обговорення на науково-технічному семінарі кафедри конструкцій і проектування ракетної техніки.

зана з економією вичерпних сировинних ресурсів і збереженням навколишнього середовища. Проведено аналіз основних етапів технологічного процесу утилізаційної фрагментації корпусів об'єктів АКТ, виділено характерні операції для кожного з них.

Виявлено ефект знеміцнювання матеріалу під час його взаємодії з НВГС. Це дозволило реалізувати його різання без доведення до температури плавлення. Як генератори таких струмин запропоновано камери згоряння повітряно-реактивного типу з надзвуковими соплами на паливній парі «стиснене повітря+вуглеводневе пальне».

Для визначення ефективності методів утилізаційної фрагментації запропоновано застосувати розроблену методику селективного відбору методів, яка дозволяє з перелічених методів визначити набір потенційно перспективних із них для фрагментації об'єкта АКТ. Відбір здійснюється з урахуванням конструкційних особливостей АКТ, екологічної безпеки методів фрагментації, правових особливостей їх застосування і економічних показників [4].

Зазначено, що термічні методи розділового різання домінують при утилізації об'єктів АКТ, а також те, що різання знеміцнюванням корпусів об'єктів АКТ за допомогою НВГС є потенційно більш економічною, ніж різання плавленням.

Виділено основні технологічні параметри НВГС продуктів згоряння. Визначено вплив внутрішньокамерних процесів у газогенераторі на формування зони різку. Зазначено складність процесів, які проходять у матеріалі перешкоди при взаємодії з НВГС. Для їх розгляду використано комплексний метод дослідження з використанням основних положень теорій міцності й теплопередачі.

При дослідженні різки з ефектом знеміцнювання було використано методику, основу на вивченні елементарної складової процесу різання, а саме так званого «пробою», з подальшим використанням цих результатів при дослідженні процесу різання [5].

Були сформульовані певні припущення щодо проходження процесів у перешкоді при взаємодії з НВГС. Під дією теплової складової струмини в матеріалі перешкоди відбувається підвищення температури, що призводить до зменшення межі його міцності. Величина температури, а отже, і межі міцності, залежить від часу впливу струмини на матеріал. Силова дія струмини залежить від відновленої величини тиску на поверхні матеріалу, який, у свою чергу, визначається тиском у камері згоряння  $P_k$ . Під дією силової (динамічної) складової струмини у матеріалі виникають внутрішні напруження, які, можна вважати, не залежать від тривалості впливу струмини і є постійними в часі.

Було також зроблено припущення щодо умов виникнення «пробою». У деякий момент часу величина межі міцності матеріалу на його поверхні з боку дії струмини дорівнюватиме величині внутрішніх напружень перешкоди: почнеться процес знеміцнювання матеріалу в зоні різку. У момент часу, коли межа міцності матеріалу дорівнюватиме значенню

внутрішніх напружень на зворотному боці матеріалу по осі струмини (точка *A*, рис. 1), а на поверхні з боку дії струмини не виникне умов для плавлення матеріалу – відбудеться «пробій» – винесення фрагмента знеміцненого матеріалу із зони дії струмини продуктів згоряння її динамічним напором. Отже, необхідно визначити час, який потрібен для нагрівання матеріалу у точці *A* тепловою складовою струмини до температури, при якій межа міцності матеріалу буде дорівнювати внутрішній напрузі, котра виникає під дією динамічної складової струмини. Вирішення задачі було розділено на дві частини:

1) визначення максимальних напружень у матеріалі, що виникають від механічної дії струмини на пластину;

2) отримання розподілу температурного поля пластини кінцевої товщини по матеріалу (а разом з цим і розподілення напружень втрати міцності), що нагрівається високотемпературною струминою продуктів згоряння, від часу.

Розрахункову схему наведено у вигляді круглої, жорстко закріпленої пластини радіусом  $R$ , яка осесиметрично навантажена струминою продуктів згоряння, рівномірно розподіленою по площі контакту радіусом  $r_c$  (рис. 1).

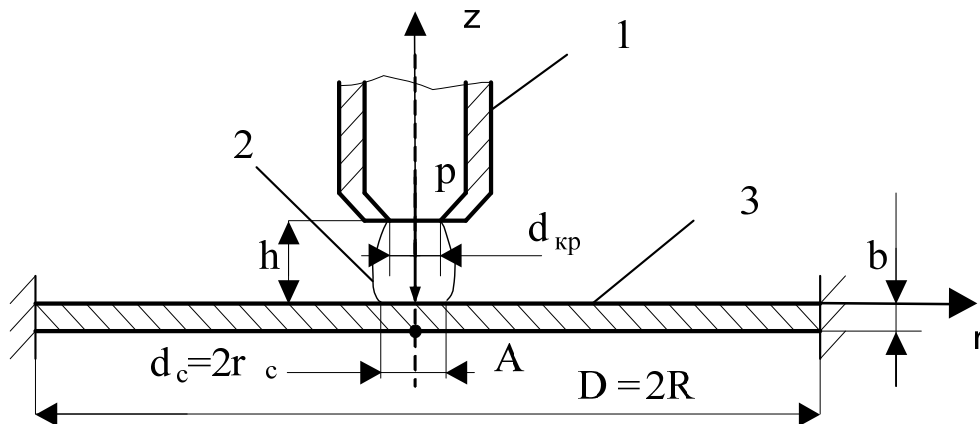


Рисунок 1 – Розрахункова схема взаємодії НВГС з перешкодою:

1 – сопло; 2 – ріжучий інструмент-струмина; 3 – матеріал;  $h$  – відстань від зрізу сопла до поверхні матеріалу;  $b$  – товщина матеріалу;  $d_{kp}$  – діаметр критичного зрізу сопла;  $D$  – діаметр закріплення матеріалу;  $d_c$  – діаметр струмини у момент зустрічі з матеріалом

Розрахунок на міцність за наведеною схемою відноситься до статично невизначених задач. Зроблені припущення дозволили визначити розподіл згинального моменту  $M_r$ , Н:

$$M_r = DC1 - \frac{3pr^2}{16} + \mu \left( DC1 - \frac{pr^2}{16} \right), \quad (1)$$

де  $D = \frac{Eb^3}{12(1-\mu^2)}$  – циліндрична жорсткість, Н·м;

$$C_1 = \frac{\rho r_c^2}{4D} \cdot \left( \frac{r_c^2}{4R^2} - \ln \frac{r_c}{R} \right) - \text{коефіцієнт інтегрування, } 1/\text{м}; \rho - \text{розподілене}$$

навантаження, Н/м<sup>2</sup>;  $r$  – поточна координата;  $\mu$  – коефіцієнт Пуасона;  $E$  – модуль подовжньої пружності, Н·м;  $r_c$  – радіус струмини у момент зустрічі з матеріалом, м;  $R$  – радіус закріплення пластини, м.

Внутрішнє напруження, Па, в матеріалі було визначено за допомогою відомої залежності  $(\sigma_r)_{max} = \pm 6M_r/b^2$ .

Теплові процеси у зоні дії струмини описані основним рівнянням теорії теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho} \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \frac{q_v}{c \cdot \rho},$$

де  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – теплофізичні характеристики матеріалу перешкоди, які залежать від температури металу. Внутрішнє джерело енергії відсутнє, тому рівняння матиме вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho} \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right).$$

Теплові процеси в матеріалі розглядалися в дві стадії: нагрівання матеріалу до температури плавлення і плавлення матеріалу.

При  $T < T_{пл}$

$$\begin{cases} c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z}; \\ \frac{\partial V}{\partial \tau} = 0 \end{cases}$$

при  $T = T_{пл}$

$$\begin{cases} L_{пл} \cdot \rho \frac{\partial V}{\partial \tau} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} \right) \cdot dV; \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \end{cases}$$

Визначено умови однозначності, які спільно з диференціальними рівняннями (ДР) дають повний математичний опис даного процесу теплопровідності:

- фізичні параметри  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $L_{пл}$ ;
- форми та геометричні розміри об'єкта  $r_c$ ,  $R$ ,  $b$ ;
- температура тіла в початковий момент часу  $T_{\tau=0} = T_0$ ;
- граничні умови, що характеризують взаємодію тіла з навколишнім середовищем:
  - $T_{r=R} = T_0$  - гранична умова першого роду;

- $q_w z=0, rc < r \leq R u z=b = 0$  - гранична умова другого роду;
- $q_w z=0, r \leq rc = \alpha_{эф} (T_{cmp} - T)$  - гранична умова третього роду,

де  $q_w$  – тепловий потік НВГС.

Вирішення ДР спільно з граничними умовами дозволило визначити функцію розподілу температури  $T=f(r, z, \tau)$  та дізнатися температуру в будь-якій точці матеріалу в заданий момент часу, а відомі залежності межі міцності від температури  $\sigma_B = f(T)$  дозволили отримати розподіл  $\sigma_B = f(r, z, \tau)$ .

За результатами досліджень зроблено висновки про розташування ріжучого інструмента відносно матеріалу, виділено основні параметри інструмента, які впливають на технологічні показники різання знеміцнюванням [6].

Розглянуто основні параметри устаткування – генератора НВГС, від яких залежить тепла та механічна потужність струмینی. Це  $P_K$  – тиск у камері згоряння,  $T_{cmp}$  – температура у камері згоряння,  $d_{кр}$  – діаметр критичного перерізу сопла,  $\dot{m}_T$  – витрата продуктів згоряння. Для проведення чисельного експерименту згідно з паспортними даними устаткування було визначено діапазон основних параметрів НВГС [7].

Чисельні розрахунки часу дії НВГС проводили для пластин з алюмінієвого сплаву Д16 товщиною  $b=(2...10) \cdot 10^{-3}$  м у діапазоні параметрів  $d_{кр}=(8...20) \cdot 10^{-3}$  м,  $P_K=(0,5...1,3)$  МПа,  $T_{cmp}=(2105...2108)$  К,  $\dot{m}_T=(0,04...0,3)$  кг/с,  $\alpha_{эф}=(5810...16260)$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Розрахунок нестационарного нагріву пластини виконувався із застосуванням чисельних методів на ПЕОМ, з урахуванням особливостей явних різницевої схеми. Інтервал часу  $\Delta\tau$  вибрано за умов стійкості різницевої схеми  $\Delta\tau \leq \frac{b^2 \cdot c \cdot \rho}{4\lambda}$ .

вої схеми  $\Delta\tau \leq \frac{b^2 \cdot c \cdot \rho}{4\lambda}$ .

Аналіз результатів чисельних досліджень показав, що зменшення кількості незалежних змінних може бути реалізовано, якщо ввести термогазодинамічний розмірний параметр термогазострумінного різача  $[\dot{m}_T \cdot P_K] = \text{кг} \cdot \text{Па}/\text{с}$ , який дозволяє оцінювати його теплові та газодинамічні можливості. Цей параметр характеризує дію НВГС на матеріал. Дійсно, темп підводження тепла до конструкції, а отже і темп знеміцнювання, залежить від масових витрат продуктів згоряння  $\dot{m}_T$ , кг/с. Отримані результати розрахунків узагальнені на графіку залежності часу впливу НВГС на матеріал перешкоди від термогазодинамічного параметра  $\dot{m}_T \cdot P_K$  (рис. 2).

За результатами проведених досліджень зроблено висновки:

1) час отримання отвору в перешкоді залежить від низки параметрів, основними з яких є тиск у камері згоряння, діаметр критичного перерізу сопла, товщина перешкоди;

2) для перешкод однієї товщини, час отримання отвору найповніше характеризується термогазодинамічним параметром  $\dot{m}_T \cdot P_K$ ;

3) для конкретної товщини матеріалу  $b_i$  існує певне значення параметра  $(\dot{m}_T \cdot P_K)_{b_i}$ , подальше збільшення якого не приводить до суттєвого зменшення  $\tau_{пр}$ ;

4) виділено три характерні області, що відрізняються механізмом проходження процесів у матеріалі, залежно від співвідношення термогазодинамічного параметра різача й товщини пластини (область вище межі с, «радіаторний режим»; між межами с і а область реалізації режиму «плавлення + пробій», в області за межею а завжди реалізується режим «пробій»).

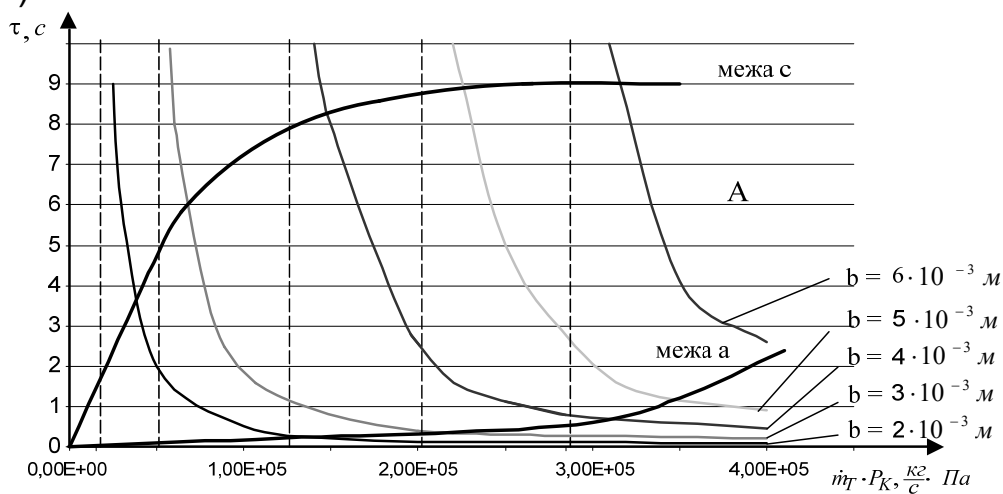


Рисунок 2 – Залежність часу отримання отвору в матеріалі від термогазодинамічного параметра

На рис. 3 зображено графік процесу знеміцнювання матеріалу в часі (показано зріз по осі симетрії дії струмینی).

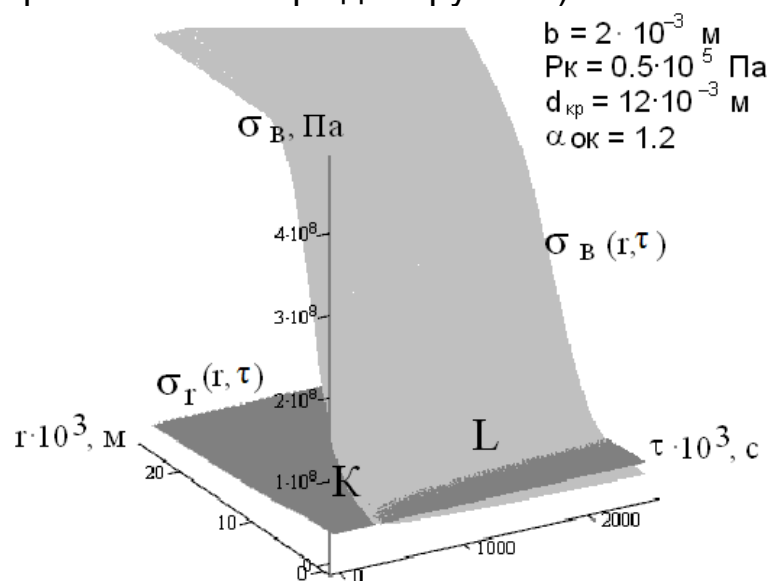


Рисунок 3 – Характер розвитку явища знеміцнювання матеріалу в часі  $K$  – точка початку знеміцнювання матеріалу;  $L$  – межа розвитку явища знеміцнювання

Визначено, що при певному співвідношенні технологічних параметрів (теплової потужності струмини, її динамічного напору, товщини матеріалу, який фрагментується, і його теплофізичних властивостей) струмина продуктів згоряння може різати метал плавленням, а може руйнувати його динамічним впливом, не досягаючи при цьому температури плавлення.

На рис. 4 схематично зображено розподіл внутрішнього напруження та напруження втрати міцності залежно від товщини перешкоди при однакових теплових і динамічних параметрах струмини

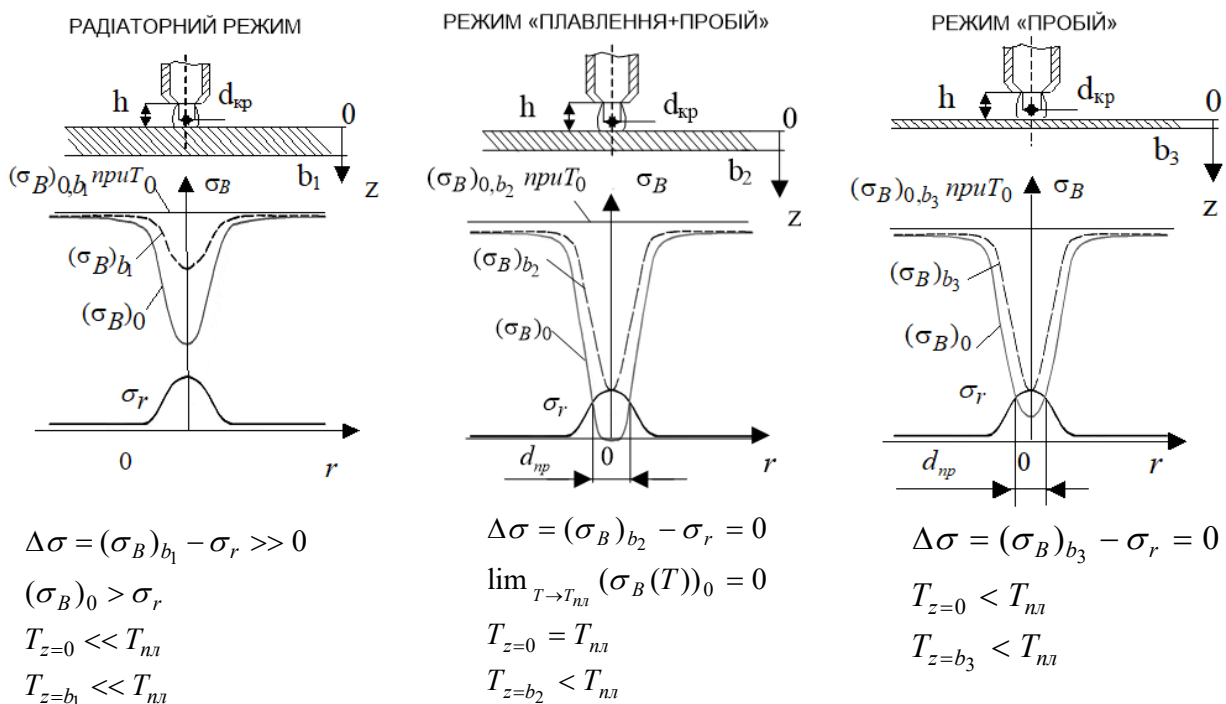


Рисунок 4 – Реалізація режимів взаємодії НВГС з матеріалами різної товщини  $\dot{m}_T \cdot P_K = const, (d_{kp} = const, P_K = const); b = var$

Було доповнено відому назву елементарного процесу різання плавленням «прожиг» новими термінами «плавлення+пробій» і «пробій», які характеризують відповідні фізичні процеси у зоні різки. Окремо виділено «радіаторний режим», що характеризується таким співвідношенням параметрів струмини й товщини матеріалу, при якому неможливо порушення його цілісності.

Наводяться результати експериментальних дослідів, що мають на меті визначення основних технологічних параметрів нового методу різки знеміцнюванням НВГС із застосуванням термогазоструминного устаткування, параметри якого обумовлені вище.

Мета цього етапу експериментальних досліджень – підтвердження принципової відмінності проходження фізичних процесів у матеріалах на

основі алюмінієвих сплавів при формуванні термічного різку залежно від їх товщини та теплових і динамічних параметрів НВГС.

В експериментальних дослідках було використано 6 зразків матеріалу з алюмінієвих сплавів у діапазоні товщин  $b = (1,5 \dots 6) \cdot 10^{-3}$  м. На них впливали НВГС різної теплової потужності.

Як джерело надзвукових високотемпературних газових струмин було використано різак повітряно-реактивного типу, а паливо – бензин марки А–80. Діаметри критичного перерізу сопел змінювалися в діапазоні  $d_{кр} = (8 \dots 15) \cdot 10^{-3}$  м, коефіцієнт надлишку окислювача  $\alpha_{ок}$  підтримувався на рівні 1,2 (що зумовлено способом охолодження камери згоряння та її надійністю), діапазон тиску в камері згоряння  $P_K = (0,5 \dots 1,5)$  МПа, витрати паливних компонентів  $\dot{m}_T = (0,04 \dots 0,3)$  кг/с, що визначило  $\beta_{теор} \approx 1184$  м/с,  $\alpha_{еф} = (5800 \dots 16250)$  Вт/(Км<sup>2</sup>)

Узагальнення отриманих експериментальних результатів проводили із застосуванням методу найменших квадратів у координатах час «прожигу» («прожигу+пробую» або «пробую») матеріалу перешкоди залежно від термогазодинамічного параметра устаткування (рис. 5).

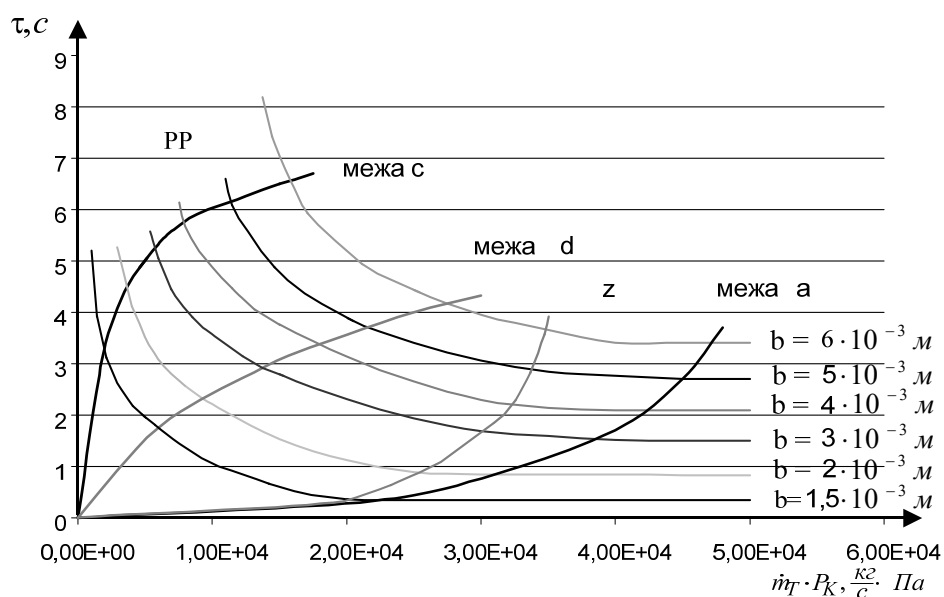


Рисунок 5 – Залежність часу впливу НВГС на листові матеріали на основі алюмінієвих сплавів від термогазодинамічного параметра

Підтверджено існування трьох характерних областей, що відрізняються механізмом проходження процесів у матеріалі (табл. 1).

Виділено «радіаторний режим» (РР) (вище межі с), при якому підведене до перешкоди тепло поширюється у матеріал і виділяється у вигляді теплових витрат у навколишнє середовище.

Виділено область А «прожиг+пробій» (між кордонами а і с) і отримана межа d, що розділяє область А на дві підобласті. Підобласть між кордонами с і d характеризується наявністю у зразків плавлення на боці дії струмини і пробую на зворотному боці матеріалу. А для зразків, па-



раметри яких належать підобласті, між кордонами  $d$  і  $a$  – відсутні сліди плавлення матеріалу – спостерігається чистий «пробій». Відзначається також зменшення часу «пробою» матеріалу зі збільшенням значення термогазодинамічного параметра, що показали й результати теоретичних досліджень.

Таблиця 1 – Механізми отримання отвору в матеріалі

Візуальні особливості матеріалу після взаємодії з ріжучою струминою	«ПРОЖИГ» Наявність ознак плавлення на фронтальній та оборотній поверхнях матеріалу	«ПРОЖИГ - ПРОБІЙ» Наявність ознак плавлення на фронтальній поверхні матеріалу і крихкого зламу на зворотному його боці	«ПРОБІЙ» Крихкий злам як на фронтальній поверхні матеріалу, так і на зворотному його боці	«РАДІАТОРНИЙ РЕЖИМ» Наявність ознак впливу ріжучої струмини на матеріал без отримання перфорації
Фронтальна поверхня матеріалу				
Оборотна поверхня матеріалу				

Експериментально підтверджено існування області «пробій» за межею  $a$ , в якій збільшення термогазодинамічного параметра не призводить до суттєвого зменшення часу «пробою» матеріалу, таким чином, його збільшення не виправдане.

Для підтвердження механізму формування отвору проводилися металографічні дослідження структури матеріалу в зоні різку за допомогою електронного растрового мікроскопа РЕМ–106 по периметру зони різку матеріалу Д16 фронтальної та оборотної поверхонь. На рис. 6, 7 показані результати цих досліджень, що доводять правильність попередніх висновків.

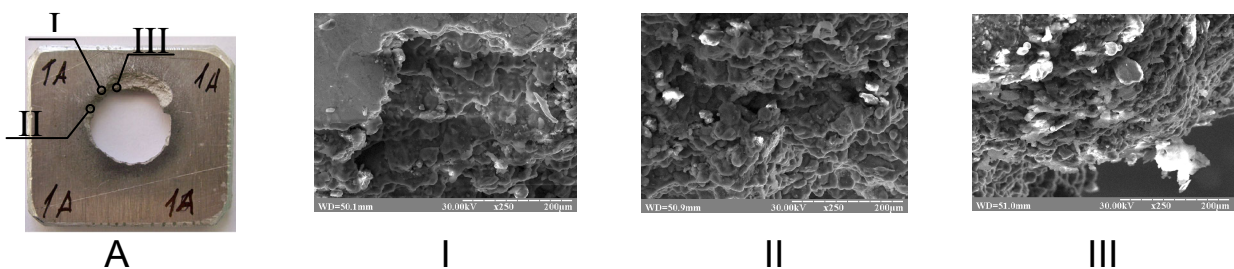


Рисунок 6 – Результати металографічних досліджень зони різку з боку дії НВГС по периметру отвору (А – фронтальна поверхня матеріалу)

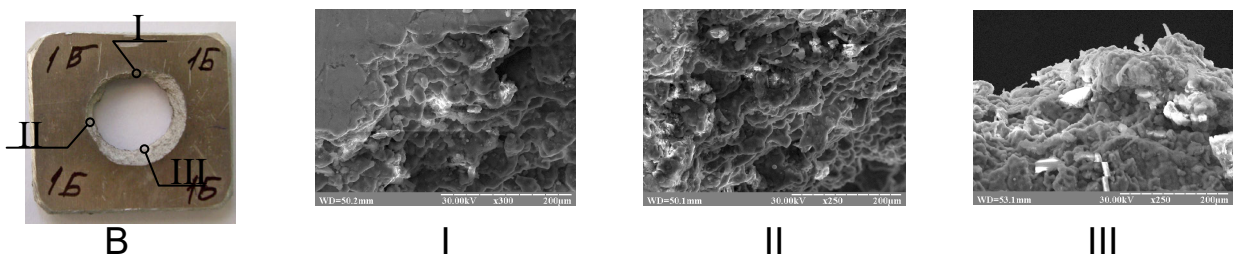


Рисунок 7 – Результати металографічних досліджень зони різку з оборотної поверхні матеріалу по периметру отвору (В – оборотна поверхня)

Швидкість різання знеміцнюванням пов'язується з часом реалізації «пробою» залежністю, яка запропонована науковцями Самарського державного аерокосмічного університету для різання «прожигом», але з урахуванням особливостей проходження процесів у нашому випадку за допомогою кореляційного коефіцієнта  $K$ . Залежність цього коефіцієнта від величин  $b$  і  $P_K$  визначено в результаті оброблення експериментальних досліджень лінійної швидкості різання.

$$V_{pp} = \left( \frac{b + d_{kp}}{\tau_{np}} \right) K; \quad K = (1,008 \cdot b^{-0,511} \cdot P_K + 1,232). \quad (2)$$

Дослідження показали, що величина  $K$  для різання «прожигом» дорівнює  $K \approx 1$ , що підтверджує висновки російських учених. Для різання «прожиг+пробій», «пробій» коефіцієнт  $K$  становить 1,45. . . 1,8.

Визначено місце методу ТГРЗМ у відомій класифікації термічних методів різання (рис. 8).

За відомими технологічними показниками різки ТГРЗМ було проведено економічний аналіз, у ході якого визначалися питомі витрати на паливні компоненти. Виконання економічного аналізу дозволило для методу ТГРЗМ визначити межу  $z$  (рис. 5), яка відповідає доцільному рівню затрат на витратні матеріали.

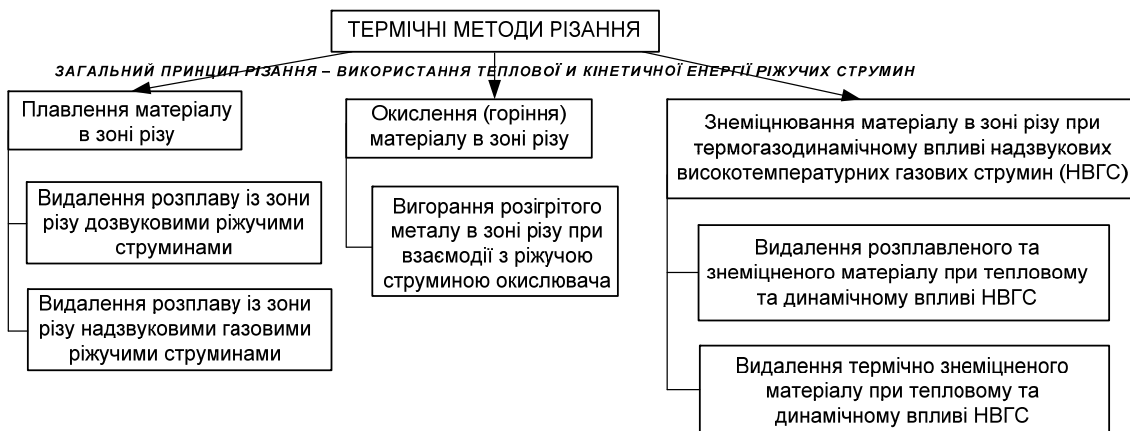


Рисунок 8 – Термічні методи різання матеріалів

В області реалізації «пробою» для межі  $z$  експериментальні дані були узагальнені за допомогою відомих критеріїв подібності  $Fo$  та  $Bi$ , що дозволило розповсюдити отримані результати на всі матеріали на основі алюмінієвих сплавів, що використовують у конструкції об'єктів АКТ.

Оброблення наведених експериментальних даних дозволила отримати універсальні номограми для розрахунку показників утилізаційної різки методом ТГРЗМ та основних показників обладнання для його реалізації (рис.9).

Отримані результати дозволяють рекомендувати параметри термогазоструминного устаткування для реалізації різки знеміцнюванням залежно від товщини матеріалу та тиску, яким може забезпечити наявний компресор.

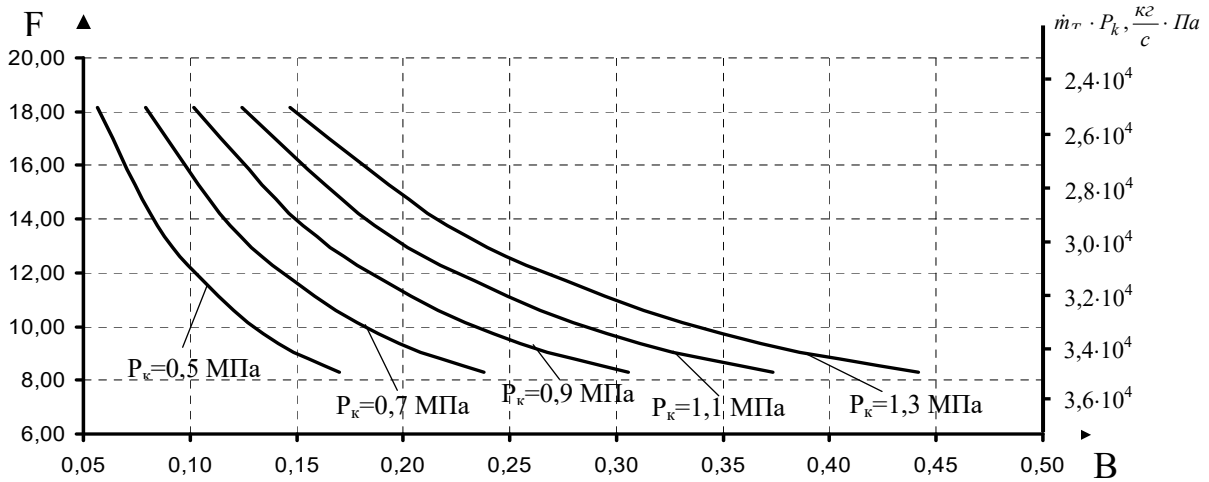


Рисунок 9 – Номограма для розрахунку показників різки методом ТГРЗМ

Виконано економічний аналіз для методу ТГРЗМ порівняно з аналогічним методом оброблення матеріалів – фрагментацією кисневим устаткуванням (КУ) листових матеріалів на основі алюмінієвих сплавів плавленням. На рис. 10 зображено діаграму затрат часу на 1 метр різку матеріалу, яка виконується КУ та термогазоструминним устаткуванням (ТГУ).

Питома вартість різки КУ становить 4,40 грн, різки ТГУ – 1,10 грн.

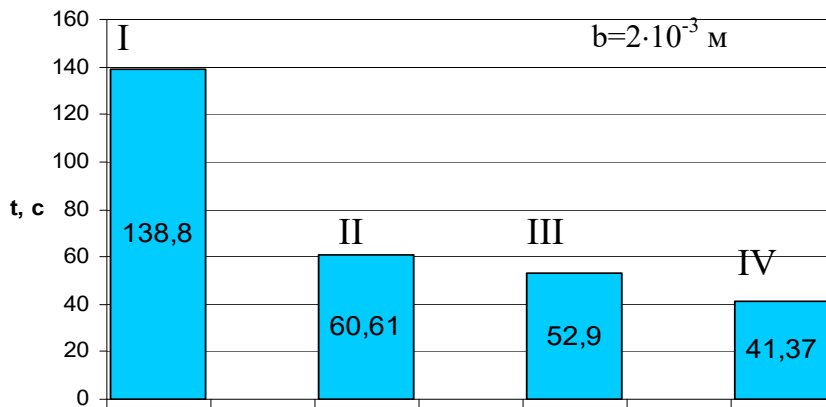


Рисунок 10 – Діаграма затрат часу на 1м різку матеріалів на основі алюмінієвих сплавів I – КУ ( $d_{кр} = 0,004$  м,  $m_r = 0,0012$ кг/с;  $m_{OK} = 0,004$ кг/с); II – ТГУ ( $d_{кр} = 0,006$  м и  $P_K = 1,0$  МПа); III – ТГУ ( $d_{кр} = 0,007$  м и  $P_K = 0,9$  МПа); IV – ТГУ ( $d_{кр} = 0,010$  м и  $P_K = 0,6$  МПа)

На основі виконаних досліджень було створено метод визначення основних характеристик процесу різання елементів конструкцій з алюмінієвих сплавів НВГС знеміцнюванням, який дозволяє визначити потрібні енергетичні характеристики пристроїв для конкретного технологічного об'єкта, розрахувати часові та матеріальні витрати. На рис. 11 показано алгоритм запропонованої методики.

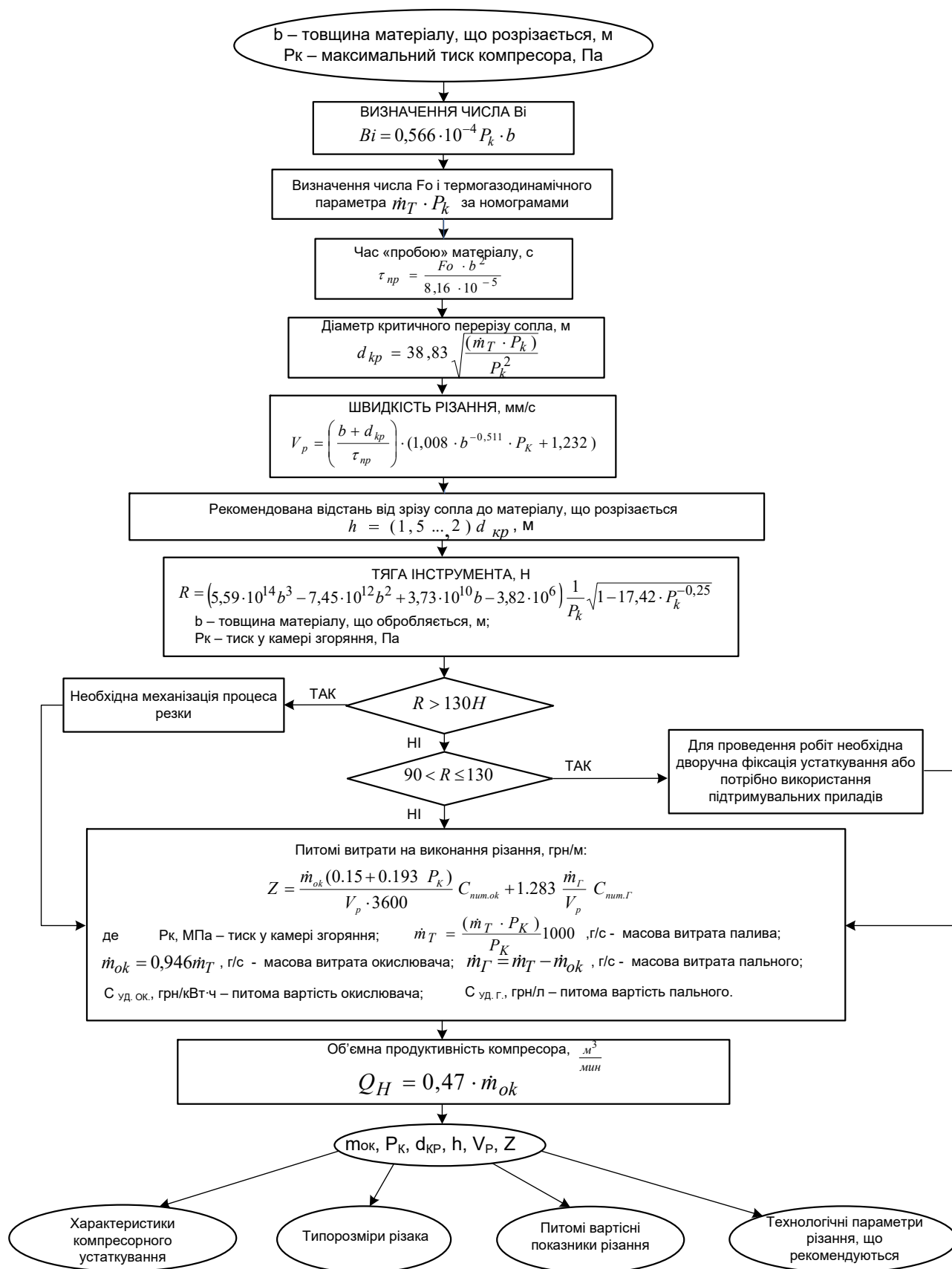


Рисунок 11 – Методика визначення основних параметрів термогазоструминного устаткування повітряно-реактивного типу для проведення утилізаційної фрагментації об'єктів АКТ методом ТГРЗМ

## Висновки

На основі проведених досліджень отримані такі результати.

1. На основі виконаного аналізу щодо використання термічних методів різки для проведення утилізаційної фрагментації металоконструкцій доведено актуальність удосконалення та підвищення ефективності таких методів різки, як найбільш розповсюджених при утилізації об'єктів АКТ.

2. Доведено теоретично і експериментально підтверджено існування нового способу розділового різання конструкцій з алюмінієвих сплавів надзвуковими високотемпературними газовими струминами (НВГС) без доведення матеріалу в зоні різку до температури плавлення, для якого характерним є формування різку за рахунок теплового та динамічного впливу струмини на матеріал.

3. На основі теоретичних досліджень взаємодії НВГС з перешкодами встановлено особливості їх теплового та силового впливу на матеріали з алюмінієвих сплавів і відзначено значний вплив динамічної складової струмини на формування зони різку; запропоновано використання термогазодинамічного параметра  $\dot{m}_T \cdot P_K$  для визначення енергетичних характеристик струмин.

4. По аналогії з експериментальною методикою дослідження термічного розділового різання плавленням запропоновано методику експериментального дослідження методу ТГРЗМ, яка ґрунтується на вивченні елементарного процесу знеміцнювання – «пробою», та дозволяє істотно мінімізувати часові та матеріальні витрати.

5. Теоретично обґрунтовано відмінність проходження фізичних процесів у матеріалах на основі алюмінієвих сплавів при взаємодії з НВГС продуктів згоряння залежно від співвідношення термогазодинамічного параметра  $\dot{m}_T \cdot P_K$  і товщини матеріалу  $b$ . Диференційовано: «радіаторний режим», при якому інтенсивність підведеного НВГС тепла є недостатньою для порушення цілісності матеріалу; режим «плавлення + пробій», при якому реалізується комбінований процес різання – плавлення металу в зоні дії НВГС з подальшим «пробоєм» нерозплавленої його товщини; «пробій», при якому під впливом НВГС відбувається винесення матеріалу із зони різку без ознак його плавлення.

6. Експериментально доведено на основі металографічних досліджень зони контакту НВГС з матеріалами на основі алюмінієвих сплавів відмінність результатів такої взаємодії, а саме – існування «радіаторного режиму», режиму «плавлення + пробій» та безпосередньо «пробою». Реалізація того чи іншого режиму залежить від співвідношення термогазодинамічного параметра  $\dot{m}_T \cdot P_K$  і товщини матеріалу  $b$ .

7. Використана можливість розповсюдження отриманих експериментальних результатів при вивченні елементарного процесу «пробою» для узагальнення залежності лінійної швидкості різання  $V_p$  від основних

чинників –  $b$ ,  $P_K$ ,  $\dot{m}_T$ ,  $\tau_{np}$ . Вперше отримано емпіричну залежність  $V_p$  для різання з використанням ефекту знеміцнювання.

8. На основі проведеного економічного аналізу витрат на розділове різання, згідно з отриманою емпіричною залежністю для  $V_p$  визначено економічно доцільні параметри різаків повітряно-реактивного типу, що забезпечують термічну різку знеміцненням для різних значень товщин матеріалу  $b$ . Виконано відповідне узагальнення межі реалізації економічно-доцільної різки знеміцненням за допомогою критеріїв подібності  $Bi$  та  $F_0$ , яке наведено у вигляді номограми.

9. На основі теоретичних та експериментальних досліджень створено метод визначення технологічних, енергетичних та економічних характеристик процесу різання елементів конструкцій з алюмінієвих сплавів НВГС знеміцнюванням, який дозволяє визначити потрібні енергетичні характеристики пристроїв для конкретного технологічного об'єкта, розрахувати часові та матеріальні витрати на її реалізацію.

10. Відому класифікацію термічних способів розділового різання матеріалів доповнено термогазодинамічним способом різки знеміцнюванням.

11. Визначено, що застосування різки знеміцнюванням для фрагментування матеріалів на основі алюмінієвих сплавів у діапазоні товщини  $b = 2 \dots 6$  мм дозволяє на 40% зменшити витрати на витратні матеріали та на 20...25% збільшити швидкість різання порівняно з різанням плавленням.

12. Отримані результати і методи впроваджено на Державному підприємстві «Чугуївський авіаремонтний завод», в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України та в навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», а також можуть використовуватися для оцінювання наслідків взаємодії НВГС з матеріалами на основі алюмінієвих сплавів.

13. Розроблено алгоритм селективного відбору технологічних методів утилізаційної фрагментації об'єктів АКТ, що дозволило з потенційно можливих технологій утилізації рекомендувати набір доцільних методів фрагментації, залежно від конструкційних особливостей об'єкта АКТ, правових, екологічних аспектів та економічних показників.

### Список використаних джерел

1. Набокина, Т. П. Анализ технологий утилизационной фрагментации планеров воздушных судов / Т. П. Набокина // Авиационно-космическая техника и технология: сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2005. – № 2 (18). – С. 23–27.

2. Набокина, Т. П. Исследование процессов разделительной резки металлов сверхзвуковыми высокотемпературными струями /

Т. П. Набокина // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2005. – № 5 (21). – С. 12–16.

3. Кобрин, В. Н. Определение времени разборки самолета в процессе его утилизации / В. Н. Кобрин, Т. П. Набокина // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 17. – Х., 2000. – С. 153–156.

4. Гайдачук, А. В. Критериальные зависимости для определения теплового состояния, предшествующего газодинамическому разрушению конструкций из алюминиевых сплавов / А. В. Гайдачук, А. М. Грушенко, Т. П. Набокина // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2009. – № 8 (65). – С. 18–22.

5. 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*: сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2007. – № 7 (43). – С. 78–80.

6. Гайдачук, А. В. Особенности применения термогазоструйных резаков в ручном и механизированном (машинном) вариантах исполнения / А. В. Гайдачук, А. М. Грушенко, Т. П. Набокина // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2011. – № 1 (78). – С. 5–8.

7. Гайдачук, А. В. Расчет параметров мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей технологического назначения / А. В. Гайдачук, А. М. Грушенко, Т. П. Набокина // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2010. – № 8 (75). – С. 7–10.

8. Кобрин, В. Н. Использование математического моделирования для определения некоторых технологических параметров утилизации авиационной техники / В. Н. Кобрин, Т. П. Набокина // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 24. – Х., 2004. – С. 324–328.

*Поступила в редакцию 14.09.2018.*

*Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.В. Кондратьев,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*