

УДК 621.923.5.044

doi: 10.32620/aktt.2023.5.06

**О. В. ЛОСЄВ, В. Т. СІКУЛЬСЬКИЙ, Г. С. СЕЛЕЗНЬОВА,
І. В. БИЧКОВ, Ю. А. ВОРОБІЙОВ***Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна***АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТЕРМОІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ ВИДАЛЕННЯ ЗАДИРОК**

Предметом вивчення в статті є теоретичні й експериментальні дослідження процесу видалення задирок у деталях, отриманих металообробкою, з використанням термоімпульсного методу згоряння детонуючих газових сумішей. Метою статті є обґрунтування використання термоімпульсного методу для фінішної обробки деталей, який було розроблено в Харківському авіаційному інституті на початку 70-х років ХХ століття для гнучкої автоматизації очищення поверхонь та кромок деталей гідравлічних та паливних агрегатів авіаційної та ракетно-космічної техніки від задирок і технологічних забруднень. Завдання: визначити особливості термоімпульсного методу, параметри технологічного процесу з позиції його застосування для обробки кромок деталей зі складними внутрішніми та зовнішніми поверхнями та розкриття його потенціалу для використання у точному машинобудуванні. Використовуваними методами дослідження є: моделювання процесів методом скінчених елементів й експериментальний метод для перевірки адекватності запропонованих чисельних моделей. Отримані такі результати: обробка деталей із матеріалів з різною теплопровідністю, очищення гумових виробів, заокруглення оплавленням кромок різбових отворів деталей із алюмінієвого сплаву. Наукова й практична новизна отриманих результатів полягає в наступному: наведено технологічні можливості термоімпульсної обробки, обґрунтовані параметри керування та оптимізації режимів обробки; розглянути процеси нагрівання елементів деталі та згоряння детонуючих сумішей в робочій камері обладнання; отримані закономірності зміни температурних полів ліквідів та конструктивних елементів деталей при імпульсному, постійному та змішаному нагріванні, які дають можливість формувати режими термоімпульсної обробки деталей з урахуванням їх конструктивних особливостей у широкому діапазоні теплофізичних властивостей матеріалів; розроблені процеси термоімпульсного видалення задирок, мікрочастинок, розмірного округлення кромок з використанням результатів моделювання та експериментального уточнення на установках Т-15.

Ключові слова: термоімпульсний метод; обробка поверхонь; заокруглення кромок; видалення задирок; теплофізичні властивості матеріалів; ліквіди; моделювання; детонуючі газові суміші; якість; промислова чистота.

Вступ

Одним із завдань виробництва машин та приладів з гарантованими «точковими» характеристиками якості (швидкодія, продуктивність, пропускна здатність, довговічність та безвідмовність) є забезпечення промислової чистоти виробів при виробництві та експлуатації [1, 2]. У роботі [3] зазначені характеристики якості деталі за ступенем відповідності її номінальним (еталонним) значенням форми та розмірів (макрогеометрії та мікрорельєфу); фізико-хімічних властивостей матеріалу та поверхневого шару, технологічної спадковості та промислової чистоти. Забезпечення промислової чистоти виробів має низку особливостей. Первинні забруднення поверхонь та кромок деталей у вигляді задирок, частинок, які утворюються в результаті механічної обробки, швидко зношують частину мікрорельєфу [4, 5]. При вида-

ленні технологічних забруднень необхідно також забезпечити якість виробів [6, 7]. Деякі авіаційні агрегати містять понад півтори тисячі деталей, виготовлених з різних матеріалів (понад 50 видів), які мають різні геометричні, механічні та теплофізичні властивості, що значно впливає на вибір ефективних методів видалення забруднень.

Нині є кілька десятків методів видалення забруднень (твердих частинок) [8, 9]. Найбільш універсальні методи очищення поверхонь та кромок деталей засновані на використанні детонуючих газових сумішей, які дозволяють гнучке автоматизувати процеси обробки незалежно від складності зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей. Застосування детонуючої газової суміші, як інструменту для видалення задирок з деталей гідравлічних систем різних виробів вперше було запропоновано в США наприкінці шістдесятих років минулого століття. Очищення відбува-

ється з усіх поверхонь деталей, що контактують із газоподібними продуктами згоряння. Механізм дії на деталь складається з взаємозалежних процесів – механічних, хімічних, теплофізичних тощо. Доцільність стимулювання того чи іншого з процесів залежить від необхідності отримання того чи іншого ефекту та можливості використання у конкретних промислових умовах. Так термохімічний метод реалізується на обладнанні фірм BOSCH, KENNAMETAL, ATL та інших – для видалення ліквідів у надлишку кисню. Механічну дію ударних хвиль використовують для видалення оплавлених частинок у вигляді «бісеру» після термохімічної обробки. При цьому використовують стехіометричну суміш газів. Технології та обладнання відомих зарубіжних фірм не застосовуються в нашій країні при виробництві аерокосмічної техніки через високі вимоги до якості обробки деталей.

У Проблемній лабораторії імпульсних джерел енергії Харківського авіаційного інституту роботи з дослідження процесів очищення поверхонь та кромок деталей на базі детонуючих газових сумішей було розпочато у 1975 році під керівництвом професора В. Г. Кононенка з метою вивчення можливості використання цих технологій у виробництві літальних апаратів.

При розробленні термоімпульсного методу очищення поверхонь та кромок деталей було використано досвід і експериментальна база Проблемної лабораторії імпульсних джерел енергії, що забезпечило можливість вирішення найскладнішої й трудомісткої задачі з формування умов для аналітичного моделювання процесу оплавлення задирок. На базі якісної експериментальної інформації розроблено фізико-математичні моделі процесів нагріву ліквідів та масиву деталей як в імпульсному режимі також при постійному підведенні тепла [10, 11].

Незважаючи на великий період часу, що пройшов після розробки методу, у спеціальній літературі багатьма дослідниками неправильно трактується назва і суть термоімпульсного методу. Це спонукало авторів, які мають тривалий досвід роботи в цій галузі, підготувати цю статтю.

1. Коротка характеристика відомих моделей нагрівання задирок

Специфічні умови експлуатації аерокосмічної техніки потребує використання конструкційних матеріалів з високою питомою міцністю, деталі повинні мати мінімальну масу, високу точність при наявності тонких стінок, каналів. Номенклатура деталей у сучасному ЛА досягає декілька десятків тисяч, а матеріалів – понад сто п'ятдесяти найменувань.

З усього різноманіття оздоблювальних та зачисних методів обробки для агрегатного виробництва найперспективніші технології, створені на базі детонуючих газових сумішей. Як показав досвід експлуатації імпортного обладнання на ряді підприємств, вибір раціональних режимів згоряння суміші газів простіше здійснювати експериментально – методом підбору. Основна причина такого підходу міститься у великій кількості параметрів, що впливають на процес згоряння та форму деталей, виготовлених із різних матеріалів. Це потребує великих витрат часу та матеріальних ресурсів навіть у масовому виробництві, оскільки для визначення раціональних режимів необхідно враховувати понад двадцять взаємодіючих факторів [11]. Складність експериментального визначення технологічних режимів полягає у тому, що теплофізичні властивості конструкційних матеріалів змінюються в процесі нагріву. Наприклад, теплопровідності різняться в діапазоні 0,14-360 Вт/м·град, тобто відрізняються більш ніж у 2500 разів. Пошук раціональних методів визначення режимів термоімпульсної обробки навів багатьох дослідників до великого розмаїття моделей процесу очищення поверхонь та кромок деталей.

Відомі типові моделі термоімпульсного процесу очищення раннього періоду [12, 13 та ін.] та сучасні [14, 15 та ін.], в яких наведено різного рівня складності теоретичного дослідження. Загальним недоліком цих робіт є відсутність методики визначення раціонального часу обробки. Варіюванням безліччю параметрів, що впливають на щільність теплового потоку, досягти якісного очищення деталей проблематично. Це різко обмежує можливості застосування детонуючих сумішей газів, і перш за все для очищення прецизійних деталей.

Якщо ранні роботи виконані лише для дослідженої конкретної деталі й експериментально реалізовані, то сучасні моделі експериментального підтвердження не мають. Невизначеність часу нагріву, що залежить від теплофізичних властивостей матеріалів та розмірів ліквідів, що видаляються, призводить до оптимізації потужності джерела тепла тільки витратним експериментальним шляхом. Оптимізація режимів очищення експериментальним шляхом являє собою складне технічне завдання, тому що обробка відбувається в інтервалі часу від 10^{-2} до 10^{-6} с при тиску продуктів згоряння 50 МПа в агресивному, високотемпературному середовищі з максимальною температурою 5000 С та середньою температурою для всього обсягу газу від 3500 до 4000 С.

Теоретично температура після імпульсу тепла не змінюється, але практично ідеальний режим неможливо відтворити через відхилення теплофізичних

даних у межах допуску на склад сплавів, похибок вимірювань площ поверхонь, часу випуску продуктів згоряння тощо.

Щоб використовувати переваги імпульсної технології необхідно створити методики визначення параметрів для об'єкту обробки та механізм дозування теплової енергії.

Практика показала, що відхилення від оптимального часу обробки у бік його збільшення призводить до оплавлення елементів більшої товщини та до шкідливого перегріву деталі. За час менший від оптимального, задирика не встигає нагрітись до оплавлення, тому видалення не відбувається. При значно більшому тепловому потоці виникає градієнт температури між поверхнею та серединою задирика, тим більший, чим нижча теплопровідність та більша її товщина. Відповідно нагрівається поверхневий шар деталі, що стимулює руйнування матеріалу та появу мікротріщин в поверхневих шарах. Ці явища відомі з початку застосування термоенергетичного методу в авіаційному виробництві. Усуненням перегріву деталей займалися багато організацій, включаючи галузевий інститут [16]. Науково обґрунтоване вирішення цієї проблеми було надано авторським колективом ХАІ [17].

Для аналітичного розрахунку теплових параметрів процесу необхідно вирішити завдання нестационарної теплопровідності в трьохмірному просторі із заданими початковими і граничними умовами. Однак вирішення подібних завдань у повному обсязі пов'язано з великими математичними труднощами і можливо лише для окремих випадків. Тому дослідники використовували наближені рішення, що ґрунтуються на припущеннях, обґрунтованих експериментально. Одним з таких припущень є зведення тривимірної задачі до плоскої (2-D).

У розрахунках [17, 18] обрана модель задирика, яка представляє необмежену пластину, ширина та довжина якої нескінченно великі в порівнянні з товщиною. Зміна температури відбувається у напрямках осей OY, OX. Отже, модель, що розглядається, є двовимірною. Власне, задирикою є частина пластини довжиною, що дорівнює l , на яку діють внутрішні джерела тепла потужністю q . Необхідність короткочасної взаємодії продуктів згоряння з об'єктом обробки диктує оптимізацію технологічного процесу видалення задирик за потужністю та тривалістю теплового імпульсу, які залежать від теплофізичних властивостей матеріалу та геометричних розмірів задирик.

Розв'язання задачі нагрівання масиву деталі виконано при імпульсному підведенні тепла та постійному нагріванні. Модель деталі є напівплощиною. Зміна температури відбувається також у напрямку

осей OX та OY. Теплообміном з навколишнім середовищем нехтуємо, джерело тепла внутрішні потужністю q . Тепло підводиться до поверхні деталі на обмеженій ділянці [17, 18].

Адитивні властивості теплової енергії дають можливість моделювати температурні поля ліквідів та теплонапружених елементів деталей у часі при нагріванні джерелами тепла.

В основі вибору режимів обробки стає однаковий принцип – визначення характеристики джерела тепла, потужності та часу його дії шляхом розрахунку, що враховує конструктивні особливості деталі та теплофізичні властивості матеріалу. У публікаціях [15, 19] представлені графічні поля налаштування обладнання, де відображено зв'язок часу обробки із щільністю теплового потоку. За твердженням авторів математично енергія для оплавлення підбирається відносно просто, але автори не підтверджують адекватність своїх теоретичних розрахунків результатами експерименту на деталях, оброблених при заданих режимах та в реальному часі.

2. Фізичні основи термоімпульсного процесу

Одними з найважливіших параметрів, що визначають оптимальний технологічний режим процесу видалення задирик термоімпульсним способом, є необхідна потужність теплового джерела та час його впливу на деталь. При цьому основою імпульсних технологій є виконання умов по відповідності потрібної енергії для заданого технологічного процесу та енергії виробів, що оброблюються. Якщо енергії недостатньо, оброблення не відбувається, а надлишок енергії може призвести до непоправних дефектів деталей або пошкодження елементів обладнання. При обробленні термоімпульсним методом проблема видалення надлишку енергії вирішена оригінальним способом.

Потрібна енергія визначається:

$$Q_1 \geq M_3 C(T_{пл} - T_0) + M_3 Q_{пит}, \quad (1)$$

де M_3 – маса ліквіду;

C – теплоємність матеріалу;

$T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу;

T_0 – початкова температура деталі;

$Q_{пит}$ – тепло, яке витрачається на фазовий перехід.

Наявна енергія, тобто тепло, що витрачається на нагрівання задирик, деталей, робочої камери, пристроїв, визначається наступним чином:

$$Q_2 = F_{\Sigma} \int_{t_1}^{t_n} \int_{q_1}^{q_n} dq dt, \quad (2)$$

де q – щільність теплового потоку;
 τ – час обробки;

F_{Σ} – площа поверхонь, що сприймають тепло.

Для видалення ліквідів необхідно виконати умову $Q_2 \geq Q_1$. Щільність теплового потоку повинна бути достатньою, щоб оплавилася задирика заданої товщини, при цьому температура плавлення повинна досягти по всій товщині задирик:

$$q = \frac{Q_2}{\tau F_{\Sigma}}, \quad (3)$$

де $F_{\Sigma} = (F_3 + F_d + F_{рк} + F_{пр})$, $F_3 \ll F_d + F_{рк} + F_{пр}$.

Наявна енергія завжди значно перевищує достатню (потрібну) для оплавлення задирик.

З формули (3) випливає

$$Q_2 = q \tau F_{\Sigma}, \quad (4)$$

тобто за відсутності встановленої закономірності зміни часу рівномірного нагрівання пластин різної товщини досліджуваного матеріалу режими можна визначити лише експериментально шляхом підбору q і τ .

На рисунку 1 представлені діаграми процесу згоряння, де показані імпульсна та квазіпостійна фази теплообміну між продуктами згоряння та поверхнями (F_{Σ}). Для імпульсного етапу характерні висока потужність та короткочасність дії, а для квазіпостійного режиму – відносно мала потужність та на два – чотири порядки більша тривалість дії [19]. Інтенсивному теплообміну відповідає період загасання ударних хвиль.

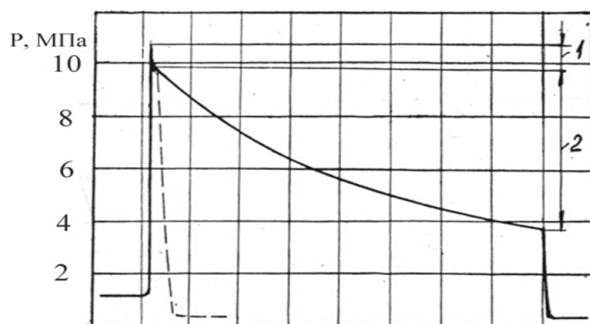


Рис. 1. Діаграми процесу згоряння:

- 1 – при імпульсному підведенні тепла;
- 2 – при квазіпостійному підведенні тепла

Експериментально визначено частку використання імпульсної енергії, яка становить від 5 % до 25 % тепла детонуючих газів. Інтенсивна фаза нагріву підпорядковується фізичним законам, що дає

можливість регулювати час її дії та оптимізувати режими очищення деталей із різними теплофізичними властивостями.

Для аналізу імпульсного процесу нагріву ліквідів виконано моделювання внутрішнього джерела тепла, що миттєво виділяє енергію на обмеженій ділянці. Це дає можливість визначити оптимальний час обробки оплавленням та температуру на межі ділянки залежно від теплофізичних властивостей матеріалів та товщини задирик.

На рисунках 2 і 3 показано результати моделювання імпульсного нагріву задирик із сталі товщиною 0,1 мм і 0,3 мм джерелом тепла однакової потужності, де відбувається прогрів до температур 2005 °C за 7×10^{-4} с, 740 °C за 2×10^{-3} с відповідно. З розрахунків визначено, що при фіксованій щільності теплового потоку імпульсне підведення тепла відповідної тривалості забезпечує оплавлення задирик заданої товщини.

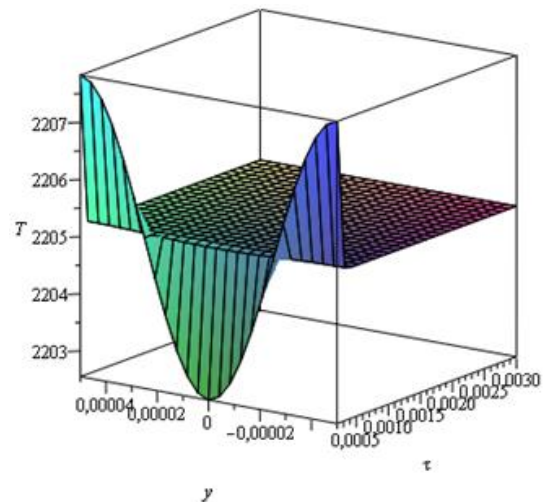


Рис. 2. Результати моделювання імпульсного нагріву задирик із сталі (товщина зразка 1×10^{-4} м, $q=4 \times 10^5$, $\tau=2 \times 10^{-4} \dots 3 \times 10^{-3}$)

Наведені приклади імпульсного нагріву моделей задирик показують залежність температури та часу її вирівнювання за товщиною. З прикладу випливає, що елементам деталі більшої товщини, ніж задирик, не зашкодять. В даний час серійне обладнання видаляє задирики завтовшки в три рази менші, ніж тонкостінний елемент деталі.

Встановлено, що час прогрівання відповідних товщин елементів деталі є постійною величиною матеріалу. Це дозволяє визначити мінімальну потужність джерела тепла необхідну для оплавлення заданої товщини задирик. Це важливо для збереження від пошкодження тонкостінних елементів деталей авіаційних агрегатів під час термоімпульсної обробки.

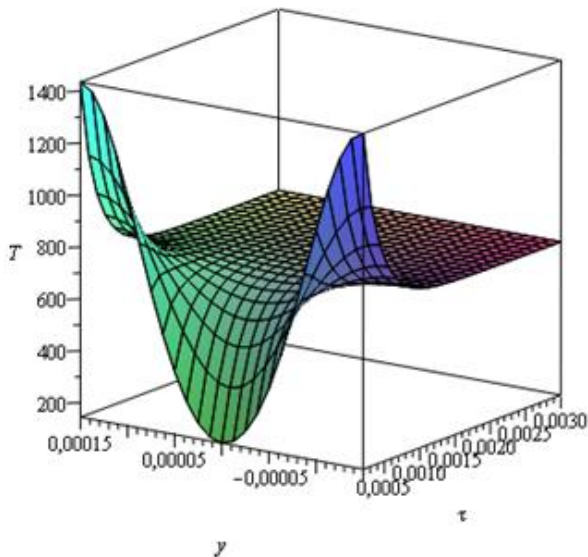


Рис. 3. Результати моделювання імпульсного нагріву задирок із сталі (товщина зразка 3×10^{-4} м $q=4 \times 10^5$, $\tau=2 \times 10^{-4} \dots 3 \times 10^{-3}$)

На рисунках 4 і 5 показані типові температурні поля масивної поверхні деталі, що утворюються на фінішних операціях, та типової задирки для сплавів з низькою теплопровідністю. Встановлено, що температура займання металів нижче за температуру плавлення, чому сприяють високі температура і тиск агресивного середовища.

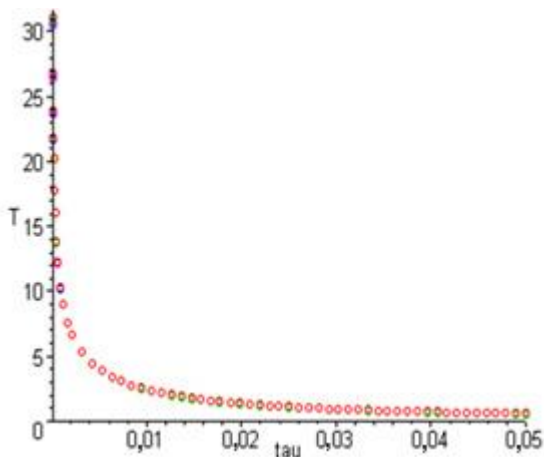


Рис. 4. Температурне поле поверхні в часі: $H_1=10$ мкм (глибина), $q=8 \times 10^3$, $\tau=5 \times 10^{-2}$ с

Фізико-математичні моделі процесів нагріву ліквідів та масиву деталей при імпульсному режимі та при постійному підведенні тепла дозволяють з достатньою для практики точністю визначити значення температурних полів для оптимізації режимів обробки. Визначення співвідношення імпульсної та квазіпостійної фаз нагріву дозволяє оптимізувати характеристику джерела тепла в часі, тобто визначити допустимий діапазон потужності імпульсного джерела тепла та тривалість дії квазіпостійної фази.

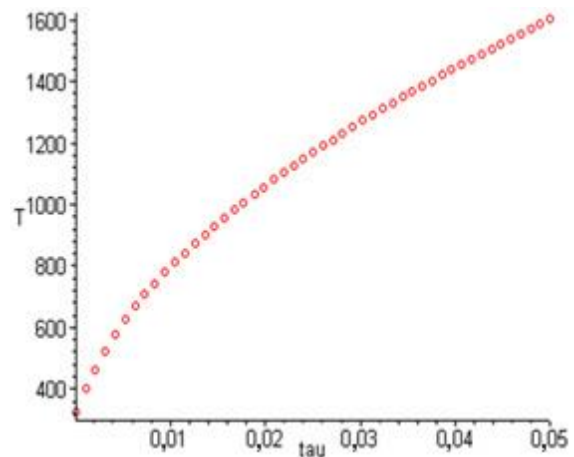


Рис. 5. Температурне поле задирки у часі: $H_1=10$ мкм, $q=8 \times 10^3$, $\tau=5 \times 10^{-2}$ с

Наведений приклад застосування результатів моделювання процесу очищення демонструє можливість обробки без окислення поверхонь. Насамперед термоімпульсний метод може застосовуватися для очищення деталей на фінішних операціях, що сприяє підвищенню ресурсу виробів та їхньої безвідмовної роботи. Після обробки на поверхнях деталей відсутні оксиди, оскільки вони видаляються з камери згоряння разом з високотемпературними газами до конденсації.

3. Термоімпульсна обробка деталей з різною теплопровідністю

У термохімічному процесі енергія продуктів згоряння використовується ефективніше, ніж при термоімпульсному. Але технологічні можливості термоімпульсного методу повністю компенсують цей недолік за рахунок оптимізації режимів і часу обробки та щільності теплового потоку. Розрахунок температурних полів деталі при відомих закономірностях впливу характеристик джерела тепла на температуру нагріву дає можливість організувати саморегулюючі процеси обробки, наприклад, розмірне округлення кромки [19, 20].

На рисунку 6 показані деталі з гуми, яка має низьку теплопровідність, до та після очищення від облоя. Якість обробки цих виробів повністю задовольнила замовника.

На рисунку 7 показані фрагменти авіаційного корпусу з алюмінієвого сплаву з теплопровідністю у сотні разів більшою, ніж у гуми.

Обидві деталі оброблені на термоімпульсній установці моделі Т-15, що показує широкі можливості запропонованого методу регулювання енергії в цій установці.

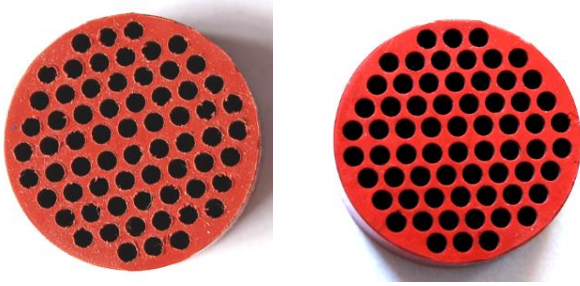


Рис. 6. Прокладка з гуми до та після очищення

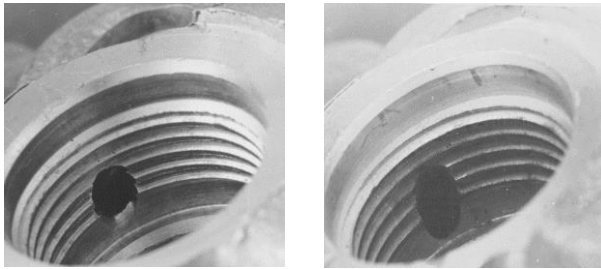


Рис. 7. Фрагмент алюмінієвого корпусу до та після очищення

Термоімпульсна обробка стала можливою завдяки створенню в ХАІ спеціальних установок, в яких реалізується імпульсне нагрівання деталей з імпульсом, що має тривалість у межах від 7×10^{-4} с до 2×10^{-3} с. Відмінною особливістю таких установок є наявність клапана скидання тиску газу після згоряння суміші у вказаному часовому діапазоні. Саме тому такий метод обробки був названий імпульсним.

Спосіб та конструкція даної установки захищені патентами різних країн світу.

Висновки

В статті наведено загальні принципи визначення режимів та продемонстровано приклади видалення задирок з деталей із матеріалів з різною теплопровідністю.

Аналітичний опис процесу нагрівання елементів деталей дозволяє прогнозувати результати термоімпульсної обробки.

Отримані закономірності зміни температурних полів ліквідів та конструктивних елементів деталей при імпульсному, постійному та змішаному нагріванні дають можливість формувати режими термоімпульсної обробки деталей з урахуванням їх конструктивних особливостей у широкому діапазоні теплофізичних властивостей матеріалів.

Розроблені процеси термоімпульсного видалення задирок, мікрочастинок, швидко зношуваних частин шорсткості, розмірного округлення кромки з

використанням результатів моделювання температурних полів елементів конструкції та експериментального уточнення на установках Т-15.

При обробленні деталей на визначених оптимальних режимах структурних змін у виробі не відбувається.

Внесок авторів: формулювання мети та постановка задач досліджень – **О. В. Лосєв, І. В. Бичков, Ю. А. Воробйов**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. В. Лосєв, В. Т. Сікульський**; розроблення концептуальних положень досліджень – **О. В. Лосєв, І. В. Бичков**; розроблення математичних моделей та аналіз результатів досліджень – **Г. С. Селєзньова**; розроблення методів, вибір та використання програмно-технічних засобів для моделювання та представлення результатів – **Г. С. Селєзньова**; аналіз результатів, формулювання висновків – **О. В. Лосєв, Ю. А. Воробйов**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Mechanical deburring and edge-finishing processes for aluminum parts – a review [Text]* / S. A. Niknam, B. Davoodi, J. P. Davim, & V. Songmene // *International Journal of Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 95, Iss. 1-4. – P. 1101-1125. DOI: 10.1007/S00170-017-1288-8.
2. *Burr formation and its treatments – a review [Text]* / S. Y. Jin, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, & S. Debnath // *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. – 2020. – Vol. 107, Iss. 5-6. – P. 2189-2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.
3. *Формування вимог до інформаційного супроводу виробництва аерокосмічних виробів для забезпечення їх якості [Текст]* / І. В. Бичков, А. С. Селєзньова, К. В. Майорова, Ю. А. Воробйов, & В. Т. Сікульський // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 4 (180). – С. 22–35. DOI: 10.32620/akt.2022.4.03.
4. *Kumar, M. Experimental investigation of top burr formation in high-speed micro-milling of Ti6Al4V alloy – a review [Text]* / M. Kumar, & V. Bajpai // *Proceeding of the Inst. of Mechanical Engineering Part B: Journal of Engineering Manufacturing*. 2019. – Vol. 234, Iss. 4. – P. 730-738. DOI: 10.1177/0954405419883049.
5. *Burr Detection Using Image Processing in Milling Workpieces [Text]* / V. R. del Castillo, L. Sánchez-González, L. Fernández-Robles, & M. Castejón-Limas // *15th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2020). Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer, Cham, January 2021, vol. 1268. – P. 751-759. DOI: 10.1007/978-3-030-57802-2_72.

6. Deburring of cross-drilled holes with ball-end cutters – modeling the tool path [Text] / E. Abele, K. Schützer, S. Güth, & A. Meinhard // *Production Engineering* – 2018. – Vol. 12. – P. 25-33. DOI: 10.1007/s11740-017-0781-0.

7. Application of flash-pulse thermography methods for quantitative thickness inspection of coatings made by different thermal spraying technologies [Text] / Lukáš Muzika, Michal Švantner, Šárka Houdková, & Petra Šulcová // *Surface and Coatings Technology*. – January 2021. – Vol. 406. – Article No. 126748. – 25 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126748.

8. Gillespie, L. K. *Deburring and Edge Finishing Handbook* [Text] / LaRoux K. Gillespie. – Society of Manufacturing Engineers. – 1999. – 400 p.

9. Cleaning of Parts with Detonating Gas Mixtures [Text] / A. Losev, I. Bychkov, A. Selezneva, V. Shendryk, S. Shendryk // *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2022. – P. 602–612. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4_58.

10. Лосев, А. В. Отделочно-зачистные технологии в производстве летательных аппаратов и в машиностроении [Текст] / А. В. Лосев, В. А. Фадеев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №4 (40) – С. 6-12.

11. Сломинская, Е. Н. Технологическая система для обеспечения промышленной чистоты прецизионных изделий [Текст] / Е. Н. Сломинская, А. В. Лосев, & А. В. Фадеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 1. – С. 80-88.

12. Термоимпульсное удаление заусенцев с регулируемым нагревом деталей [Текст] / В. П. Божко, А. В. Лосев, С. А. Родзин, С. А. Туров // *Авиационная промышленность*. – 1987. – № 12. – С. 15-17.

13. Пак, Н. И. Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии [Текст] / Н. И. Пак, & С. А. Шкунов // *Обработка материалов импульсными нагрузками*. – 1990. – С. 168-175.

14. Планковский, С. И. Математическая модель отделки кромок при термоимпульсной обработке [Текст] / С. И. Планковский, & О. В. Шипуль // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 9 (126) – С. 51-55.

15. Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами: наукові матеріали: монографія [Текст] / С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. В. Цегельник, та інші. – Харків : НАУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2020, – 318 с.

16. Матвеев, А. П. Снижение температуры обрабатываемых деталей при использовании термоэнергетического метода удаления заусенцев [Текст] / А. П. Матвеев, & Л. Н. Шпитанков // *Авиационная промышленность*. – 1988. – № 8. – С. 47-48.

17. Особенности термоимпульсной очистки поверхностей и кромок деталей от загрязнений после механической обработки [Текст] / А. В. Лосев,

И. В. Бычков, В. В. Коллеров, & А. С. Селезнева // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – X. : НАКУ «ХАИ», 2018. – Вып. 82 – С. 36-46.*

18. Лосев, А. В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А. В. Лосев // *Импульсная обработка металлов давлением*. – X. : ХАИ, 1997. – С. 43-49.

19. Шипуль, О. В. Методика назначения режимов термоимпульсной отделки с учетом требований к качеству кромки [Текст] / О. В. Шипуль, И. Б. Кузнецов, & Е. С. Палазюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – №5 (122) – С. 21-26.

20. Лосева, О. А. Разработка физико-математических моделей импульсно-периодических процессов нагрева элементов детали [Текст] / О. А. Лосева, А. В. Лосев, Е. В. Майорова // *Public communication in science: philosophical, cultural, political, economic and IT context: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (May 15, 2020)*. – Houston, USA : European Scientific Platform, 2020. – Vol. 2. – С. 97-104.

21. Лосева, О. А. Перспективы применения термоимпульсного метода [Текст] / О. А. Лосева, Е. В. Майорова, А. В. Лосев // *Proceedings of the 5 th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (August 6-8, 2020)*. – Melbourne, Australia : CSIRO Publishing House, 2020. – С. 60-63. ISBN 978-0-643-12109-6.

References

1. Niknam, S. A., Davoodi, B., Davim, J. P., & Songmene, V. Mechanical deburring and edge-finishing processes for aluminum parts – a review. *International Journal of Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, iss. 1-4, pp. 1101-1125. DOI: 10.1007/S00170-017-1288-8.

2. Jin, S. Y., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., Shankar, S., & Debnath, S. Burr formation and its treatments – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 2020, vol. 107, iss. 5-6, pp. 2189-2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.

3. Bychkov, I. V., Selezneva, A. S., Mayorova, K. V., Vorobyov, Yu. A., & Sikul'skiy, V. T. Formuvannya vymoh do informatsiynoho suprovodu vyrobnytstva aerokosmichnykh vyrobiv dlya zabezpechennya yikh yakosti [Requirements development for the information support manufacturing of aerospace products to ensure their quality]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4 (180), pp. 22-35. DOI: 10.32620/akt.2022.4.03. (in Ukrainian).

4. Kumar, M., & Bajpai, V. Experimental investigation of top burr formation in highspeed micromilling of Ti6Al4V alloy – a review. *Proceeding of the Inst. of Mechanical Engineering Part B: Journal of Engineering Manufacturing*, 2019, vol. 234, iss. 4. pp. 730-738. DOI: 10.1177/0954405419883049.

5. del Castillo, V. R., Sánchez-González, L., Fernández-Robles, L., & Castejón-Limas, M. Burr Detection

Using Image Processing in Milling Workpieces. *15th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2020), Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, January 2021, vol. 1268, pp. 751-759. DOI: 10.1007/978-3-030-57802-2_72.

6. Abele, E., Schützer, K., Güth, S., & Meinhard, A. Deburring of cross-drilled holes with ball-end cutters – modeling the tool path. *Production Engineering*, 2018, vol. 12, pp. 25-33. DOI: 10.1007/s11740-017-0781-0.

7. Muzika, L., Švantner, M., Houdková, Š., & Šulcová, P. Application of flash-pulse thermography methods for quantitative thickness inspection of coatings made by different thermal spraying technologies. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 406, article no. 126748. 25 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126748.

8. Gillespie, L. K. *Deburring and Edge Finishing Handbook*. Society of Manufacturing Engineers, 1999. 400 p.

9. Losev, A., Bychkov, I., Selezneva, A., Shendryk, V., & Shendryk, S. Cleaning of Parts with Detonating Gas Mixtures. *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022, pp. 602-612. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4_58.

10. Losev, A. V., & Fadeev, V. A. Otdelchno-zachistnye tehnologii v proizvodstve letatel'nyh apparatov i v mashinostroenii [Finishing and cleaning technologies in the production of aircraft and mechanical engineering] *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2007, no. 4 (40), pp. 6-12. (in Russian).

11. Slominskaja, E. N., Losev, A. V., & Fadeev, A. V. Tehnologicheskaja sistema dlja obespechenija promyshlennoj chistoty precizionnyh izdelij [Technological system for ensuring industrial cleanliness of precision products]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2014, no. 1, pp. 80-88. (in Russian).

12. Bozhko, V. P., Losev, A. V., Rodzin, S. A., & Turov, S. A. Termoimpul'snoye udaleniye zausentsev s reguliruyemym nagrevom detaley [Thermal pulse deburring with controlled heating of parts]. *Aviatsionnaya promyshlennost' – Aviation industry*, 1987, no. 12, pp. 15-17. (in Russian).

13. Pak, N. I., & Shikunov, S. A. Chislennoye modelirovaniye protsessa termicheskogo udaleniya zausentsev kontsentrirrovannym potokom energii [Numerical modeling of the process of thermal deburring with a concentrated energy flow]. *Obrabotka materialov impul'snymi nagruzkami – Processing of materials with pulsed loads*, 1990, pp. 168-175. (in Russian).

14. Plankovskij, S. I., & Shipul', O. V. Matematicheskaja model' odelki kromok pri termoimpul'snoj obrabotke [Mathematical model of edge finishing with thermal-pulse treatment]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 9 (126), pp. 51-55. (in Russian).

15. Plankovskij, S. I., Shy'pul', O. V., Cegel'ny'k, Ye. V. et al. *Rozroblennya avtomatyzovanoho kompleksu dlya pretsyziynoho termoimpul'snogo obroblyennya detonuval'nykh hazovymy sumishamy: naukovy materialy : monohrafiya* [Development of an automated complex for precision thermal pulse processing with detonating gas mixtures: scientific materials: monograph]. Kharkiv, NAU im. M. Ye. Zhukovskogo «XAI», 2020. 318 p. (in Ukrainian).

16. Matveev, A. P., & Shpitankov, L. N. Snizheniye temperatury obrabatyvayemykh detaley pri ispol'zovanii termoenergeticheskogo metoda udaleniya zausentsev [Reducing the temperature of processed parts using the thermoenergetic deburring method]. *Aviatsionnaya promyshlennost' – Aviation industry*, 1988, no. 8, pp. 47-48. (in Russian).

17. Losev, A. V., Bychkov, I. V., Kollerov, V. V., & Selezneva, A. S. Osobennosti termoimpul'snoy ochistki poverkhnostey i kromok detaley ot zagryazneniy posle mekhanicheskoy obrabotki [Features of thermal pulse cleaning of surfaces and edges of parts from contamination after mechanical processing]. *Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii : sb. nauch. tr. – Open information and computer integrated technologies: collection scientific tr.*, 2018, no. 82, pp. 36-46. (in Russian).

18. Losev, A. V. Teoreticheskij analiz termoimpul'snogo udaleniya zausentsev s detaley [Theoretical analysis of thermal pulse removal of burrs from parts]. *Impul'snaya obrabotka metallov davleniyem – Pulse processing of metals by pressure*. Kharkov, HAI Publ., 1997, pp. 43-49. (in Russian).

19. Shipul', O. V., Kuznecov, I. B., & Palazjuk, E. C. Metodika naznacheniya rezhimov termoimpul'snoy odelki s uchetom trebovaniy k kachestvu kromki [Methodology for assigning thermal pulse finishing modes taking into account the requirements for edge quality]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 21-26. (in Russian).

20. Loseva, O. A., Losev, A. V., & Mayorova, Ye. V. Razrabotka fiziko-matematicheskikh modeley impul'sno-periodicheskikh protsessov nagreva elementov detali [Development of physical and mathematical models of pulse-periodic heating processes of part elements]. *Public communication in science: philosophical, cultural, political, economic and IT context: Collection of scientific papers «ΑΙΟΓΟΣ» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (May 15, 2020)*. Houston, USA, European Scientific Platform, 2020, vol. 2, pp. 97-104. (in Russian).

21. Loseva, O. A., Mayorova, Ye. V., & Losev, A. V. Perspektivy primeneniya termoimpul'snogo metoda [Prospects for the use of the thermal pulse method]. *Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (August 6-8, 2020)*. Melbourne, Australia, CSIRO Publishing House, 2020, pp. 60-63. ISBN 978-0-643-12109-6. (in Russian).

Надійшла до редакції 26.04.2023, розглянута на редколегії 20.09.2023

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF THE THERMOPULSE METHOD FOR REMOVING BURRS

*Aleksey Losev, Valeriy Sikulskiy, Anna Seleznova,
Igor Bychkov, Iurii Vorobiov*

The subject of study in this article is theoretical and experimental studies of the process of removing burrs in the details obtained by metalworking using the thermopulse method of combustion of detonating gas mixtures. The purpose of this article is to substantiate the use of the thermopulse method for finishing parts, which was developed at Kharkiv Aviation Institute in the early 70s of the 20th century for the flexible automation of cleaning the surfaces and edges of parts of hydraulic and fuel units of aviation and rocket-space equipment from burrs and technological contamination. The task was to determine the features of the thermal pulse method, the parameters of the technological process from the viewpoint of its application for processing the edges of parts with complex internal and external surfaces, and to reveal its potential for use in precision engineering. The research methods used are the modeling of processes using the finite element method and an experimental method for checking the adequacy of the proposed numerical models. The following results were obtained: processing of parts made of materials with different thermal conductivities, cleaning of rubber products, and rounding of the edges of threaded holes of aluminum alloy parts by melting. The scientific and practical novelty of the obtained results is as follows: the technological possibilities of thermopulse processing, justified control parameters, and optimization of processing modes are given; to consider the processes of heating the elements of the part and the combustion of detonating mixtures in the working chamber of the equipment; obtained regularities of changes in the temperature fields of liquids and structural elements of parts during pulsed, constant, and mixed heating, which make it possible to form regimes of thermopulse processing of parts considering their structural features in several thermophysical properties of materials; developed processes of thermal pulse removal of burrs, microparticles, and dimensional rounding of edges using the results of modeling and experimental refinement on T-15 installations.

Keywords: thermal pulse method; surface treatment; edge rounding; deburring; thermophysical properties of materials; liquids; modeling; detonating gas mixtures; quality; industrial purity.

Лосєв Олексій Васильович – канд. техн. наук, каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Сікульський Валерій Терентійович – д-р техн. наук, проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Селезньова Ганна Сергіївна – старш. викл. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Бичков Ігор Валерійович – д-р техн. наук, проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Воробйов Юрій Анатолійович – д-р техн. наук, проф., проф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Aleksey Losev – PhD at the Department of Technology of Aircrafts Manufacturing, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a_losev_khai@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1530-1642.

Valeriy Sikulskiy – Doctor of Technical Science, Professor at the Department of Technology of Aircrafts Manufacturing, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.sikulskiy@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5944-4728.

Hanna Seleznova – Senior Lecturer at the Department of Technology of Aircrafts Manufacturing, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.seleznova@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6523-222X.

Igor Bychkov – Doctor of Technical Science, Professor at the Department of Technology of Aircrafts Manufacturing, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.bychkov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-2436-4215.

Iurii Vorobiov – Doctor of Technical Science, Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: yu.vorobyov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-6401-7790.