

UDC 669.054.2.537.8:629.735.33

В.І. Савченко, Д.Р. Амірханов

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ АЕРОЗОЛЬНИХ ГАЗОДИНАМІЧНИХ СТРУМЕНІВ З МЕТАЛЕВИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Розглянуто процеси взаємодії абразивних частинок аерозольних газодинамічних потоків з різними видами металевих поверхонь. Одержано емпіричні залежності абразивного зносу від параметрів аерозольної газодинамічної обробки. Розроблена методика оцінки і прогнозування розміру знімання металу з поверхонь натурних деталей при їх обробці аерозольними газодинамічними потоками.

Аерозольний газодинамічний (АГД) спосіб очистки і фінішної обробки поверхонь деталей заснований на використанні енергії надзвукового потоку стиснутого повітря, за допомогою якого утворюється високошвидкісний (більш ніж 300 м/с) аерозольний потік водяної суспензії. Абразивні тверді частинки потоку, що знаходяться у середині аерозольних частинок АГД, оточені оболонкою води не менш ніж 1 мкм. Як і у випадку гідроабразивної очистки [1], така оболонка запобігає безпосередньому контакту твердої абразивної частинки з оброблюваною поверхнею, що сприяє двом позитивним моментам. По-перше, знижується ризик здатність абразивних частинок, що зменшує пошкодження поверхні внаслідок "сухого різання". По-друге, через наявність плівки води знижується імовірність залишків від твердих частинок суспензії в поверхні після її обробки АГД потоком.

Дослідження процесів очистки різних типів деталей підтвердили можливість застосування АГД способу під час виробництва і ремонту деталей авіаційних двигунів і силових турбін газоперекачувальних агрегатів [2]. Було встановлено, що при використанні АГД способу не спостерігається негативного впливу на оброблені АГД способом поверхні деталей. Однак дослідження впливу параметрів АГД потоків на знімання металу не проводилися.

На сьогоднішній день АГД спосіб широко застосовується для очистки різних видів деталей: лопаток і дисків турбін, включаючи кінцеву обробку поверхонь під нанесення різних видів захисних покриттів, роторів і статорів електроустаткування, електричних двигунів.

Під час очистки замків лопаток авіаційних двигунів на перший план після дефектоскопії встало питання про геометричні розміри деталей після їх очищення. Оскільки для нашого випадку існуючі прилади не можуть точно визначити знімання шару металу з поверхні деталі, що пов'язано з тим, що величина знімання металу менша за величину похибки приладу, то дослідження з визначення знімання металу з поверхні деталі в процесі її обробки були проведені за методикою, розробленою авторами.

Відомі методики оцінки масового знімання металу [1; 3] не дають повної інформації про геометричну величину знімання металу з поверхні і не є універсальними з точки зору прогнозування величини знімання, тому що щільність різних металів може істотно відрізнятися одна від одної.

Зазвичай інтенсивність знімання металу визначають інтегрально як масове знімання металу за одиницю часу. У цьому випадку зразки з різного металу обробляються при різних значеннях параметрів конкретного технологічного процесу очищення. Далі порівнянням маси зразків до і після їхньої обробки визначається величина винесення маси металу. Після цього, якщо відома щільність матеріалу зразка, можна перерахувати масу знятого металу в товщину металу, вилученого з поверхні зразка. Однак, якщо щільність матеріалу невідома (для випадку видалення окалини, оксидного шару або спеціального захисного покриття), досить складно визначити товщину вилученого матеріалу.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися зразки у вигляді прямокутних пластин чи круглих шайб з різних матеріалів. Типи матеріалів для зразків були обрані за двома критеріями. За першим критерієм обирали матеріали з різними фізико-хімічними властивостями, що відрізнялися хімічним складом, щільністю, твердістю і в'язкістю, за другим критерієм добору – матеріали, найбільш застосовувані в авіаційному моторобудуванні.

Під час проведення експериментальних досліджень на натурних зразках використовувалися лопатки турбіни двигуна Д18Т, що мають значні експлуатаційні забруднення у вигляді поверхневого нальоту від продуктів згоряння, а також у вигляді високотемпературних нагарів, що дифундували в поверхню металу.

Площа зразків була однакова і перевищувала площу плями контакту з метою урахування всіх можливих варіантів взаємодії струменя з досліджуваною поверхнею. Вибір був зроблений на величині площі зразка 50×50 мм, оскільки подальше збільшення площі призводить до збільшення відносної похибки виміру ваги зразків.

Зразки зважувалися до і після обробки, і за різницею величин їхньої ваги визначалося масове знімання металу. Для виключення впливу окисних процесів перед початком досліджень (якщо перерва між дослідженнями перевищувала 10 год) зразки знову оброблялися, зважувалися, і після цього виконувалися дослідження.

Обробка зразків проводилася на газодинамічному стенді. Діапазони робочих параметрів газодинамічного стенду змінювалися в таких межах: тиск стиснутого повітря на вході в АГД форсунку – 0,2 – 0,5 МПа; витрата робочої рідини – 0,1 – 0,5 л/хв; відстань від АГД форсунки до поверхні зразка – 20 – 150 мм; кут нахилу осі струменя до поверхні – 0 – 90°; співвідношення твердої і рідкої фаз робочої рідини 1/2 – 1/6. Зазначені діапазони охоплюють усі можливі варіанти зміни параметрів АГД способів очищення.

Виходячи з рівності щільності ρ металу всього зразка і металу, що вилучається з поверхні цього ж зразка ρ_{Δ} , тобто $\rho = \rho_{\Delta}$, і враховуючи те, що ρ дорівнює масі металу зразка $\Delta M_{об}$, ділене на його об'єм $V_{об}$, $\rho = \Delta M_{об} / V_{об}$, можна записати рівність:

$$M_{об} / V_{об} = \Delta M_{об} / \Delta V_{об} \quad \text{чи} \quad \Delta M_{об} / (S_{об} h) = \Delta M_{об} / (\Delta S_{кон} \Delta h), \quad (1)$$

де $M_{об}$ – маса зразка; $\Delta V_{об}$ – об'єм знятого металу; $\Delta M_{об}$ – маса знятого металу, кг; $S_{об}$ – площа зразка; $\Delta S_{кон}$ – площа плями контакту, м²; Δh – товщина знятого металу, м.

Тоді Δh визначиться з вимірюваних у процесі експерименту величин $M_{об}$, $S_{об}$, h , $\Delta M_{об}$, $S_{об}$, h , $\Delta M_{об}$ і $\Delta S_{кон}$ за формулою

$$\Delta h = (\Delta M_{об} S_{об} h) / (M_{об} \Delta S_{кон}), \quad (2)$$

де h – висота зразка.

Спростуючи вираз (2), одержимо розрахункову формулу

$$\Delta h = (\Delta M_{об} / M_{об}) (S_{об} / \Delta S_{кон}) h \quad (3)$$

чи

$$\Delta h = \Delta M_{об} (h / M_{об}) (S_{об} / \Delta S_{кон}).$$

Результати експериментальних досліджень залежності знімання товщини металу від часу взаємодії АГД струменя з поверхнями зразків з різних металів та сплавів наведені на рис. 1. Результати експериментів свідчать про лінійну залежність величини знімання металу від часу взаємодії АГД струменя з поверхнею зразків.

Енергетичним параметром, що впливає на процес обробки поверхні, є енергія АГД струменя. Цей параметр залежить від швидкості аерозольних часток, тобто від швидкості газового потоку. Швидкість газового потоку, що витікає з газового сопла, залежить від тиску стисненого повітря на вході в сопло і відстані від зрізу сопла. У першому випадку збільшення тиску стисненого повітря на вході в сопло призводить до збільшення швидкості газового потоку. У міру віддалення від зрізу сопла швидкість зменшується по експоненті [4].

Залежності інтенсивності знімання металу від тиску наведені на рис. 2, від відстані – на рис. 3.

Практично для всіх зразків збільшення швидкості витікання АГД струменя, що залежить від тиску на вході в АГД форсунку, призводить до майже лінійного збільшення інтенсивності знімання металу з поверхні зразків. Виключення становить режим витікання газового струменя з АГД форсунки при тиску 0,25 МПа. Зменшення інтенсивності знімання металу при $P = 0,25$ МПа обумовлено особливостями витікання газового струменя з надзвукового сопла з центральним тілом. Для даної конфігурації надзвукового сопла АГД форсунки, де режим витікання газу при тиску $P = 0,25$ МПа є перехідним, витікання газового струменя відбувалося на нерозрахованому режимі.

Під час дослідження залежності інтенсивності знімання металу від відстані L між вихідним перетином АГД форсунки і поверхнею зразків було встановлено, що зі збільшенням відстані L інтенсивність знімання металу лінійно убуває, що пов'язано зі зменшенням швидкості газового струменя, отже, і його енергії.

У такий спосіб можна вибирати варіант підвищення ефективності очищення, або підвищенням тиску стиснутого повітря на вході у АГД форсунку або зменшенням відстані L між вихідним перетином форсунки і поверхнею деталі, що оброблюється.

Особливий інтерес викликає залежність інтенсивності знімання металу від витрати рідини. Як показали результати аналізу експериментальних даних (рис. 4), існує верхня межа витрати рідини, вище якої збільшення продуктивності знімання металу не спостерігається.

З метою перевірки методики прогнозування інтенсивності знімання металу були проведені дослідження натурних лопаток турбіни Д-18Т. На першому етапі досліджували знімання металу зі зразків при оптимальних значеннях параметрів АГД струменів: тиску $P = 0,3$ МПа, витраті робочої рідини $G_{рр} = 0,3$ л/хв, відстані між вихідним перетином АГД форсунки і зразком $L = 70$ мм. Кут нахилу осі струменя відповідав двом значенням $\alpha = 90^\circ$ і $\alpha = 45^\circ$. При $\alpha = 90^\circ$ проводилася більша частина досліджень. При $\alpha = 45^\circ$ спостерігався максимальний рівень знімання металу.

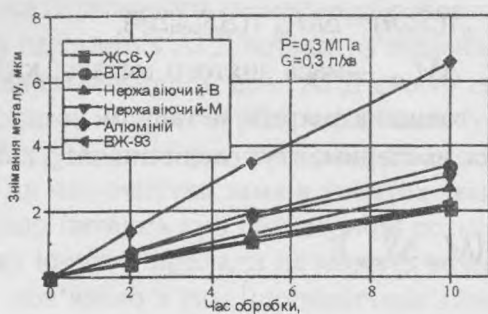


Рис. 1

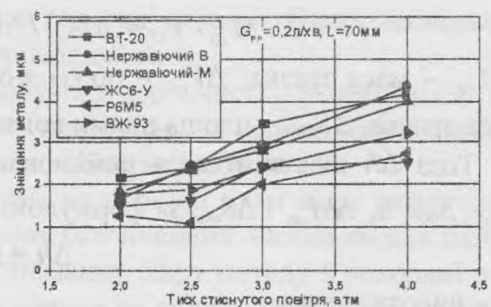


Рис. 2



Рис. 3

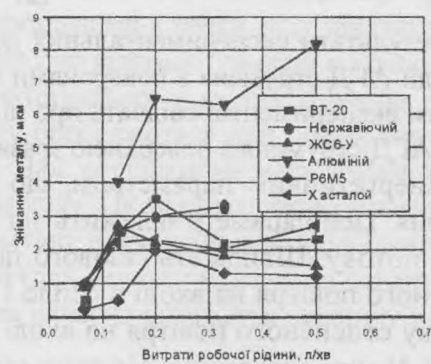


Рис. 4

Аналіз експериментальних досліджень показав, що очищення поверхні зразка під кутом $\alpha=45^\circ$ сприяє збільшенню знімання металу приблизно в 1,7 рази, ніж при обробці зразка під кутом $\alpha=90^\circ$. Для контрольних пластин знімання металу при обробці під кутом 90° складало 2,7 мкм, а при обробці під кутом 45° – 4,6 мкм.

Під час очищення поверхні зразка, вигнутого у вигляді лопатки турбіни, було отримане знімання металу, яке дорівнювало 4,57 мкм, що підтвердило припущення про тривалий вплив АГД струменя з поверхнею лопаток під кутом 45° .

Враховуючи те, що поверхня натурної лопатки складає близько 84 см^2 , а час очистки складає 300 с (тобто на 60 с більше), можна було прогнозувати, що знімання металу з поверхні лопаток у середньому може скласти 5,7 мкм.

Час видалення сажоподібних відкладень складає від 50 с для тиску $P=0,25 \text{ МПа}$ до 20 с для тиску $P=0,36 \text{ МПа}$.

Другий етап дослідження полягав у визначенні продуктивності видалення високотемпературних нагарів з поверхонь лопаток (очистки до металевому блиску) при різних параметрах АГД очистки (нагар + метал).

Обробка поверхні лопатки при тиску стиснутого повітря на вході в АГД форсунки $P = 0,25 \text{ МПа}$ дозволяє видалити високотемпературні нагари за час у 1,4 рази більше, ніж для оптимальних значень АГД параметрів, тобто для $P = 0,3 \text{ МПа}$ (див. таблицю).

Обробка поверхні лопатки при $G_{p,p} = 0,3 \text{ л/хв}$

Номер лопатки	$P = 0,25 \text{ МПа}$			$P = 0,3 \text{ МПа}$			$P = 0,36 \text{ МПа}$		
	t, с	Знімання, мкм		t, с	Знімання, мкм		t, с	Знімання, мкм	
		нагару + металу	металу		нагару + металу	металу		нагару + металу	металу
11АФ	420	4,9	6,49	–	–	–	–	–	–
6А1Е	420	4,78	4,5	–	–	–	–	–	–
828Я	–	–	–	300	6	5,67	–	–	–
АД02	–	–	–	300	7,1	5,52	–	–	–
2АВ5	–	–	–	–	–	–	300	6,3	5,28
АБГ2	–	–	–	–	–	–	300	7,79	6,2

Збільшення тиску до $P = 0,36 \text{ МПа}$ не призводить до істотного зростання продуктивності очищення (див. таблицю, лопатки 2АВ5 і АБГ2). Отримані експериментальні результати підтвердили існування оптимальних для даного типу АГД форсунки параметрів очищення поверхні.

Порівняльний аналіз експериментальних результатів дозволяє зробити висновок про можливість прогнозування знімання металу з поверхні деталей. У нашому випадку було отримано добре узгодження між прогнозованим зніманням металу (5,7 мкм) і реальним зніманням металу з поверхні лопаток 5,52...5,67 мкм (див. таблицю).

Таким чином, технологію обробки деталей АГД способом і устаткування можна застосувати для авіаційних двигунів і силових турбін газоперекачувальних станцій, де потрібна висока якість очищення, точність обробки і екологічна чистота.

Список літератури

1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1989. – 279 с.
2. Очистка лопаток ГТУ от эксплуатационных загрязнений АГД потоками / М.Л. Жадкевич, В.И. Савченко, С.Ф. Слюняев и др. //Тяжелое машиностроение. – М.: Машиностроение, 1993. – № 2. – С. 25–31.
3. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.

Стаття надійшла до редакції 12.03.01.