

О. В. Шорінов, А. О. Волков, І. В. Зорік

**ОБРОБЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ
РІЗАННЯМ**

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

О. В. Шорінов, А. О. Волков, І. В. Зорік

ОБРОБЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ РІЗАННЯМ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2024

УДК 621.793.7(075.8)
Ш79

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. В. Ф. Сорокін,
канд. техн. наук, доц. Є. В. Коноплянченко

Шорінов, О. В.

Ш79 Оброблення газотермічних покриттів різанням [Електронний ресурс] : навч. посіб. / О. В. Шорінов, А. О. Волков, І. В. Зорік. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2024. – 59 с.

Розглянуто основні методи газотермічного напилювання захисних і відновлювальних покриттів (плазмовий, газополуменевий, детонаційний, високошвидкісний газополуменевий, газодинамічний та ін.). Описано методи їх оброблення різанням (точіння, шліфування, фрезерування, свердління тощо), інструмент, режими оброблення, характеристики поверхневого шару після оброблення. Розглянуто методи, що забезпечують адгезійну міцність покриттів, необхідну для процесу різання, зокрема методи оброблення поверхонь перед напиленням зі зніманням стружки (точіння, нарізання різи, фрезерування канавок, голкофрезерування та ін.) і без знімання стружки (струминно-абразивний, пластичне деформування, накатування різи та ін.). Наведено загальні рекомендації щодо оброблення газодинамічних покриттів та методику розрахунку операційних розмірів і товщини покриттів для розроблення технологічних процесів виготовлення й відновлення деталей.

Для студентів механічних спеціальностей, аспірантів і науковців. Може бути корисним інженерно-технічним працівникам, які розробляють і застосовують напилені покриття.

Іл. 33. Табл. 7. Бібліогр.: 27 назв

УДК 621.793.7(075.8)

© Шорінов О. В., Волков А. О., Зорік І. В., 2024
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2024

ВСТУП

Покриття, отримані напиленням матеріалів, використовують дедалі ширше. Практичний досвід, набутий протягом останніх 20-30 років, свідчить, що цим шляхом можна щонайменше в 2-5 разів зменшити зношуваність деталей машин, експлуатованих у різних умовах. Технології також ефективні для захисту виробів від кородування та теплових руйнувань. Важливу роль технології газотермічного та газодинамічного напилювання відіграють у ремонтному виробництві – для відновлення та ремонту деталей техніки, які зазнали зношення, кородування, механічних пошкоджень тощо.

Контактну взаємодію інструмента зі стружкою та оброблюваною поверхнею в процесі різання супроводжує комплекс силових, теплових, хімічних та інших явищ. У результаті на поверхні виробу формується певна сукупність макро- та мікронерівностей, а в поверхневих шарах оброблюваного матеріалу відбуваються процеси зміцнювання-розміцнювання, структурно-фазові перетворювання та інші явища, які набувають особливого значення для того, щоб забезпечити довговічність і працездатність деталей, що працюють в умовах контактного навантаження.

Експлуатаційні властивості деталей з покриттями - зносостійкість, корозійна стійкість, герметичність, тепло- та електропровідність та інші – зумовлені геометричними параметрами поверхонь, фізико-механічними й хімічними властивостями, мікроструктурою поверхневих шарів, а отже, тісно пов'язані з умовами та особливостями оброблення різанням.

Більшість деталей із напиленими покриттями потребують фінішного механічного оброблення для того, щоб забезпечити необхідні параметри точності поверхні та характеристик поверхневих шарів. Основними методами механічного оброблення напилених покриттів різанням є точіння, шліфування, фрезерування тощо. Водночас, як правило, у процесі оброблення мінімально знімають шар за один прохід. Оскільки витрати часу та собівартість отримання газодинамічних покриттів пропорційні їхній товщині, необхідно знайти оптимальні значення товщини, що задовольняють вимоги, які ставлять до покриття, за мінімальних витрат на його отримання. Найбільш ефективно завдання обґрунтувати товщину покриття на деталях можна розв'язати за допомогою розрахунково-аналітичного методу.

1. МЕТОДИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ

1.1. Використання газотермічних методів напилювання в авіадвигунобудуванні

Ресурс деталей авіаційних газотурбінних двигунів значною мірою залежить від стану поверхневого шару, що характеризується зміненими порівняно з основним металом структурою і фазовим та хімічним складом. Така залежність зумовлена тим, що руйнування деталей під час експлуатування здебільшого починається саме з поверхневого шару, який, наражаючись на активний вплив навколишнього середовища, за всіх видів напруженого стану виявляється найбільш навантаженим.

Завдяки відносній простоті реалізації та невисокій вартості процеси газотермічного нанесення покриттів із подальшим фінішним обробленням нанесеного шару дедалі ширше застосовують у машинобудуванні.

Газотермічні покриття формують фактично за єдиним принципом: у технологічному каналі частинки напилюваного матеріалу фракцією 5...200 мкм розігріваються і розганяються до швидкостей 500...1200 м/с із подальшим зіткненням з підкладкою. У момент зіткнення частинка може бути у твердому стані, з проплавленою периферією (з твердим керном) або розплавлена повністю, унаслідок зіткнення частинок з підкладкою відбувається взаємодія як на механічному, так і на молекулярному рівні, що приводить до утворення міцних зв'язків основи з покриттям [2].

У виробництві та ремонті авіаційних газотурбінних двигунів найпоширенішими є такі методи: електродугове та газополуменеве металізування, газоелектричне металізування, електроімпульсне нанесення покриттів, плазмове та детонаційне напилювання. Класифікацію процесів газотермічного напилювання наведено на рис. 1.1 [14].

Газотермічні методи нанесення покриттів порівняно з іншими методами мають низку переваг, що сприяє ширшому впровадженню їх у виробництво. Зокрема це:

- можливість наносити порошки різних сполук (титану, кераміки, пластмаси, композиційних порошків) й отримувати покриття із заданими фізико-механічними властивостями;
- обмежений тепловий вплив на поверхню деталі, який виключає перетворення в поверхневих шарах і зменшує деформування деталей;
- можливість наносити шари завтовшки від 5 мкм до кількох міліметрів як на окремих ділянках, так і по всій поверхні;
- відносно висока продуктивність процесів (від кількох кілограмів у разі детонаційного процесу, десятків кілограмів за плазмового до сотні кілограмів за годину в разі електродугового);
- можливість заощаджувати кошти завдяки покриттю з мінімальними припусками на подальше оброблення;
- легка керованість процесами, енергетичні параметри яких можна змінювати залежно від вимог технології нанесення покриттів, тощо.

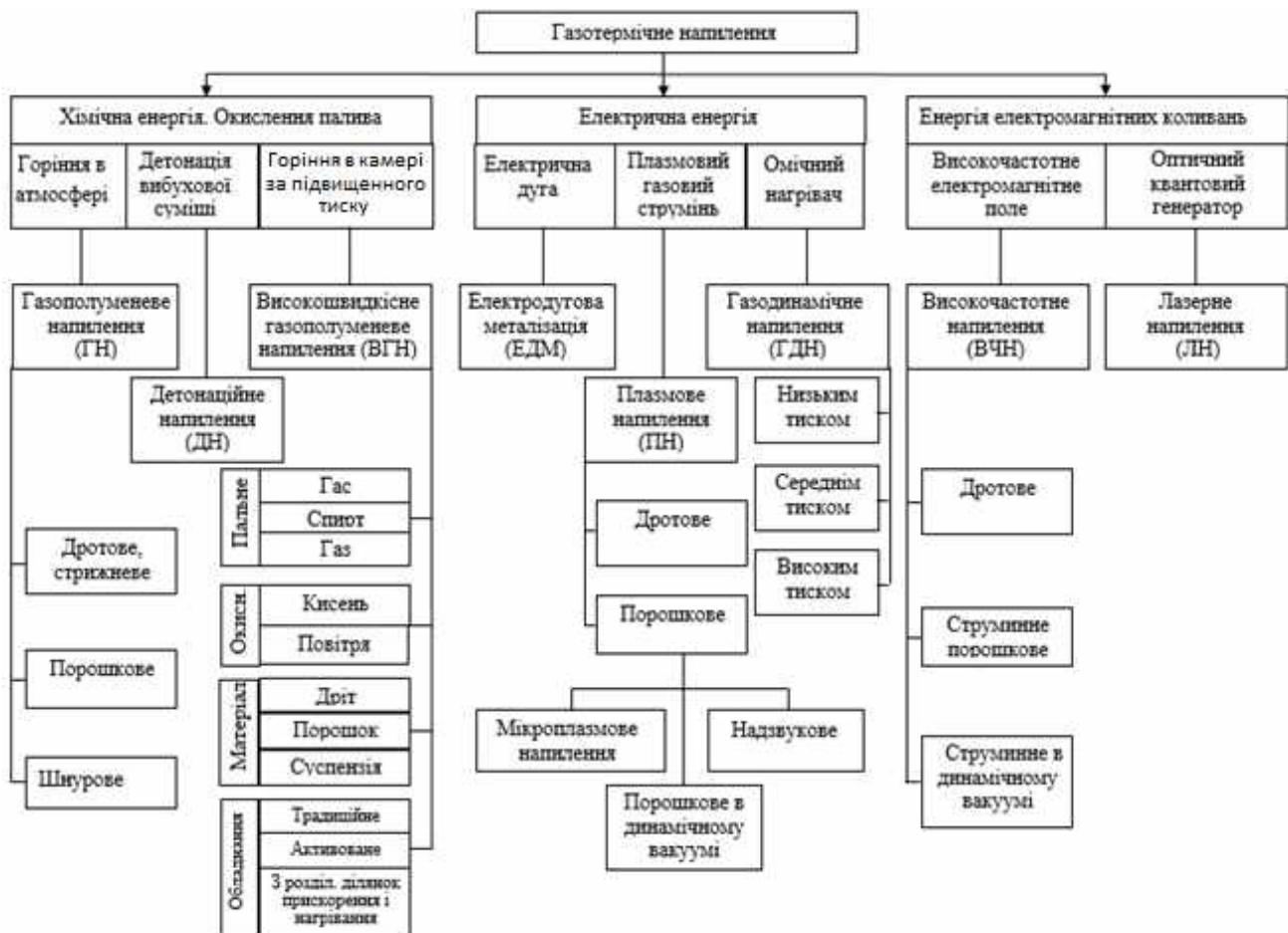


Рис. 1.1. Класифікація процесів газотермічного напилювання

Методи газотермічного напилювання є найбільш перспективними з погляду як забезпечення якості покриттів, так і техніко-економічних показників їх отримання. Промисловість США, Німеччини, Швейцарії та інших розвинених країн широко використовує газотермічні покриття в авіадвигунобудуванні (рис. 1.2) для того, щоб збільшити життєвий цикл хвостовиків і профілів лопаток компресора та напрямного апарата, профілів і торців лопаток турбін, посадкових місць на валах, втулок опори компресора, жарових труб камери згоряння, елементів повітряного ущільнення й багатьох інших відповідальних деталей авіаційних двигунів [1].

1.2. Газополуменеве напилювання

Газополуменеве напилювання передбачає формування крапель (частинок) розплавленого металу малого розміру й перенесення їх на оброблювану поверхню, де вони утворюють безперервне покриття. Металевий або полімерний порошковий, дрітаний або шнуровий матеріал подають у полум'я ацетилено-кисневого або пропано-кисневого пальника, він розплавляється і стисненим повітрям переноситься на напилювану поверхню, де, остигаючи, формує покриття.

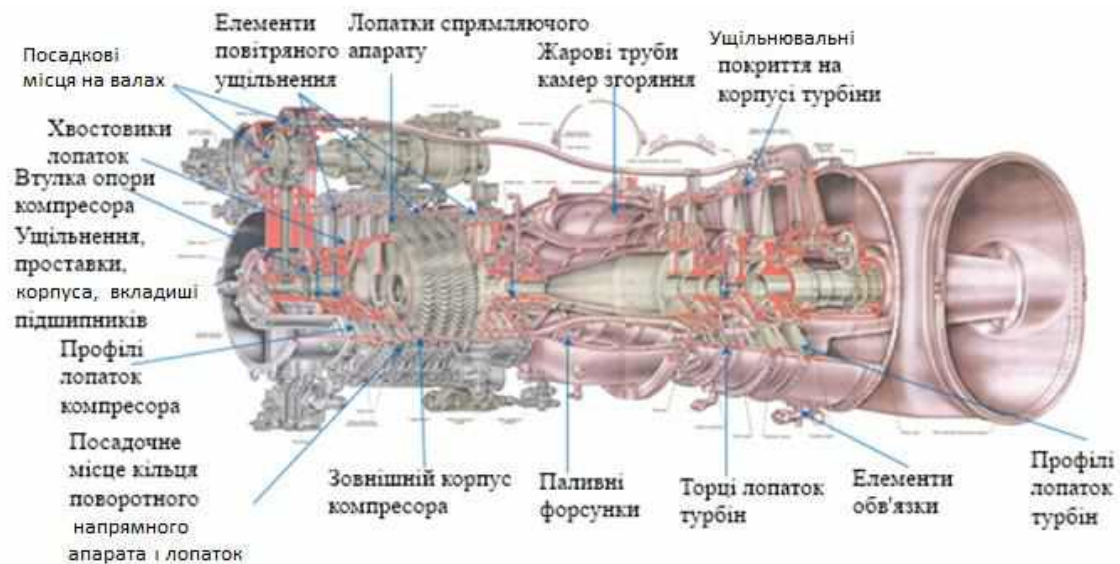


Рис. 1.2. Газотермічні покриття в авіадвигунобудуванні

Метод простий для освоєння та застосування, його можна використовувати як у ручному, так і в автоматизованому режимах.

За допомогою газополуменового напилювання наносять зносостійкі та корозійностійкі покриття із залізних, нікелевих, мідних, алюмінієвих, цинкових сплавів, бабітові покриття підшипників ковзання, електропровідні покриття, електроізоляційні покриття (рилсан), декоративні покриття. Широко використовують його і для відновлення геометрії деталей.

Розпилюваний матеріал у вигляді порошку, дроту, шнура розплавляють у киснево-ацетиленовому полум'ї та прискорюють за допомогою газоподібних продуктів згоряння. Схему з використанням порошку, реалізовану в пальнику, показано на рис. 1.3.

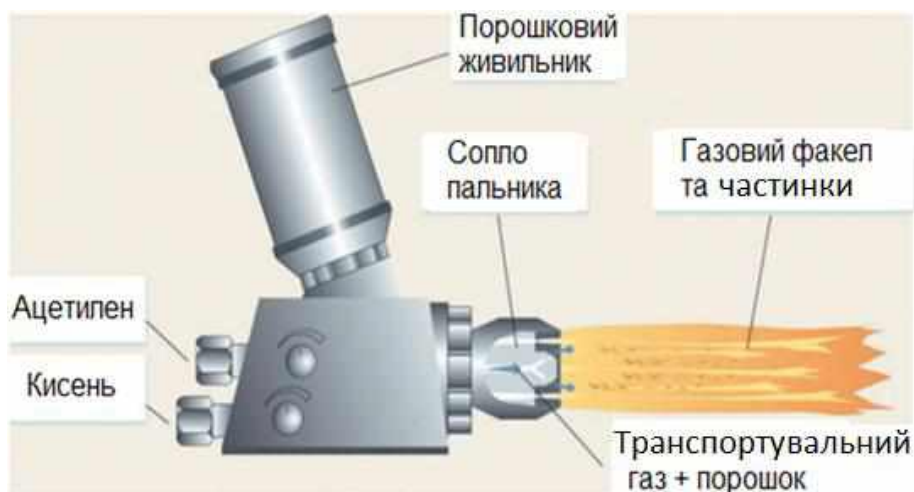


Рис. 1.3. Схема пальника для газополуменового порошкового напилювання

Якщо використовують матеріали у вигляді дроту / прутка, останні подають у полум'я привідними роликami. Дріт плавиться, входячи в полум'я, розпорошується на частинки навколишнім струменем стисненого повітря й рухається до заготовки (рис. 1.4).

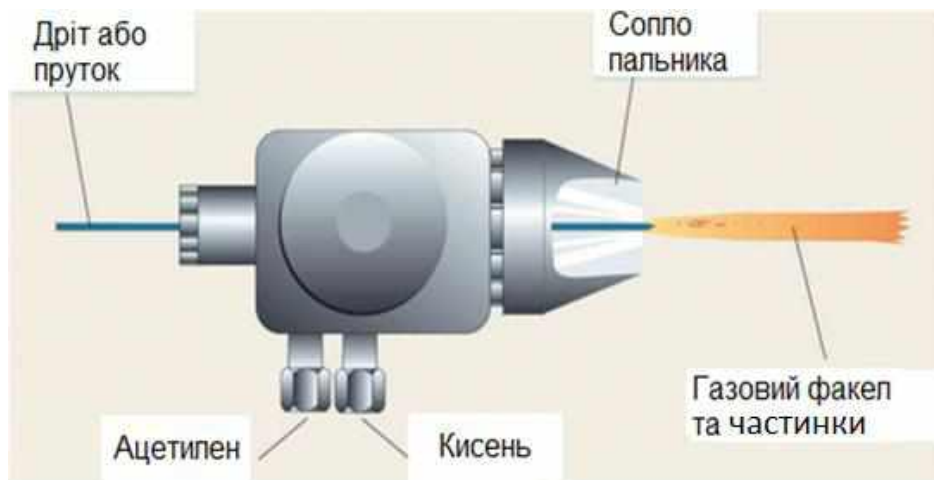


Рис. 1.4. Схема пальника для газополуменевого напилювання дроту / прутка

1.3. Надзвукове газополуменеве напилювання

Порівняно зі звичайними газополуменевим напилюванням, надзвукове газополуменеве напилювання означає, що розпилюваний газ досягає надзвукових швидкостей. За атмосферного тиску в середовищі ці умови можна визначити за наявністю стрибків ущільнення газового струменя. Зазвичай, як вихідний матеріал використовують порошок. Його типові розміри варіюються в межах від 10 до 70 мкм. Найменші діаметри обирають для матеріалів з високою температурою плавлення або високою щільністю (кераміка або металокераміка), а великі – переважно для металевих порошоків, що мають нижчу температуру плавлення.

Пістолети для надзвукового газополуменевого напилювання складаються з герметичної камери згоряння, сопла Лавалю, яке переходить у канал витоку, секції інжектування частинок у розпилювач та живильника для подавання порошку (рис. 1.5).

Джерелом тепла в разі надзвукового газополуменевого напилювання, як і в разі газополуменевого напилювання, служить теплота, що виділяється під час горіння різних типів палива. Принциповими відмінностями є те, що:

- розпилюваний матеріал подають у суміш газів до її згоряння з подальшим нагріванням і прискорюванням у надзвуковому соплі;
- витрата газів у 50-70 разів вища, ніж у разі газополуменевого напилювання, що різко збільшує потужність полум'я.

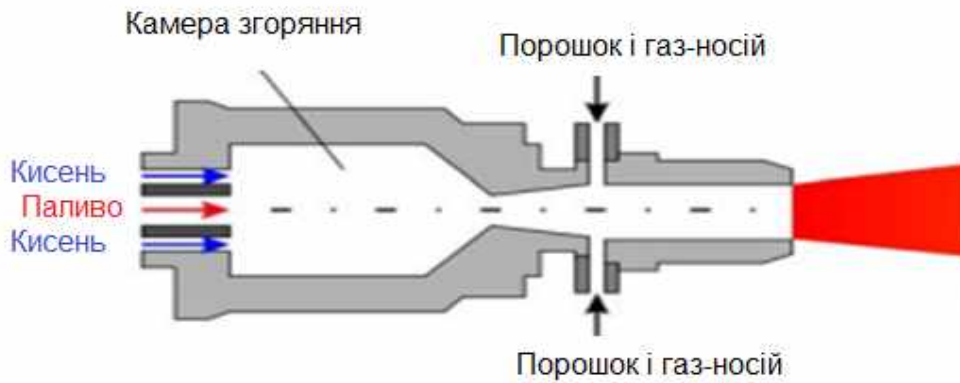


Рис. 1.5. Схема процесу надзвукового газополуменевого напилювання

Обладнання для надзвукового газополуменевого напилювання має низку особливостей щодо використовуваних газів, конструкції камер згоряння, соплового розгінного блока.

Залежно від виду газу, що його використовують як окислювач, розрізняють:

- високошвидкісне газополуменеве напилювання з використанням кисню, для його позначення прийнято назву HVOF за англійською термінологією (High Velocity Oxygen Fuel);

- надзвукове газоповітряне напилювання з використанням стисненого повітря, для його позначення прийнято назву HVOF за англійською термінологією (High Velocity Air Fuel).

1.4. Детонаційне напилювання

У разі детонаційного напилювання суміш ацетилену, кисню та порошку подають у камеру, де вона вибухає через дію іскри. Ударна хвиля в сопловій трубі прискорює розпилювані частинки. Після кожного вибуху камеру згоряння та трубу продувають азотом (рис. 1.6).

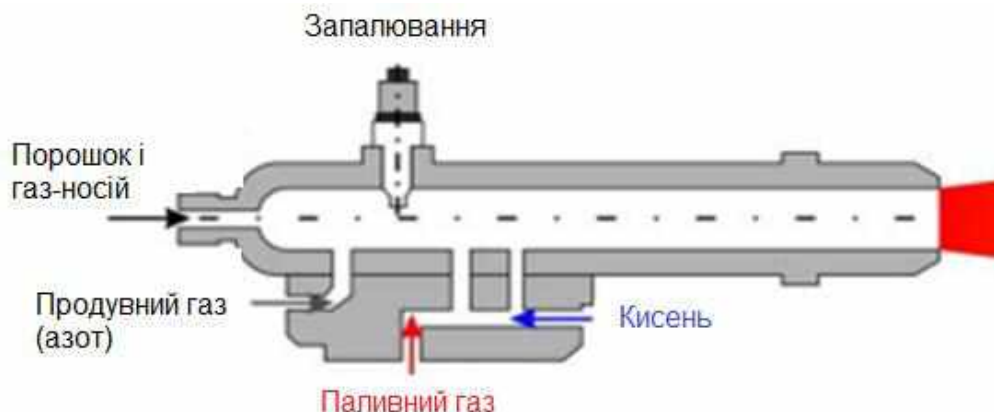


Рис.1.6. Схема процесу детонаційного напилювання

В умовах детонування температура продуктів згоряння досягає 4000°C (за вільного горіння температура горіння киснево-ацетиленової суміші становить 3140°C). Це дає змогу підвищити тиск у сопловій трубі й розігнати частинки до високих швидкостей.

Детонаційні покриття мають найвищу адгезію та найменшу пористість серед газотермічних напилюваних покриттів. Процес дуже успішний для напилювання матеріалів, чутливих до розкладання внаслідок нагрівання (кермети).

1.5. Плазмове напилювання

Із винаходом низькотемпературної плазми можливості методів газотермічнонапилюваних покриттів суттєво розширилися, оскільки з'явилася можливість керувати технологічними параметрами в широкому діапазоні – температура в зоні плазмового струменя може досягати 15000°C , що дає змогу використовувати тугоплавкі матеріали, зокрема й кераміку (оксиди, карбіди). У разі плазмового напилювання порошок усередині або зовні плазмового пістолета плавиться плазмовим струменем і прискорюється в напрямку покривної деталі. Плазма генерується електричною дугою, що горить в плазмотвірному газі, водночас дисоціюють та іонізують гази, які на виході набувають високої швидкості та внаслідок рекомбінації віддають своє тепло напилюваним частинкам.

Принципову схему плазмового напилювання показано на рис. 1.7.

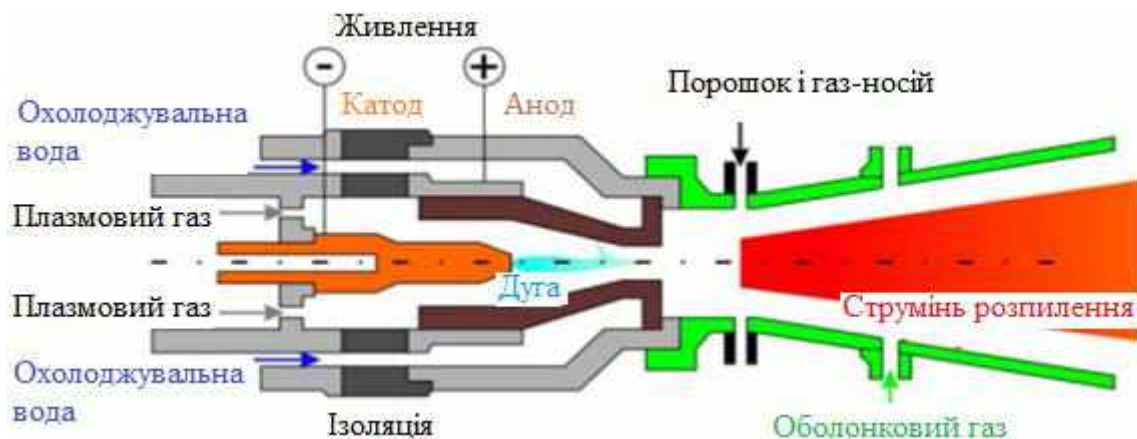


Рис. 1.7. Схема процесу плазмового напилювання

Плазмові покриття мають високі фізико-механічні властивості, низьку пористість (до 0,5 %), добрі адгезійні властивості – міцність зчеплення становить 80 МПа, що дає змогу застосовувати їх в аерокосмічній промисловості, зокрема для того щоб отримувати термобар'єрні покриття. До недоліків слід віднести високу енергомісткість процесу (80 кВт і більше) та малу продуктивність (6 кг/год).

1.6. Дугове металізування

За дугового металізування покриття утворюється з крапель рідкого металу, що рухаються в струмені газу. Розпилюваний матеріал нагрівається й плавиться за рахунок тепла дуги, що горить між дротом й електродами, з яких утворюється розпилюваний матеріал. Рідкий метал здувається з торців електродів, дробиться під впливом газодинамічних та електромагнітних сил й у вигляді крапель рухається в напрямку сумарної дії (рис. 1.8).

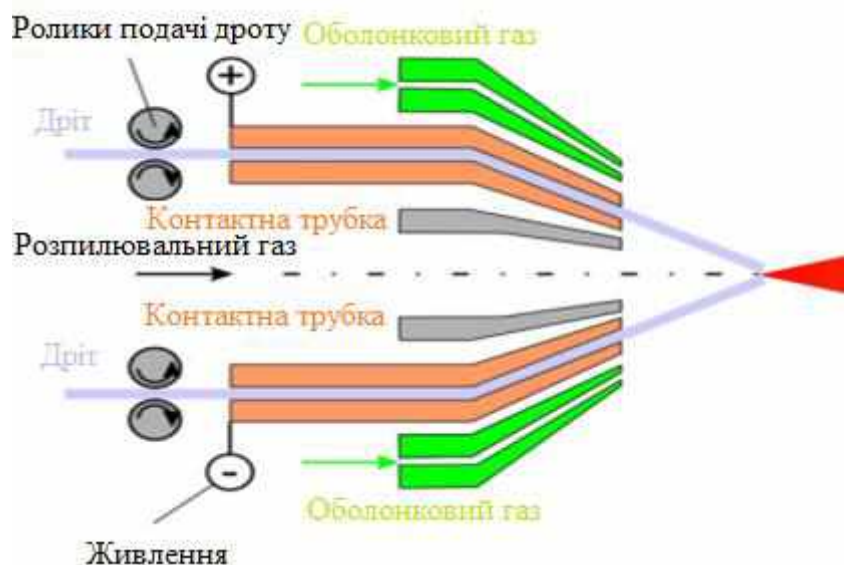


Рис. 1.8. Схема процесу дугового металізування

Схема процесу демонструє інтенсивне вигорання з металу легувальних елементів і насичування шару, який наносять газу з атмосфери. Це приводить до зміни хімічного складу, зниження концентрації легувальних елементів, надмірного вмісту оксидів у покритті.

Найпоширенішим розпилювальним газом є стиснене повітря, отримання якого вирізняється низькою вартістю порівняно з іншими газами. Є схеми, у яких стиснене повітря подають у суміші з різними видами палива. Це дає змогу використовувати тепло, що виділяється під час горіння, а також знижувати окислювальний потенціал газової фази.

1.7. Холодне газодинамічне напилювання

У методі холодного газодинамічного напилювання (ХГН) як джерело енергії використовують кінетичну енергію розпилюваних частинок. Метод оснований на ефекті закріплення твердих частинок, що рухаються з надзвуковою швидкістю, на поверхні під час зіткнення з нею. Ерозія перетворюється на формування покриттів після критичної швидкості частинок $V_{кр} = 300\text{--}500$ м/с. Попереднє підігрівання та підвищення тиску

газу забезпечують зростання продуктивності. Залежно від рівня цих параметрів розрізняють ХГН-системи 1-го покоління (підігрів газу – 200–300 К, тиск газу – 1,6 МПа, витрата газу – 18 м³/год, швидкість частинок – 300–500 м/с) та 2-го покоління, де відповідні значення температури, тиску газу, швидкості частинок у 2–2,5 раза вищі, а витрата газу вища на порядок (рис. 1.9).

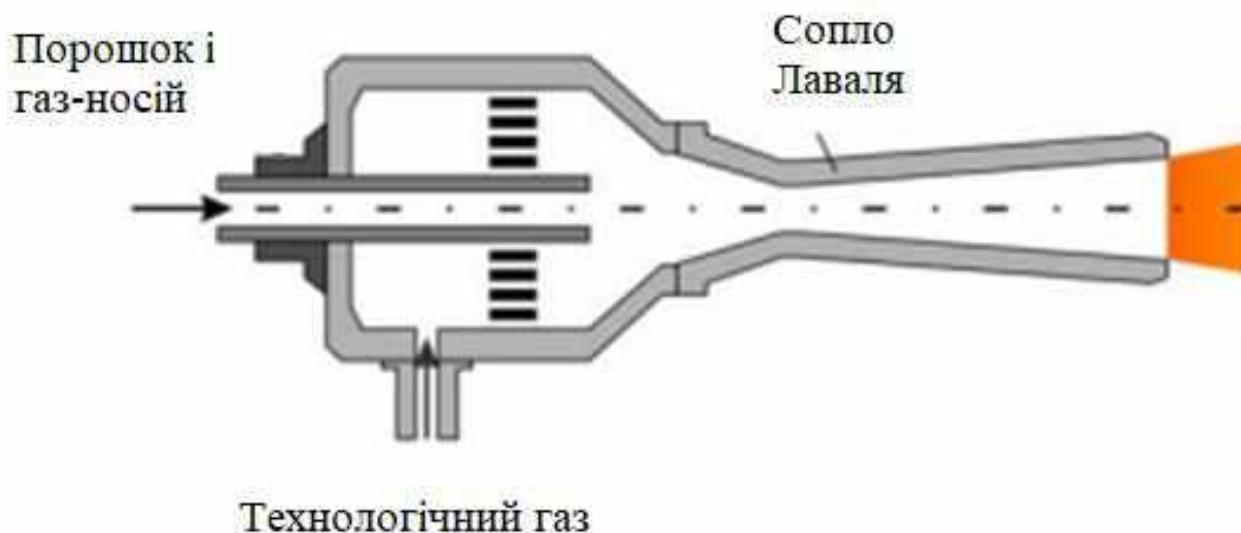


Рис. 1.9. Схема процесу холодного газодинамічного напилювання

1.8. Порівняльна характеристика методів газотермічного напилювання

Методи газотермічного напилювання можна порівняти за температурами та швидкостями розпилюваних частинок (рис. 1.10). Співвідношення цих параметрів визначає можливі сфери застосування конкретних методів газотермічного напилювання для поліпшення властивостей поверхні. Далі використано такі позначення методів напилювання: ГП – газополуменеве, ДМ – дугове металізування, HVOF – високошвидкісне газополуменеве, 2-го, 3-го покоління, HVOF – надзвукове газоповітряне, ДН – детонаційне, ПН, ПДВ – плазмове у повітрі та вакуумі, ХГН-1 – холодне газодинамічне 1-го покоління (низький тиск); ХГН-2 – холодне газодинамічне 2-го покоління (високий тиск).

Порівняльну характеристику основних методів газотермічного напилювання наведено в табл. 1.1. Тут прийнято такі позначення: Т – температура джерела тепла; V_p – середня швидкість частинок; σ – адгезійна міцність; О – вміст кисню в покритті; П – пористість покриття; Q – продуктивність напилювання; Витрати – відносні загальні витрати для отримання покриття, 1 = низькі, 5 = високі; δ – товщина покриття.

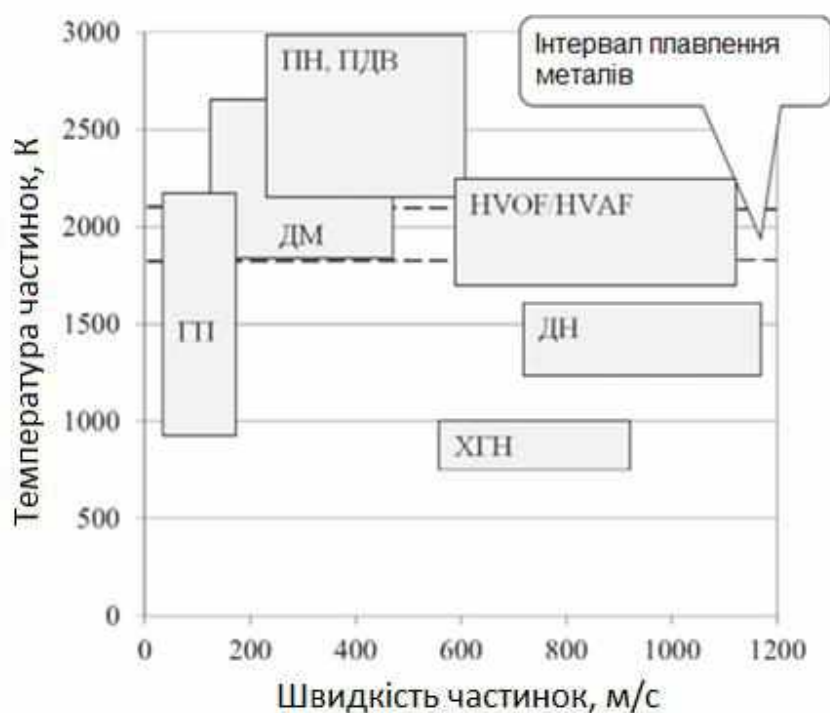


Рис. 1.10. Співвідношення температур і швидкостей частинок для різних методів газотермічного напилювання

Таблиця 1.1
Характеристики методів газотермічного напилювання

Метод	T, °C	V _p , м/с	σ, МПа	O, %	П, %	Q, кг/год	Витрати	δ, мм
ГП	3000	40	8	10–15	10–15	2–6	1	0,1–15
ДМ	4000	150	10–40	2–10	2–10	10–25	2	0,1–15
HVOF	3000	600–800	>70	1–5	1–2	2–8	3	0,1–2
HVAF	2000–3000	600–1200	>70	1–5	0–0,2	2–30	2	0,1–12
ДН	4000	600–1200	>70	1–5	1–2	0,5–2	4	0,05–0,3
ПН	12000	200–400	10–70	1–3	1–5	2–10	4	0,1–1
ПДВ	12000	400–600	>70	0	<0,5	2–6	5	0,1–1
ХГН-1	200–650	300–500	5–30	0	<0,5	0,5–3	1	0,2–2
ХГН-2	500–1000	400–800	10–40	0	<0,5	4–12	4	0,3–4

Наведений огляд обладнання газотермічного напилювання допоможе вивчати процеси й розробляти технології нанесення покриттів.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення поняття «покриття».
2. Який загальний принцип формування газотермічних покриттів?
3. Схарактеризуйте методи дугового металізування, детонаційного, плазмового, газополуменевого та холодного газодинамічного напилювання.

2. МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ ПОКРИТТІВ РІЗАННЯМ

2.1. Токарне оброблення

Точінням зазвичай обробляють газодинамічні покриття з металів. У процесі напилювання рекомендують забезпечити заповнення не лише проточки, підготовленої для покриття, але й прилеглих до неї ділянок суміжних поверхонь (рис. 2.1) [18].

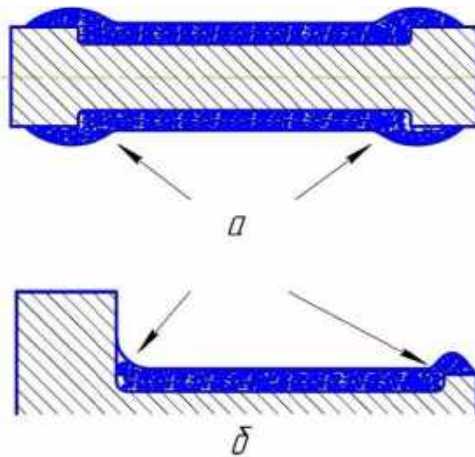


Рис. 2.1. Рекомендована форма сполучення напиленого покриття із суміжними поверхнями: а – циліндрична поверхня; б – плоска поверхня

Бажано використовувати різці, оснащені твердосплавними пластинами. Оскільки глибина оброблення здебільшого не перевищує 0,6 мм, різання виконують переважно закругленою вершиною різця. Різці з від'ємним значенням передніх кутів не застосовують, зазвичай передній кут не перевищує 8° .

Основні вимоги до геометрії та встановлення різців, оснащених твердосплавними пластинами, для точіння газодинамічних покриттів наведено на рис. 2.2 [18].

Для точіння можна використовувати різці зі швидкорізальної та інструментальних сталей, проте вони менш стійкі і якість оброблення цими різцями нижча. Для різців зі швидкорізальної сталі рекомендовано такі геометричні параметри: кут при вершині в плані $\varepsilon = 80^\circ$; задній кут $\alpha = 15^\circ$; передній кут $\gamma = 10^\circ$; радіус при вершині різця $R = 1$ мм. Похилим встановленням різця намагаються забезпечити мінімальне значення заднього кута, а значення переднього збільшують до 15° [6].

Через оброблення різанням напилених композицій на основі оксидів різальний інструмент швидко зношується, що зумовлено насамперед інтенсивним впливом абразивного матеріалу на контактні поверхні інструмента.

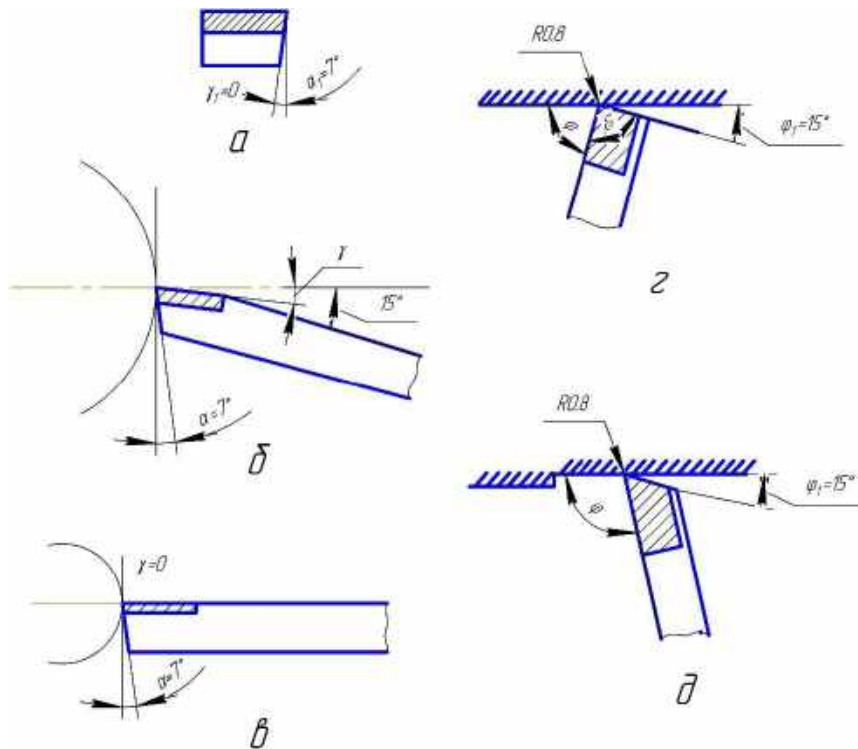


Рис. 2.2. Кути та встановлення різців, оснащених твердим сплавом, для точіння газодинамічних покриттів: а – переріз різця допоміжною січною площиною (α_1 – допоміжний задній кут, допоміжний передній кут $\gamma = 0$); б – встановлення різця з позитивним головним переднім кутом $\gamma \leq 8^\circ$ ($\alpha = 7^\circ$ – головний задній кут); в – встановлення різця з головним переднім кутом $\gamma = 0$; г – встановлення та кути різця в плані в разі точіння на прохід (ϕ , ϕ_1 – головний і допоміжний кути в плані); д – те саме в разі точіння в упор (R – радіус закруглення при вершині різця)

Такі покриття обробляють інструментом з механічним кріпленням чотиригранної твердосплавної пластини марок ВК60М і ВК60М + TiC або різцевими вставками, оснащеними полікристалами ельбор-Р або ПТНБ, за таких режимів різання: швидкість різання $V = 40 \dots 45$ м/хв; подача $S = 0,12 \dots 0,23$ мм/об; глибина різання $t = 0,15 \dots 0,3$ мм. Оптимальні геометричні параметри прохідних різців не залежать від марки інструментального матеріалу: γ від -10 до 5° ; $\phi_1 = 30 \dots 50^\circ$; $\alpha = 6 \dots 10^\circ$; $R = 1,5$ мм. Шорсткість обробленої поверхні $Ra 2$, на ній немає лущення та наклепу. За критерій затуплення інструмента прийнято зношення по задній грані $h = 0,7$ мм [6].

2.2. Оброблення шліфуванням

Шліфування застосовують для оброблення багатьох видів газотермічних покриттів. За правильно обраного режиму шліфування напруження, що виникають у покритті, підкладці та на межі їх розподілу, значно менші, ніж за інших способів механічного оброблення [15].

Обробляючи покриття на поверхнях тертя, треба забезпечити їхню чистоту й відсутність абразивних частинок. Якщо покриття просочити перед шліфуванням, це запобігає забрудненню пор покриття й дає змогу отримувати чисті поверхні без вирваних частинок і без подряпин. Рекомендують шліфувати, використовуючи змащувально-охолоджувальну рідину, особливо якщо обробляють великі поверхні та знімають великі припуски. Оскільки напилені матеріали відрізняються структурою від звичайних матеріалів того ж складу, під час шліфування використовують інші абразивні інструменти, значення подач і швидкості різання тощо. Більш м'які напилені матеріали, особливо метали, зумовлюють перевантаження круга. Тому рекомендують використовувати круги з відносно великими абразивними зернами та низькою міцністю зв'язки.

Фінішне оброблення покриттів доцільно виконувати торцевими чашковими алмазними кругами, еластичними брусками та нескінченними алмазними стрічками. Шліфування торцем алмазного круга можливо успішно зреалізувати на токарних (використовують шліфувальну головку універсальних заточувальних верстатів) і шліфувальних верстатах з кругами малих розмірів за значного охолодження 20%-вим водним розчином емульсолу. Для цього використовують чашкові круги з алмазами АСО, АСР, АСМ на органічних зв'язках Б1 і БР зернистістю 28/20–125/100. Мінімальну шорсткість поверхні ($R_a 0,04 \dots 0,2$) забезпечують за подачі $S \leq 0,27$ мм/об, сили притискання торцевого круга до оброблюваної поверхні $P_k = 30 \dots 60$ Н, зернистості $K = 28/20 \dots 63/50$. Характер зміни висоти мікронерівностей поверхні, яку обробляють різними алмазними кругами (АСО, АСМ, АСВ), залежить від зернистості, сили притискання круга та поздовжньої подачі. Зі збільшенням значення подачі та зернистості круга висота мікронерівностей зростає. Зі зміною сили притискання від 20 до 40 Н висота нерівностей зменшується, а якщо сила понад 60 Н – збільшується. Якщо подача $S > 27$ мм/об, шорсткість посилюється, що можна пояснити зменшенням кількості одночасно задіяних зерен, що припадають на одиницю оброблюваної площі, і наявністю слідів попереднього оброблення. Зі зростанням зернистості вижолобків (сліди руху зерен) різання стає глибшим. Збільшення сили притискання торця круга до оброблюваної поверхні до значень, що перевищують 60 Н, роблять режим шліфування жорстким, у роботі інтенсивніше бере участь зв'язка, можлива поява вібрацій. Це зумовлює зростання висоти мікронерівностей й утворення на оброблюваній поверхні сітки брижі. Якщо для чистового оброблення використовувати алмазні чашкові круги на металевій зв'язці, це не знижує шорсткості поверхні, а, навпаки, збільшує її до $2,5 \dots 1,25$ мкм за вихідної (після оброблення периферією круга) $0,16 \dots 0,3$ мкм. Таке явище зумовлене дуже великою жорсткістю зв'язки, що не дає змоги високонавантаженим різальним зернам занурюватись у неї (водночас неможливо забезпечити збільшення числа одночасно задіяних зерен). Металева зв'язка є поганим демпфером,

що під час оброблення з силою притискання 60 Н веде до появи вібрацій. Зниження жорсткості оброблюваної деталі також викликає зростання шорсткості. Оброблення алмазними чашковими кругами на органічних зв'язках Б1 і БР завжди знижує висоту мікронерівностей. Алмазні круги на органічній зв'язці БР інтенсивно зношуються [7; 8; 18].

Для фінішного оброблення твердих покриттів разом зі шліфуванням алмазними кругами застосовують і полірування, використовуючи для цього алмазні стрічки (еластичні бруски та нескінченні алмазні стрічки). Еластичні бруски складаються зі сталюї основи, еластичного підшару (резини) та еластичної стрічки (АСО) на каучуковмісних зв'язках Р9 і Р4. Алмазні стрічки на тканинній основі не варто використовувати для полірування твердих покриттів через значне витрачання алмазу (однією стрічкою можна обробити 2-3 деталі діаметром 80 мм завтовшки 40 мм). Для оброблення еластичними брусками використовують суперфінішну головку моделі СФГ-100, яку встановлюють на поперечному супорті токарного верстата, з амплітудою осцилювання бруска 3 мм і числом подвійних ходів механізму осцилювання 1400 хв^{-1} . Під час оброблення застосовують інтенсивне охолодження змащувально-охолоджувальною рідиною (суміш 79% гасу, 20% веретенного мастила і 1% олеїнової кислоти). Мінімальну шорсткість ($R_a 0,03...0,015$) можливо забезпечити за швидкості деталі $V = 25...30 \text{ м/хв}$, $t = 25...35 \text{ с}$, $p_n = 0,3...0,4 \text{ МПа}$, $K = 28/20-63/40$. Режими оброблення з використанням нескінченних алмазних стрічок на каучуковмісних зв'язках Р9 і Р4 аналогічні [6].

Якщо покриття пористі, то під час шліфування з охолодженням проникнення змащувально-охолоджувальної рідини через пори може спричинити кородування основного металу.

Для оздоблювального оброблення твердих покриттів, основним компонентом яких зазвичай є тугоплавкі сполуки, використовують два методи: шліфування та шліфування з подальшим притиранням. Технологію шліфування, розроблену для покриттів, що містять WC-Co, можна використовувати й для інших видів таких покриттів [5; 16]. Проте деякі з оксидних покриттів швидше засалюють шліфувальні круги, через що їх доводиться частіше очищати. Як свідчить досвід, неправильна технологія шліфування може спричинити пошкодження покриттів. Шліфування покриттів кругами з карбіду кремнію зернистістю 80 забезпечує шорсткість поверхні $1,25...175 \text{ мкм}$, а в разі шліфування алмазним кругом – $0,2...0,205 \text{ мкм}$. За шліфування алмазним кругом та подальшого притирання на безцентровому верстаті (чавунний притир) можна досягти шорсткості поверхні $0,025...0,375 \text{ мкм}$. Алмазні круги рекомендують використовувати для шліфування всіх покриттів. Оптимальні розміри дають круги з концентрацією 100% на бакелітовій зв'язці твердості «L». Висока стійкість таких кругів зумовлена наявністю достатньої кількості алмазів у зоні різання та відносно низькими температурами в зоні шліфування (бакелітова зв'язка кругів руйнується,

що забезпечує доступ більшій кількості алмазів у зону різання). Це дає можливість проводити шліфування безперервно й збільшувати інтервали між правленнями круга [6].

Для шліфування покриттів можна використовувати планетарну шліфувальну головку з чотирма шліфувальними чашковими кругами, які встановлюють на верстаті 3Г71. Кінематика руху абразивних зерен у разі планетарної схеми шліфування перешкоджає засалюванню кругів і забезпечує їх самозаточування [15].

За звичайної схеми шліфування торцем чашкового круга в аналогічних режимах тріщини не з'являються на глибині шліфування 0,05 мм, а в разі планетарної схеми шліфування ельборовими кругами – за глибини шліфування 0,05...0,3 мм.

Досвід механічного оброблення різних газотермічних покриттів шліфуванням і притиранням дав змогу сформулювати деякі загальні рекомендації [6; 18]. Насамперед не рекомендують механічно обробляти деталь з покриттям відразу після операції напилювання. Перерва тривалістю від 12 до 20 годин частково знімає внутрішні напруження й знижує ризик появи тріщин.

Розмір зерна круга обирають залежно від бажаної чистоти оброблення поверхні покриття (табл. 2.1) як у разі циліндричного, так і в разі плоского шліфування [6].

Таблиця 2.1

Залежність шорсткості обробленої поверхні покриття
від зернистості круга

Зернистість алмазного круга	Шорсткість поверхні, мкм
100	0,4–0,6
220	0,2–0,3
400	0,1–0,2

Шорсткості поверхні в наведених вище межах зазвичай можна досягти, знімаючи припуск приблизно 75 мкм. Круг зернистістю 220 використовують для оброблення з подальшим притиранням. Якщо притирання не застосовують, тонке оздоблення виконують за допомогою кругів зернистістю 400.

Шліфування затупленими й засаленими кругами, на перший погляд, дає кращі результати, але мікроскопічні дослідження виявляють, що на покритті є заглиблення й вирвано частинки, можлива поява тріщин через нагрівання тощо. Зовнішнім показником правильності умов шліфування є відсутність глянцевої полірованої поверхні. Теплові тріщини можуть виникати через недостатнє охолодження в процесі шліфування або неправильний вибір охолоджувальної рідини, яка не може розсіювати тепло, що виділяється.

Застосування як охолоджувальної рідини мінеральних олив не забезпечує достатнього охолодження контактної ділянки між кругом і оброблюваною поверхнею, що спричинює викидання частинок покриття та швидке засалювання круга. Рекомендованим охолоджувальним середовищем є вода з додаванням 2% інгібітора корозії. Як і для універсальних шліфувальних верстатів, охолоджувальна рідина виконує роль очищувача: видаляє окремі частинки покриття та круга з оброблюваної поверхні в дренажну систему. Під час оброблення великих плоских поверхонь у зону шліфування рекомендують подавати два потоки рідини, що охолоджують круг з двох боків. Оскільки магнітний стіл рухається в обох напрямках, один струмінь діє як охолоджувач, а другий струмінь очищає шліфувальну поверхню від видалених частинок.

Алмазні круги треба попередньо ретельно збалансувати: максимальне биття на периферії не повинно перевищувати 0,005 мм. Алмазні круги в міру засалювання правлять стрижнем із карбіду кремнію.

Для оброблення деталей, що не потребують високої точності розмірів, рекомендують стрічкове шліфування.

Поверхню з мікронерівностями заввишки 0,225...0,275 мкм можна отримати, якщо використовувати притирання алмазним порошком з допомогою стандартного обладнання.

Оптимальними умовами для отримання поверхні з мінімальним викиданням частинок є: використання чавунних притирів; застосування дрібнодисперсних алмазних порошоків (табл. 2.2); низька швидкість і високий тиск притирання; низька в'язкість зв'язки. Якщо цих умов не дотримуватися, зростає вірогідність проковзування алмазних зерен і викидання частинок матеріалу покриття.

Таблиця 2.2

Вплив зернистості алмазного порошку на шорсткість
поверхні покриття після притирання

Розмір частинок алмазного порошку	Орієнтовна шорсткість поверхні після притирання, мкм
0–2	0,0215–0,05
1–5	0,05–0,1
4–8	0,1–0,125

Найкращих результатів притирання можна досягти, якщо тиск дорівнює 0,14...0,175 МПа. Більші значення тиску зумовлюють появу подряпин на поверхні. Інколи, щоб запобігти деформуванню деталі, доводиться знижувати тиск притирання. Швидкість руху притира в разі оброблення газодинамічних покриттів становить 30,5...91,5 м/хв [6].

Кількість алмазів, використовуваних у процесі притирання, необхідно точно регулювати – надмірна їхня кількість у зоні оброблення може призвести до погіршення якості поверхні. Кожне наступне завантаження

алмазного порошку в притир треба робити лише тоді, коли продуктивність притирання знижується на 50% і більше.

2.3. Інші методи оброблення різанням

Деякі види газодинамічних покриттів треба свердли, стругати, фрезерувати, обробляти напилком [20]. Проте за таких процесів покриття не слід піддавати навантаженню на розтягання та згинання – зусилля, що діють за цих умов на покриття, не мають перевищувати міцність зчеплення. Якщо в покритті потрібно нарізати різь, то її, по можливості, треба починати в основному металі, а покриття слід попередньо роззенкувати [18].

Для чистового оброблення покриття використовують тонке шліфування, доведення (притирання), хонінгування, тонке розточування алмазним інструментом, полірування (зазвичай повстяними кругами). Іноколи для ущільнення пористих покриттів застосовують щітки, пресування, прокачування, дробоструменеве оброблення [18]. Обертovими щітками або вручну дротovими щітками можна, наприклад, ущільнити покриття, що призначене для захисту від кородування. Для покриттів із м'яких металів можливе струменеве оброблення за невеликого тиску повітря: його роблять так, щоб покриття не відшарувалось унаслідок занадто сильного деформування. Це також слід враховувати, коли ущільнюють покриття з кольорових металів пресуванням і вальцюванням.

Щоб покращити точність розмірів і зменшити шорсткість поверхні, використовують калібрування розточних отворів з покриттями спеціальною прошивкою потрібного розміру, полірування попередньо відшліфованих покриттів кругами з повсті, полотна або шкіри [18].

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть основні методи оброблення покриттів різанням.
2. Які різці використовують для точіння газотермічних покриттів?
3. Які шліфувальні круги використовують для шліфування газотермічних покриттів?
4. Який вплив на шорсткість обробленого покриття має зернистість шліфувального круга та тип зв'язки?

3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ОБРОБЛЕННЯ

3.1. Підготовка поверхонь деталей до напилювання

Завдяки вивченню взаємодії матеріалів під час газодинамічного напилювання класифіковано й окреслено найбільш раціональні технологічні прийоми та методи регулювання властивостей газотермічних покриттів [15].

Методи умовно поділяють на термічні та хімічні [20]. Їх аналіз, а також досвід промисловості свідчать про те, що перед напилюванням поверхні слід спеціально готувати. Така підготовка очищає поверхню й виводить її зі стану термодинамічної рівноваги із середовищем, звільняючи міжатомні зв'язки поверхневих атомів, тобто хімічно активізує підкладку. Однак активність підкладки швидко знижується через хімічне адсорбування газів із середовища й окислення. Тому час між операціями підготовки поверхонь і нанесення покриттів максимально скорочують. Попереднє оброблення поверхні, крім того, збільшує її шорсткість, що підвищує температуру в контакті під напилюваними частинками на виступах і збільшує сумарну площу ділянок зчеплення частинок з підкладкою. Шорстка поверхня має велику площу порівняно з гладкою, що також збільшує міцність зчеплення покриттів з основою.

До виробів, підготовлених до газодинамічного напилювання покриттів, ставлять такі вимоги [6; 18]:

- 1) розміри поверхонь деталей, на які буде нанесено покриття, треба зменшити (або збільшити) на товщину покриття;
- 2) на поверхнях виробів не повинно бути поверхневих дефектів – їх слід очистити від окалини, іржі, оксидів і різних забруднень;
- 3) розміри внутрішніх напилюваних поверхонь (діаметр, довжина) мають відповідати технічним характеристикам пристрою для напилювання;
- 4) покриття на виїмки та глухі отвори слід наносити, якщо відношення довжини або діаметра отвору до його глибини не менше ніж 2;
- 5) ділянка поверхні виробу, яку треба напилити, повинна мати необхідну конфігурацію (рис. 3.1);
- 6) діапазон товщини наношуваних покриттів загалом залежить від властивостей матеріалу покриття й виробу, різновтовщинність покриттів – від дисперсності використовуваного порошку, стабільності роботи порошкового живильника та рівня замеханізованості процесу. Зазвичай наносять покриття завтовшки від 15 мкм до 3 мм (подеколи до 10 мм і навіть більше) з допустимою максимальною різновтовщинністю від 10 до 150 мкм.

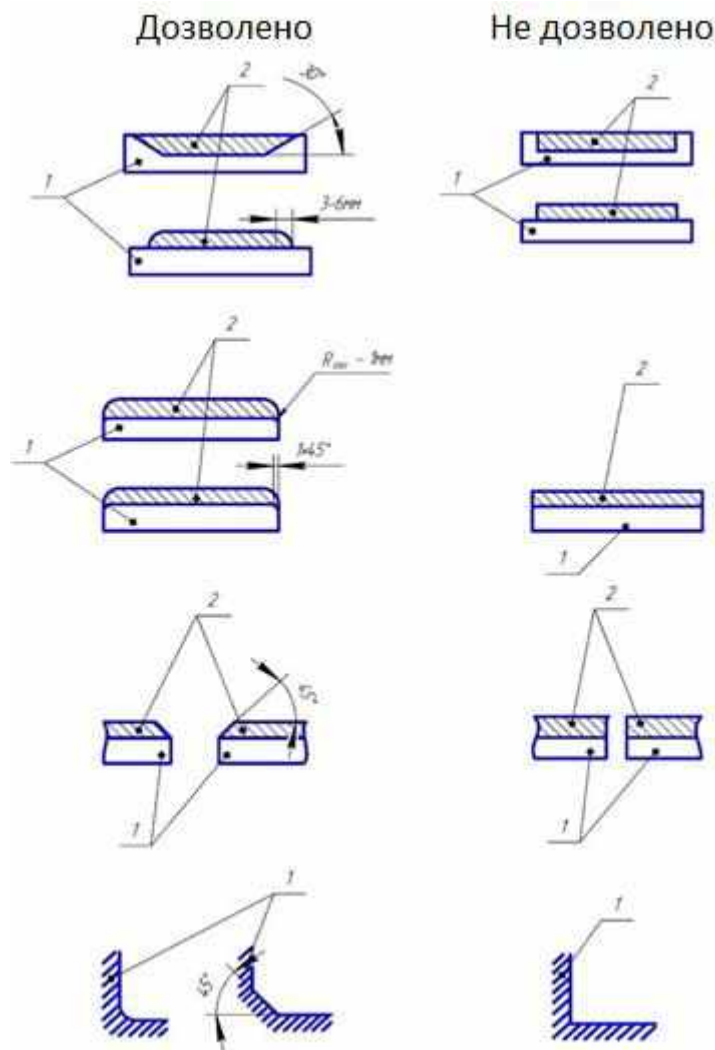


Рис. 3.1. Вимоги до конфігурації поверхонь із газодинамічними покриттями: 1 – основний матеріал виробу; 2 – покриття

Щоб уникнути кородування, допустимі поєднання матеріалів основи і покриття визначають відповідно до ГОСТ 9.005–72.

Готуючи поверхню, враховують такі вимоги [18]:

1) підготовлена поверхня повинна бути кімнатної температури; якщо температура виробу нижча за 0°C , перед підготовкою його підігрівають до кімнатної температури, оскільки конденсаційний шар вологи значно знижує міцність зчеплення покриття з основним матеріалом;

2) розміри зони спеціального оброблення мають бути на 5–20 мм більшими за зону напилювання;

3) не слід використовувати змащувально-охолоджувальну рідину;

4) необхідно запобігати контакту підготовленої поверхні з мастилами, жирами, водою тощо; не слід торкатися поверхні руками; під час оброблення та нанесення покриттів треба використовувати чистий знежирений інструмент або рукавиці;

5) якщо потрібно транспортувати підготовлений виріб, його слід упакувати в папір, спеціальну тару тощо.

Вибір способу підготовки поверхні залежить від виду покриття, його товщини, методу напилювання, конфігурації та розмірів виробу, виду оброблення напиленого покриття та інших чинників. Спосіб підготовки поверхні впливає на характеристики міцності основи: способи, що зменшують поверхневий наклеп (накатування, оброблення дробом тощо), підвищують втомну міцність на 20...30%; способи, що створюють на виробі концентратори напружень та спричиняють нерівномірне змінювання структури основного металу (нарізання різи й різних канавок, електроіскрове та електродугове оброблення, насікання зубилом тощо), знижують втомну міцність (до 60% від початкової).

Під час напилювання покриттів завтовшки понад 1,0 мм на деталі, що працюють в умовах підвищених навантажень (особливо зрізальних), застосовують спеціальне механічне оброблення (нарізання рваної різи, фрезерування насічки, фрезерування канавок клиноподібної форми, ручне або механізоване насікання, похиле сітчасте накатування тощо).

Очищення та миття деталей

Забруднені деталі та заготовки перед нанесенням газодинамічних покриттів слід ретельно очистити. Особливу увагу приділяють ділянкам зношеним, пошкодженим або забрудненим – із залишками палива, змащувальних матеріалів, застарілого мастила, нагару, накипу, слідів корозії, старих лакофарбових покриттів тощо.

Методи очищування металічних виробів від забруднень поділяють на такі [4; 13]:

- 1) механічні – змивання, оббивання, стирання тощо;
- 2) хімічні – травлення в розчинах і розплавах та інше;
- 3) колоїдно-хімічні – знежирювання;
- 4) електрохімічні;
- 5) ультразвукові;
- 6) термічні – вогневе очищування, прокалювання в окислювальній, відновлювальній та нейтральній атмосферах;
- 7) комбіновані.

Технологію, засоби та обладнання для очищення й миття деталей детально описано в роботах [3; 18; 21].

Готуючи поверхню до нанесення будь-яких покриттів перед травленням, нагріванням, струминно-абразивним та електроіскровим обробленням, поверхні деталі знежирюють органічними розчинниками (бензином, вайтспіритом, ацетоном, тетрахлоретиленом, трихлоретиленом тощо), засобами для миття, лужними розчинами та різними емульсіями за ГОСТ 9.402–80. Від чистоти поверхні деталі значною мірою залежить якість напиленого покриття. Бруд, окисні плівки, мастило на поверхні деталі зменшують міцність зчеплення покриття з металом деталі.

Деталі очищують та миють загальноприйнятими методами (машинним або ручним способом, використовуючи розчинники, очищення шкребками, обдування стисненим повітрям). Необхідно ретельно очищати не лише ті ділянки, які будуть напилювати, але й прилеглі до них (щоб запобігти перенесенню забруднення на оброблювану поверхню). Шпонкові канавки, отвори для доступу мастила ретельно очищають, промивають і продувають стисненим повітрям. Щоб видалити мастило з пор металу, деталі, що працюють тривалий час у масляному середовищі, нагрівають до 250°C у нагрівальних шафах або печах, паяльною лампою або газовими пальниками. Після знежирення деталей водними або емульсійними розчинами їх промивають водою (ГОСТ 2874–82), сушать у сушильних шафах за температури $60\ldots 150^{\circ}\text{C}$ або обдувають стисненим повітрям (ГОСТ 9.010–80).

Деталі та вироби, які вказаними способами знежирювати технологічно або економічно недоцільно, очищують від мастила за допомогою щіток або ганчірок, змочених у вайтспіриті або бензині. Деталі з пористих металічних матеріалів (наприклад, ті, що отримані методом порошкової металургії) треба нагрівати до вигорання мастила, що міститься в порах.

Чавунні деталі, а також деталі, які отримано методами порошкової металургії, можна кип'ятити в спеціальній посудині. Посудину заповнюють розчином і підігрівують. Деталь підвішують так, щоб на неї йшов пар, що утворюється. Пар змиває з поверхні деталі мастило та інший бруд; конденсат, разом із брудом, стікає з деталі.

3.2. Механічні способи оброблення поверхні перед напилюванням зі зніманням стружки

Для попереднього оброблення поверхонь, які будуть напилювати, можна використовувати майже всі відомі способи механічного оброблення різанням [17; 18; 27]. Вони забезпечують необхідну технологічність деталі відповідно до технології напилювання. Ділянка поверхні виробу, яку будуть напилювати, повинна мати потрібну конфігурацію стосовно радіусів заокруглених крайок, кутів, підготовки виїмок. Часто на поверхнях деталей нарізають дрібну різь із кроком $0,5\ldots 0,6$ мм і кутом профілю 60° . Різець може бути закругленим – це запобігає утворенню гострих кутів й дає змогу отримати глибину різі, що дорівнює половині стандартної. Для занадто товстих покриттів і для того, щоб забезпечити більш високу міцність зчеплення, нарізають різь із кроком $0,8\ldots 1,0$ мм [21].

У місцях переходу від напиленої частини тіла обертання з нарізаною рваною різью до ненапиленої проточують канавку, яка в розрізі має клиноподібну форму (рис. 3.2, а) [3; 6]. За динамічного навантаження, якщо не допустимо, щоб знижувалася втомна міцність, обирають інший спосіб оброблення і перехід виконують відповідно до рис. 3.2, б. Довжину

проточки на валу рекомендують робити такою, щоб вона перевищувала довжину підшипника приблизно на 3 мм з кожного боку [3].

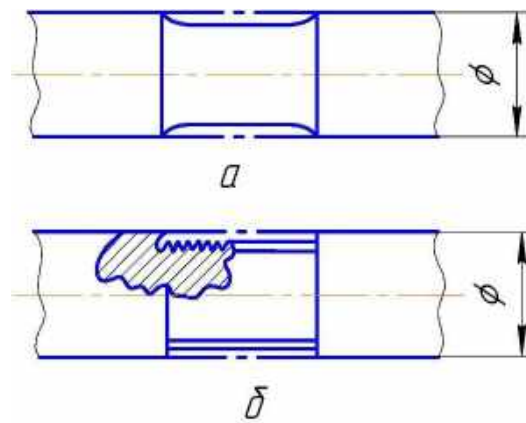


Рис. 3.2. Перехід від напильної поверхні до ненапильної:
а – за струминно-абразивного оброблення; б – за нарізання рваної різі

Наносячи покриття, що доходить до кінця вала, доцільно залишати на кінці останнього буртик завширшки 5 мм, на який не наносять покриття (рис. 3.3, а), оскільки кінці валів зазвичай зношуються менше [3; 6]. Якщо на кінець обертового вала впливатимуть тиском та ударами, то рекомендують наварити на нього кільце (рис. 3.3, б) або зафрезерувати розташовані по колу канавки клиноподібної форми, напрямлені паралельно осі (рис. 3.3, в). Приварювання кільця здебільшого не спричиняє жолоблення виробу, проте, зварюючи деталі з легованих і високовуглецевих сталей, їх варто нагрівати до температури не менше ніж 200° С. Описані способи оброблення кінців валів захищають відносно крихкі напильні покриття від пошкоджень через удари.

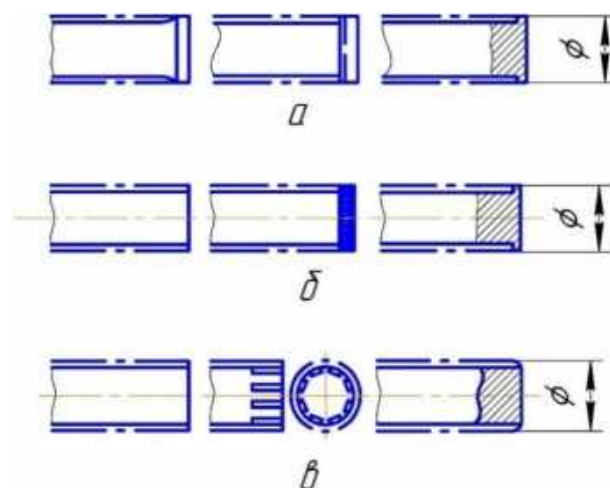


Рис. 3.3. Підготовка поверхні на кінці вала: а – залишено кільце з основного металу; б – приварено кільце; в – профрезеровано канавку клиноподібної форми

Торцеві поверхні тіл обертання рекомендують готувати відповідно до рис. 3.4, конусної частини вала – відповідно до рис. 3.5 [3]. За конусності вала понад 45° покриття, щоб воно краще закріпилося, варто наносити і на циліндричні частини вала.

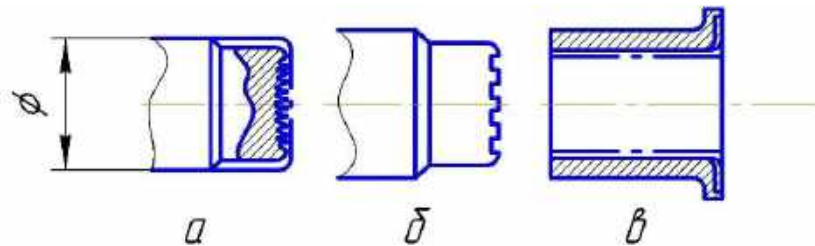


Рис. 3.4. Підготовка в разі нанесення покриття на торцеву поверхню тіла обертання: а – проточування канавок; б – канавки клиноподібної форми; в – канавки клиноподібної форми на підшипниках (кільцеподібні пази й канавки)

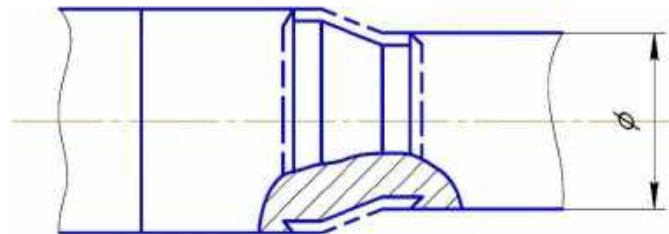


Рис. 3.5. Підготовка до напилювання конусної частини вала

Якщо зношеність тіла обертання неоднакова по довжині деталі й інтенсивна по глибині, рекомендують підготовку, як на рис. 3.6 [18], попередньо перевіривши запас міцності деталі після зменшення діаметра тіла в результаті додаткового оброблення.

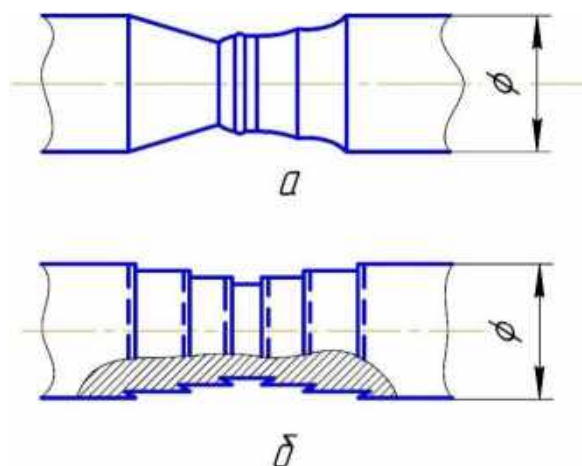


Рис. 3.6. Підготовка до напилювання валів із нерівномірним по довжині зношенням: а – зношена поверхня вала; б – підготовлена до напилювання поверхня

Якщо будуть напилювати лише кінцеві ділянки циліндричних деталей, їх готують відповідно до рис. 3.7 [3].

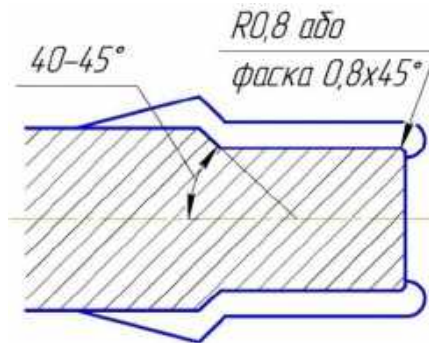


Рис. 3.7. Підготовка кінцевої ділянки вала до напилювання

Токарне оброблення зовнішніх поверхонь під час їх підготовки до напилювання виконують у певній послідовності (рис. 3.8) [3]. Для утворення замикальних буртиків проточують канавки за допомогою відрізного різця, різальна кромка якого має ширину 1,5...2.0 мм. Глибина канавки повинна дорівнювати товщині потрібного покриття або бути трохи більшою, щоб враховувати глибину рваної різі або кільцевих канавок.

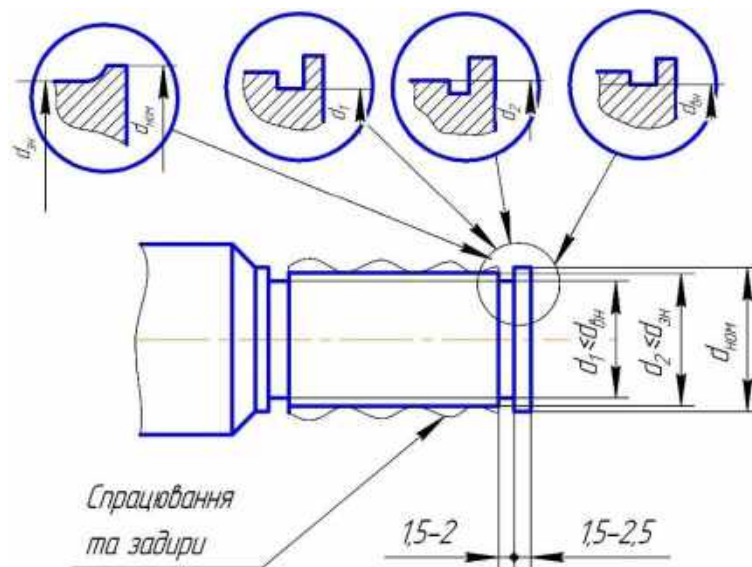


Рис. 3.8. Послідовність переходів токарного оброблення під час підготовки до напилювання зовнішніх незагартованих поверхонь:

а – зношена шийка ($d_{ном}$ – номінальний діаметр, $d_{н.зн}$ – діаметр у найбільш зношеному місці); б – проточування канавок для утворення замикальних буртиків (d_1 – внутрішній діаметр канавки); в – усування нерівностей спрацювання та зменшування діаметра шийки до $d_2 \leq d_{зн}$, причому $d_{ном} - d_2 = 1,0 \dots 1,4$ мм; г – нарізання рваної різі або кільцевих канавок з $d_{вн} \geq d_1$

Готуючи вали зі шпонковими канавками (рис. 3.9, а), передбачають закріплювальні пази та насічки [3]. Пази не повинні бути занадто глибокими: оптимальна глибина – 1,5 мм (рис. 3.9, б). Іноколи пази заміняють насічкою зубилом (рис. 3.9, в), що загалом не рекомендують. У шпонкову канавку вставляють клин із сухого, твердого, безсмоляного дерева. Клин має виступати на 1 мм над нанесеним покриттям, його краї мають бути трохи закругленими. Оскільки клин пізніше не буде підтримувати покриття, клин розширюють до зовнішнього боку на $3...5^\circ$ (рис. 3.9, г) або зрізають на ньому напилений шар під кутом $3...5^\circ$ (рис. 3.9, д).

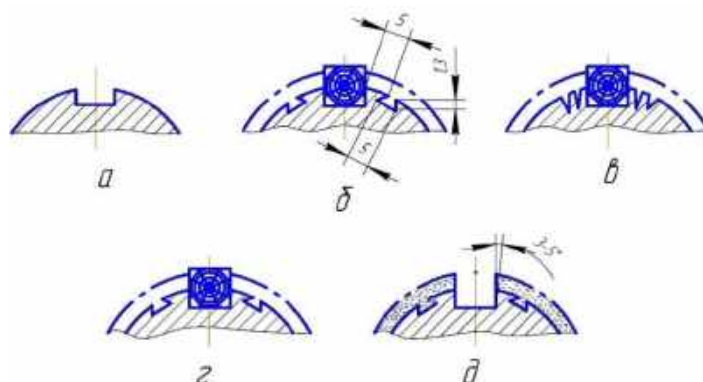


Рис. 3.9. Підготовка тіл обертання: а – зі шпонковою канавкою; б – два пази клиноподібної форми (шпонка зі скосом назовні – клиноподібна); в – насічка різцем; г – закрита шпонка; д – скоси напиленого покриття прямокутної шпонки

Якщо у виробі є пази для змащування, їх обробляють за схемою, як на рис. 3.10 [3].

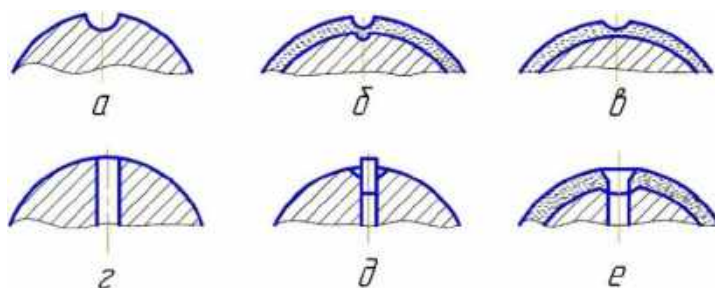


Рис. 3.10. Підготовка поверхонь деталей типу тіл обертання з канавками (а, б, в) й отворами (г, д, е) для змащування: а – невелика канавка для змащування; б – канавка заглиблена і кромки скошені; в – у покритті знову зроблено канавку; г – отвір для змащування; д – отвір роззенковано й закрито пробкою; е – той самий отвір після напилення та видалення пробки

Невеликі пази поглиблюють, кромки зрізають (рис. 3.10, б) або видаляють у процесі оброблення. Пази прорізають у шарі покриття на

глибину, що не перевищує половини товщини напиленого шару (рис. 3.10, в). Отвори для змащування після ретельного знежирення зенкують і забивають свинцевими або дерев'яними пробками, які виступають на 1 мм над поверхнею напиленого шару.

Нарізання рваної різі

Найпоширенішим способом підготовки поверхні деталей типу тіл обертання до нанесення покриттів значної товщини (0,5 мм і більше) є нарізання рваної різі. Цей спосіб забезпечує високу міцність зчеплення в разі зсування покриття з поверхнею деталі (за рахунок механічного зчеплення) [6; 18; 19; 21].

Для нарізання рваної різі використовують звичайний нарізний різець із кутом при вершині 55...60°. Вершина кута повинна мати радіус закруглення 0,3...0,5 мм. Кут різання – 80°. Передній кут різця дорівнює нулю або від'ємний (2...5°). Різець встановлюють у різцетримач з вильотом 100...150 мм. Щоб отримати необхідну шорсткість, різальну кромку різця зміщують нижче від осі деталі (на 1...4 мм залежно від діаметра оброблюваної поверхні). Вібрація різця спричиняє подрібнення металу на оброблюваній поверхні, що призводить до утворення значної шорсткості. Під час нарізання рваної різі діаметр деталі дещо збільшується через видавлювання металу: за глибини рваної різі 0,5 мм та кроку 0,5...0,7 – на 0,2...0,3 мм [6]. Рекомендовано такі значення кроку рваної різі [6]: за діаметра деталі до 20 мм – 0,5 мм; за діаметра 25...50 мм – 0,8...1,0 мм; за діаметра 60...100 мм – 1,5 мм. Під час нарізання не можна використовувати охолоджувальні рідини.

Параметри рваної різі для кожного матеріалу рекомендують підбирати експериментально, щоб правильно визначити розмір деталі та товщину наношеного покриття. Вихід гребінців рваної різі на поверхню покриття знижує працездатність покриття. Окрім того, рвана різь значно знижує циклічну міцність деталей.

Рвану різь нарізають за один прохід. Вона може бути грубої трикутної форми із закругленими вершинами, грубої пилоподібної форми (рис. 3.11) [6] і напівкруглою. На невеликі деталі (діаметром 80 мм) зазвичай наносять дрібну трикутну різь завглибшки 0,6 мм із кроком 0,8 мм. Обробляючи вироби більшого діаметра, різь роблять з більшим шагом і глибиною. Наприклад, за діаметра 250 мм крок має становити 2 мм, глибина – 1,5 мм, водночас доцільно робити пилоподібне нарізання з нахилом ниток у протилежні боки. Різь такого виду рекомендують для підготовки втулок і роз'ємних підшипників.

Після нарізання необхідно проконтролювати профіль рваної різі (рис. 3.12) [3; 6]. Задирки, які з'являються на вершинах профілю рваної різі, видаляють шабером або широким різцем, обертаючи деталь.

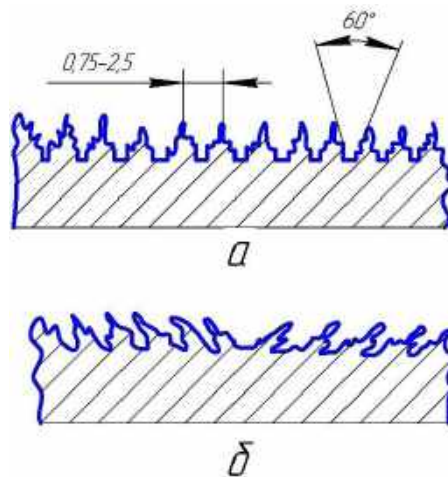


Рис. 3.11. Різні профілі рваної різі: а – пилоподібне нарізання; б – пилоподібне нарізання з нахилом витків у протилежні боки

Деякі матеріали, наприклад нержавійні сталі, нікелеві сплави, важко нарізати, тому після оброблення деталей із цих матеріалів варто ретельно проконтролювати їхні розміри.

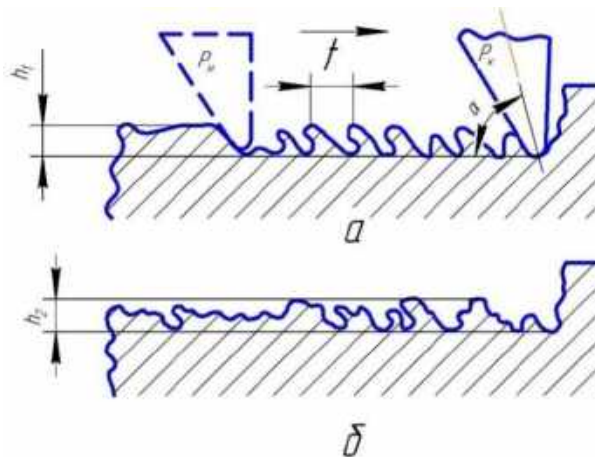


Рис. 3.12. Задовільний і незадовільний профілі рваної різі: а – профіль, що забезпечує якісне зчеплення напиленого шару з основним металом; б – незадовільний профіль, за якого в ізольовані та вузькі впадини напилюваний матеріал потрапляти не буде (P_n і P_k – положення різця на початку та наприкінці оброблення; α – кут нахилу осі різця (у плані) відносно осі деталі (має дорівнювати $70...75^\circ$); t – крок різі; h_1 і h_2 – глибина різі ($0,5...0,8$ мм); стрілкою вказано напрямок руху різця)

Щоб запобігти появі пор біля межі розподілу покриття з підкладкою, рекомендують перед напилюванням виконати струминно-абразивне оброблення нарізки. Напилювання виконують перпендикулярно до поверхні нарізки. Якщо напилюють керамічні покриття, слід нагріти деталь та нанести на неї підшар.

Фрезерування насічки

Нанесення насічки фрезою одночасно з обдуванням абразивами використовують для найкращого закріплення товстих покриттів, напилених на литі вироби, щоб усунути тріщини та інші дефекти. Насічку наносять ручним апаратом у кілька рядів за похилого положення фрези. Канавки і риски, розташовані під кутом у різних напрямках стосовно до напилюваної поверхні, забезпечують достатню міцність зчеплення покриття з основою [6].

Нарізання кільцевих канавок

Готуючи до напилювання конічні поверхні, кільцеві канавки нарізають відрізним різцем з різальною кромкою завширшки 1,2...1,4 мм, кути якого закруглені (радіус 0,3...0,5 мм). Ширина канавок – 1,2...1,4 мм за кроку 1,6...2,0 мм, глибина – 0,7...0,8 мм. На конічних поверхнях зі шпонковими канавками нарізають рвані кільцеві канавки, а на гладких конічних поверхнях – гладкі кільцеві канавки з подальшим накатуванням їхніх вершин. Шорсткості рваних кільцевих канавок можливо досягти, встановивши різець так, як під час нарізання рваної різі. Вершини кільцевих канавок накатують на токарному верстаті за допомогою звичайного пристосовання з накатним роликом, який закріплюють у різцетримачі верстата [3; 18].

Голкофрезерування

Голкофрезерування є методом механічного очищення поверхні металу самозаточним різальним інструментом – голкофрезами, які дають можливість зрізати з оброблюваної поверхні за один прохід шар матеріалу завтовшки 0,02 ...3,0 мм. Під час голкофрезерування не утворюються пил та іскри. Процес технологічний, високопродуктивний, економічний. Голкофрезерування в певних ситуаціях може замінити струминно-абразивне, хімічне та інші види оброблення, воно не забруднює атмосферу й водоймища, є пожежобезпечним.

3.3. Механічні способи оброблення поверхні перед напилюванням без знімання стружки

Похиле сітчасте накатування поверхні

Похиле сітчасте накатування поверхні є одним зі способів підготувати до напилювання зовнішні гладкі циліндричні поверхні незагартованих деталей з матеріалу, твердість якого не перевищує HRC 35. Міцність зчеплення напиленого покриття з основним металом під час випробувань на зсув після похилого сітчастого накатування різко збільшується, досягаючи 100 МН/м². Втомна міцність напилених зразків майже не змінюється. Використовувати накатування з горизонтальною насічкою заборонено, оскільки в напиленому металі можуть з'явитися

тріщини по видавленому рифленню внаслідок появи внутрішніх напружень.

Виконуючи накатування, доцільно переміщати оправку, яка забезпечує одночасний вплив на оброблювану поверхню двох роликів, розташованих в одній площині з двох боків деталі. На роликах фрезерують трикутні зубці із закругленими вершинами та впадинами, розташованими під кутом 30° до осі ролика, напрямленими в одного ролика праворуч, а в другого – ліворуч. Профіль, який утворюється на оброблюваній поверхні накатуванням, показано на рис. 3.13 [6].

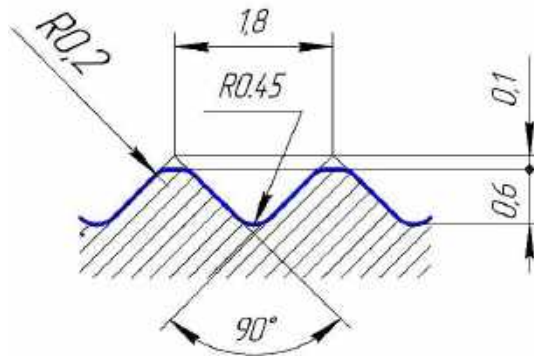


Рис. 3.13. Профіль, який витискає ролик під час похилого сітчастого накатування

Ролики виготовляють зі сталі У10А; після термічного оброблення вони повинні мати твердість НРС 60...62. Кутова швидкість деталі під час накатування становить 3...4 м/хв. Врізання роликів на повну глибину накатуванням потрібно виконувати за 1...2 оберти деталі, не вмикаючи повздовжню подачу, з мінімальним числом обертів шпинделя верстата. Під час накатування поверхню деталі змочують машинним мастилом. Накатування проводять за один прохід з повздовжньою подачею 0,5...1,0 мм/об.

Подколи на поверхні деталі попередньо накатують різь.

Пластичне поверхневе деформування

Методи поверхневого пластичного деформування: обкатування кульками, роликами, вигладжування, вібраційне накатування – дають змогу за мінімальних витрат різко підвищити втомну міцність, зносостійкість і контактну витривалість деталей та збільшити ресурс роботи машини. Унаслідок такого оброблення в поверхневих шарах виникають стискувальні напруження. Для кожного конкретного випадку оброблення деталей підбирають найбільш прийнятний метод.

Комбіноване механічне оброблення

Перед напиленням затовстих покриттів (декілька міліметрів) для того, щоб забезпечити високу міцність їх зчеплення з поверхнею деталей,

на останніх нарізають напівкруглу різь (рис. 3.14, а) [6]. Інколи різець встановлюють з великим вильотом і нижче від центра деталі. Після нарізання витки різі накатують ролик, щоб пластично здеформувати їхні зовнішні шари (рис. 3.14, б). Деталі з твердих матеріалів інколи додатково потрібно струминно-абразивно обробити. Перші проходи під час газодинамічного напилювання виконують під кутом 45° до напилюваної поверхні, що гарантує заповнення канавок матеріалом.

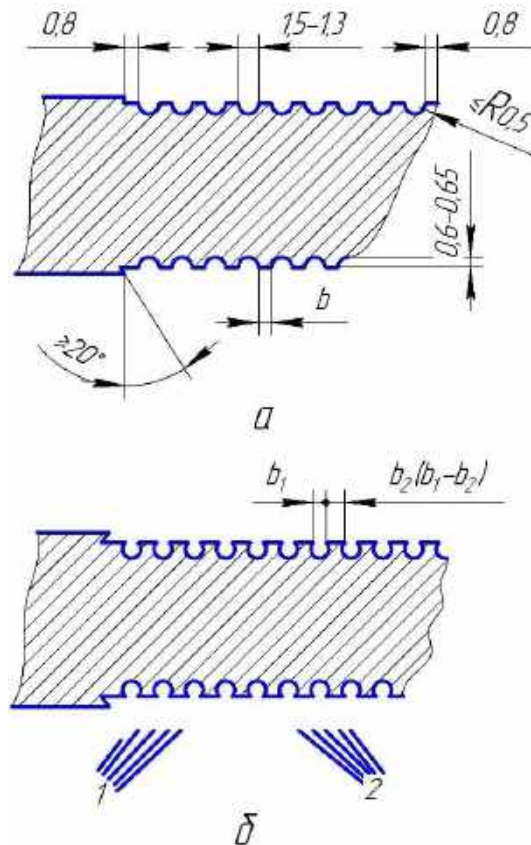


Рис. 3.14. Підготовка до напилювання шийок валів нарізанням напівкруглої різі:
 а – профіль різі після нарізання; б – профіль різі після обкатування та напилення підшарів (для чавуну $b = 0,6 \dots 0,65$ мм, для інших матеріалів $b = 0,4$ мм);
 1 і 2 – послідовні переходи нанесення покриття (підшару)

Оброблення вільними абразивами

Вібраційне оброблення поверхні виробів [9;12; 16; 25] набуває дедалі ширшого застосування. Сутність його полягає в тому, що деталям в абразивному середовищі, які завантажено в контейнер вібраційного пристрою, надають коливальних рухів різної частоти ($1500 \dots 2000 \text{ хв}^{-1}$) й амплітуди ($1,5 \dots 4,0$ мм). Завдяки цьому деталі зазнають керованої вібрації, що забезпечує їх інтенсивне переміщення в абразивному середовищі за складною траєкторією навколо горизонтальної та вертикальної осей установки. Унаслідок цього відбувається інтенсивне знімання металу й полірування поверхні деталей.

Як робоче середовище використовують: сухий наповнювач (бій абразиву або інших твердих матеріалів); сухий наповнювач з хімічно-активними та мийними розчинами (зокрема за безперервної циркуляції розчину); хімічно-активний розчин (віброхімічне оброблення).

Вібраційні контейнери можна заповнити більш раціонально порівняно з іншими, наприклад галтувальними пристроями (до 85% об'єму), їхня продуктивність у 10 разів вища. Цей метод дає змогу одночасно обробляти зовнішні та внутрішні поверхні деталей, причому навіть тонкостінні та крихкі деталі, як правило, не можливо пошкодити. Процес легко регулювати й контролювати. Вібраційні пристрої можна струювати в механізовані та автоматизовані лінії.

Для оброблення легкодеформовних та дрібних деталей використовують абразивні частинки діаметром до 3 мм, водночас застосовуючи вібропідсилювачі. Щоб знизити шаржування поверхонь деталей абразивом, збільшують кількість розчину. Оптимальне співвідношення робочого середовища деталей (за насипним об'ємом) змінюється залежно від призначення оброблення від 1:1 до 5:1.

Поверхні деталей, які треба віброобробити, очищують від різних забруднень, оксидів; крім того, їм забезпечують підвищену активність, що дає змогу наносити на поверхню виробу тонкі покриття з металів та інших матеріалів, які мають спеціальні властивості (антикорозійні, антифрикційні тощо). На практиці використовують нанесення вібраційним методом тонкого шару цинку, кадмію, міді та інших металів.

Віброхімічне оброблення забезпечує вибіркове знімання металу з точністю до 1 мкм. Цей метод використовують для підготовки деталей, які мають складну поверхню із закритими порожнинами. Віброхімічне оброблення дає змогу знімати задирки та облой, шліфувати й полірувати, видаляти окалину та продукти кородування.

Ультразвукове оброблення використовують для того, щоб посилити видалення задирок та інших поверхневих дефектів. Зазвичай очищування проводять одночасно зі зміцнюванням. Ультразвукове оброблення поверхні виконують в гідроабразивному середовищі (10...15 % маси робочої рідини). Абразивні частинки, які змушує рухатися ультразвук, інтенсивно знімають задирки, притуплюють гострі кромки деталей та зміцнюють поверхневі шари металу [9].

Під час роботи ультразвукового перетворювача виникають гідродинамічні потоки, які приводять абразивні частинки у зважений стан. Використання механічної мішалки або пристрою з ультразвуковим випромінювачем, що хитається, забезпечує більш рівномірне перемішування абразиву в розчині. Ультразвукове оброблення посилює твердість оброблюваної поверхні на 1-2 класи.

3.4. Струминно-абразивне оброблення

Для того щоб активувати напилювані поверхні й надати їм потрібної шорсткості, найчастіше використовують струминно-абразивне оброблення. Залежно від джерела енергії, що приводить у рух зерна абразиву, розрізняють абразивно-пневматичний, абразивно-центробіжний та абразивно-гравітаційний способи очищування поверхні. Крім того, у промисловості використовують комбіновані методи очищування, наприклад, абразивно-пневморідинний, абразивно-пневноцентробіжний та ін. Поширеними є також абразивно-пневматичний та абразивно-центробіжний, відомі як дробоструминний та дробометний способи очищування [20].

Одним із найбільш продуктивних та економічних способів очищування деталей складної форми з усіх матеріалів, які використовують у машинобудуванні, є абразивно-пневматичний [10; 11; 22–24; 26]. Очищена цим методом поверхня не зазнає кородування, як у разі застосування рідинного енергоносія. Як абразив можна використати будь-який із тих, що його випускає промисловість.

Для очищення литих деталей простої форми та деяких видів листових деталей використовують абразивно-центробіжний спосіб оброблення, перевагами якого є низькі енерго- та трудомісткість.

Абразивно-гравітаційний спосіб ґрунтується на використанні енергії вільного падіння на оброблювану поверхню частинок абразиву, попередньо піднятих на певну висоту. Рух абразиву прискорюють струменем стиснутого повітря або сумішшю повітря з абразивом. Метод набув значного поширення через невелику кінетичну енергію, якої надають абразиву, та недостатню гнучкість керування струминним апаратом.

Найбільш універсальним і перспективним з розглянутих видів струминно-абразивного очищування поверхні металу є абразивно-пневматичний.

Технологія струминно-абразивного оброблення

Параметри технологічного процесу очищування поверхні металічним піском залежать від фізико-механічних властивостей абразиву, параметрів носія абразиву (тиску стиснутого повітря, швидкості його витікання із сопла, дистанції від сопла до оброблюваної поверхні, кута атаки), а також від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу [18].

Контактуючи з оброблюваною поверхнею, не всі абразивні зерна виконують однакову роботу. Одна частина зерен, врізаючись у метал, знімає стружку; друга частина, яка має глибину врізання меншу, ніж радіус округлення різальної кромки, дряпає поверхню, не знімаючи стружки; третя частина зерен, контактуючи з металевою поверхнею, витискає метал урізнобіч.

Унаслідок впливу абразивних зерен на оброблювану поверхню утворюється новий мікрорельєф із пластично-здеформованим шаром. Через пружне та пластичне деформування, збільшення концентрації дефектів, руйнування мікрооб'ємів та виникнення залишкових напружень у поверхневому шарі металу відбувається змінювання фізико-механічних властивостей (мікроструктури, мікротвердості тощо). Тому процес руйнування зміненого поверхневого шару металу відрізняється від процесу руйнування цими ж абразивними зернами вихідного матеріалу. Кількісна характеристика змін непостійна і залежить від форми, твердості, густини, розміру абразивних зерен, кута атаки та швидкості абразивних зерен, характеру їхнього руху в момент контактування з оброблюваною поверхнею, вихідних фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу та активного носія абразиву. Унаслідок струминно-абразивного оброблення також відбувається змінювання мікроструктури та нагрівання шару металу, який прилягає до місця удару. Нагрівання викликає молекулярну взаємодію (притягання та схоплювання) металу й абразивних зерен, через що можуть змінюватись вид та інтенсивність руйнування. У процесі струминно-абразивного оброблення поверхні металу можлива поява наклепу, тобто утворення zdeформованого зміцненого шару на глибину 0,2...0,4 мм і більше [22].

Глибина наклепаного шару залежить від зернистості абразивного матеріалу, кута атаки струменя абразиву та часу впливу. Через наклеп підвищується енергетичний рівень і дифузійна проникність матеріалу, знижується його електро- та теплопровідність. Наклеп спричиняє структурно-нестійкий стан металу, який буває різним та характеризується неоднорідним розподіленням внутрішніх напружень між окремими зернами й навіть цілими ділянками металу. Наклеп знімають нагріванням до температури рекристалізації (приблизно дорівнює $0,4T_{пл.абс}$, $T_{пл.абс}$ – абсолютна температура плавлення металу) [6].

За подальшого мікроударного впливу абразивних частинок на наклепану поверхню виникає явище «перенаклепу», спричинене нездатністю кристалічної ґратки до подальшого зміцнювання. Метал розрихлюється, з'являються тріщини, спостерігається відшарування тощо. Перенаклеп – явище незворотне, тому його необхідно уникати [18].

Одним із чинників, що впливає на параметри процесу очищування, є концентрація повітряно-абразивної суміші, тобто відношення маси повітря, що проходить через сопло за одиницю часу, до маси абразиву, що його викидає сопло за той самий період. Концентрація абразивної суміші залежить від зернистості та марки абразиву, її значення може коливатись у межах 0,8...4,0 кг*кг⁻¹. Найбільше питоме знімання металу відбувається за високих концентрацій абразиву в струмені. Проте велика насиченість абразивного потоку зумовлює часткове стикання зерен у струмені до удару з очищуваною поверхнею і, як наслідок, збільшує ступінь зношеності

абразиву, що необхідно враховувати, якщо використовують дорогі абразиви.

Кут атаки струменя абразиву (кут між віссю струменя абразиву і площиною очищення) може коливатись від 30 до 90°. Для очищення поверхні м'яких матеріалів рекомендують обирати менші значення кута, а для більш твердих – більші. Треба враховувати, що зі збільшенням кута атаки зростає товщина наклепу поверхневого шару очищуваної поверхні, що досягає найбільшого значення за однакових параметрів і значень кута атаки, близьких до 90° [18; 20].

Оптимальна відстань від сопла до оброблюваної поверхні становить 150...250 мм. Більші значення рекомендують для м'яких поверхонь, менші – для більш твердих. Тиск повітря – 0,3...0,6 МПа [20].

Абразивні матеріали мають задовольняти такі вимоги [6]:

1) геометричні параметри та фізико-механічні властивості абразивних зерен повинні відповідати матеріалу очищуваної поверхні та задовольняти вимоги, які висувають до цієї поверхні;

2) абразив має забезпечувати високу продуктивність процесу за достатньо високої зносостійкості.

Абразивні матеріали поділяють на чотири групи:

1) металеві – дріб литий (марки ДЧЛ, ДСЛ) або колотий (марки ДЧК, ДСК) з різних матеріалів (чавун, сталь); дріб рублений (марки ДСР) з дроту та відходів листового вальцювання; стружка (мідна, алюмінієва, латунна);

2) штучні – скляні кульки, карбід кремнію (карборунд), оксид алюмінію (електрокорунд), дроблений шлак;

3) мінеральні – дроблений граніт та інші;

4) органічні – дроблена шкаралупа горіхів, тирса дерев твердих порід, дроблені кісточки абрикоса, вишні.

У промисловості найпоширенішими є матеріали першої і другої груп. Матеріали четвертої групи, що мають твердість меншу, ніж оброблюваний матеріал, використовують тоді, коли потрібно обробити поверхню, не змінюючи її геометричних розмірів.

Різальні властивості абразиву залежать також від геометричної форми зерен. Форма абразивного зерна зумовлена його макро- та мікроструктурою. Макрогеометрія характеризується числом гострих кутів і виступів, а мікрогеометрія – ступенем їхньої гостроти.

Параметри технологічного процесу, пов'язані з геометричною формою зерен, доцільно враховувати, вибираючи абразив для конкретного випадку. Найбільш раціональною формою абразивного зерна, що забезпечує його максимальну працездатність, є ізометрична або близька до неї. Абразивні зерна ізометричної форми доцільно використовувати для струминного оброблення поверхонь із високою твердістю за великих ударних навантажень, тобто коли енергія удару наближається до енергії розколювання зерен. За менших ударних навантажень, коли обробляють поверхні з невисокою твердістю,

використовують абразивні зерна інших форм та особливо з вираженою несиметричністю. Дрібні абразивні зерна мають гостріші кути, ніж великі. Зі зменшенням кутів і радіусів округлення граней зерен абразиву зменшується розмір мікростружки, яку знімають з оброблюваної поверхні. Вибираючи абразивний матеріал, треба враховувати стан оброблюваної поверхні та її задану частоту.

Інтенсивність зношування зерен залежить від властивостей абразиву та оброблюваної поверхні. Термін служби абразиву прямо залежить від міцності його зерен на згинання. Найбільшу зносостійкість має абразив зі сталевого рубленого дроту: він витримує до 5000 циклів. Менш стійкі до зношування абразивні зерна типу ДЧЛ і дріб ДЧК, який отримують дробленням, – такий абразив руйнується ще швидше і після 150 циклів стає непридатним для подальшого використання. Абразив із електрокорунду можна використовувати до 30 разів [6].

Металевий абразив не повинен мати слідів іржі. Металевий дріб рекомендовано для оброблення матеріалів із твердістю до HRC 50 (найкраще до HRC 40). Не рекомендують використовувати металевий дріб для підготовки поверхні до напилювання жаростійких та корозійностійких покриттів, а також для деталей, виготовлених з міді, мідних сплавів та інших матеріалів із високою в'язкістю. Чавунний та сталевий абразиви непридатні для очищування поверхонь із алюмінію і магнієвих сплавів: у процесі оброблення найменші частинки абразиву можуть заглиблюватися в очищувану поверхню.

Шорсткість поверхні після оброблення залежить від матеріалу деталі й товщини покриття (табл. 3.1) [18].

Таблиця 3.1

Залежність шорсткості поверхні для напилювання
від необхідної товщини покриття

Товщина покриття, мкм		Мікрорельєф підготовленої поверхні, мкм	
цинкового	алюмінієвого	Ra	Rz
80–120	–	6–8	20–30
200	120	10–12	40–50
>200	300	>25	80–100

Ділянки поверхні деталі, які не будуть напилювати, слід захистити від впливу струминно-абразивного оброблення екранами або іншим пристосованням. Зона оброблення має бути на 5 ± 2 мм більшою від зони напилювання. За товщини стінки деталі 0,5 мм і менше необхідно використовувати спеціальне пристосовання й дотримуватись заходів, що виключають надмірне знімання матеріалу деталі та її жолоблення. Після дробоструминного оброблення деталей обдувають стисненим повітрям для того, щоб видалити частинки абразиву з поверхні.

Допустимий проміжок часу між відновленням поверхні та напилюванням залежить від умов виконання роботи та не має перевищувати 6 год у закритих приміщеннях (бажано проводити операцію напилювання протягом перших двох годин), 3 год надворі в суху погоду і 30 хв надворі у вологу погоду [20] для того, щоб запобігти послабленню міцності зчеплення покриття з виробом. Неприпустимо, щоб на підготовлену поверхню потрапляла волога або щоб на ній утворювався конденсат.

Залежність витрати абразиву від діаметра проточної частини сопла показано в табл. 3.2 [18]. Рекомендовані режими струминно-абразивного оброблення порошком електрокорунду на механізованих дільницях наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.2

Залежність витрати металевого дробу від умов струминно-абразивного оброблення [19]

Тиск повітря в магістралі, МПа	Діаметр сопла, мм				
	4	10	12	16	20
0,6	180	220	250	350	580
	240	380	560	700	850
0,5	140	180	230	310	460
	180	260	330	450	560
0,4	120	160	210	280	420
	150	210	280	380	480

Таблиця 3.3

Рекомендовані режими струминно-абразивного оброблення порошком електрокорунду

Параметр	Значення
Тиск стиснутого повітря, МПа	0,4...0,6
Кут атаки струменя, град	60...90
Дистанція від зрізу сопла пістолета до поверхні виробу, мм	100...120
Швидкість обертання деталей, м/хв	
– сталевих (HRC > 40);	6...8
– сталевих (HRC < 40);	8...10
– алюмінієвих	10...12
Подача, мм/об	4...6
Витрата абразиву, кг/год	3...5
Кількість проходів	2

3.5. Ізолювання поверхонь, які не потребують напилювання

Поверхні, які не треба напилювати, слід захистити від потрапляння на них напилюваного матеріалу. Для цього частини деталей обгортають картоном або азбестом, який закріплюють дротом. Використовують також металеві екрани. Шпонкові канавки та отвори для змащування закупорюють дерев'яними пробками, що виступають над рівнем поверхні покриття. Якщо за технологією передбачено струминно-абразивне оброблення, поверхні перед обробленням ізолюють. Інакше можна пошкодити нарізні отвори, канавки та інші елементи. Абразивні частинки, що потрапили в отвір для мастила, важко видалити, а це може спричинити серйозні пошкодження робочих поверхонь деталі під час експлуатування [18; 20].

За струминно-абразивного оброблення для захисту поверхонь зазвичай використовують металеві екрани (маски) (рис. 3.15 і 3.16) та спеціальні настановні пристрої. Іноді деталі встановлюють у пристроях так, що незахищеними залишаються лише ті поверхні, які потрібно напилити. Якщо треба, використовують додаткові екрани [18].

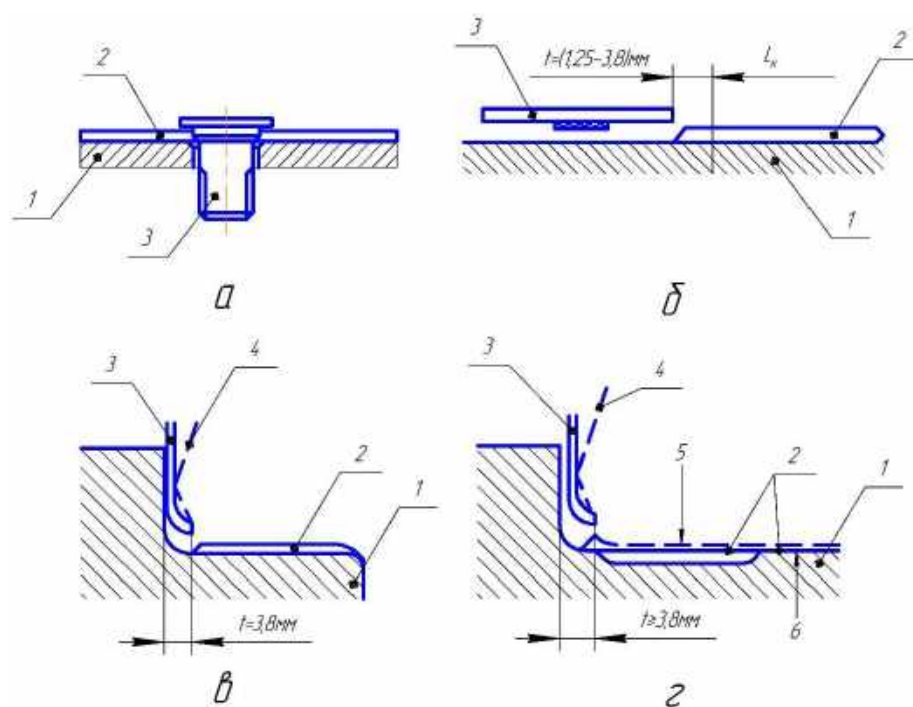


Рис. 3.15. Схеми установлення екранів для заізолювання поверхонь, які не треба напилювати: а – захист отворів екраном (у вигляді грибоподібної заглушки); б – захист частини поверхні плоским екраном; в – захист поверхні, що сполучається плоским екраном із зігнутим краєм; г – те саме з попереднім обробленням напилюваної поверхні; L_k – зона контрольованої товщини покриття; 1 – основний матеріал виробу; 5 – поверхня напиленого покриття; 6 – поверхня обробленого покриття

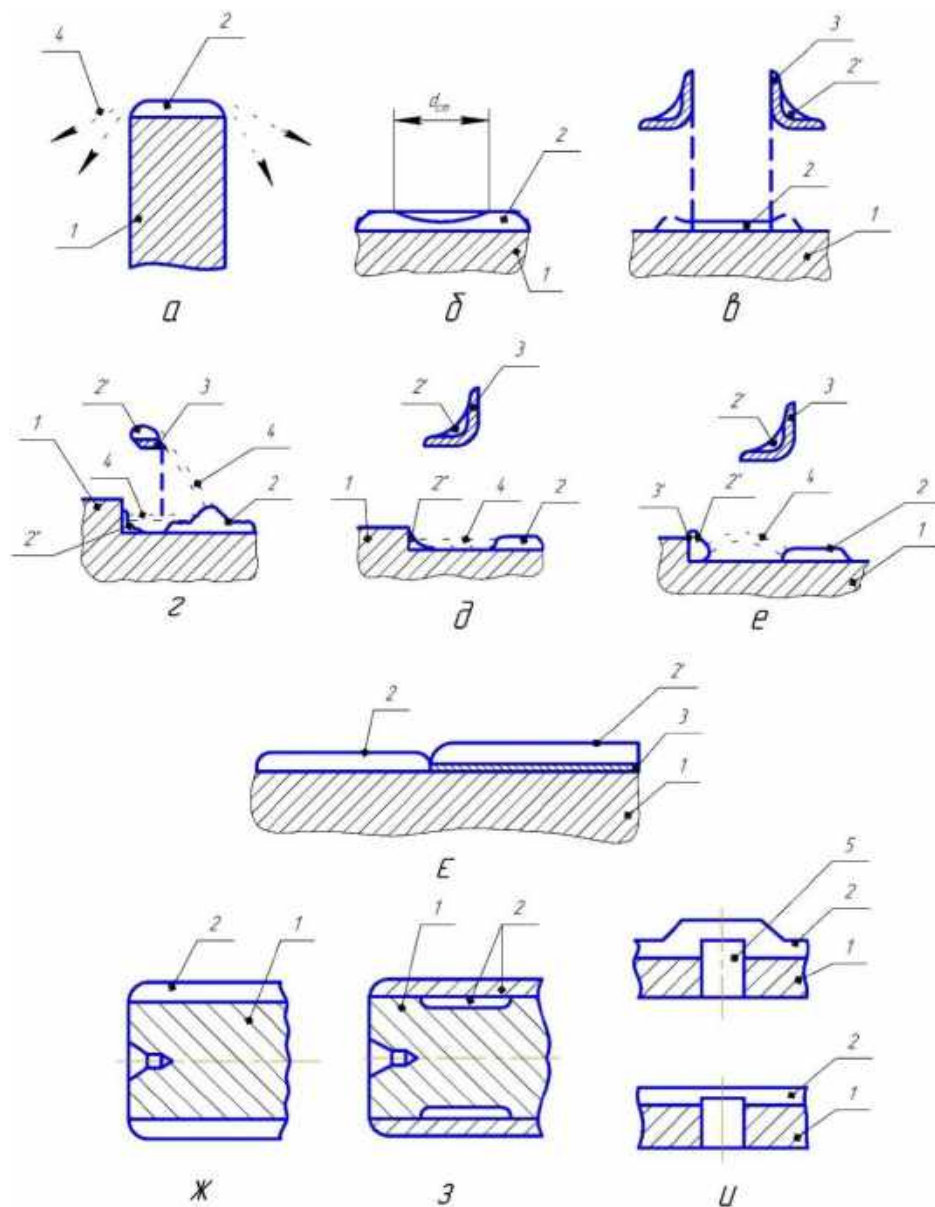


Рис. 3.16. Схеми ізолювання та підготовки поверхонь за газодинамічного напилювання покриттів: а – формування покриттів на торцевій поверхні невеликого розміру; б – покриття, сформоване на нерухомій поверхні; в – те саме в разі використання екрана з відігнутими краями; г – формування покриття під час використання плоского екрана; д – формування покриття під час використання плоского екрана з відігнутим краєм; е – те саме з використанням додаткового екрана; є – захист циліндричних поверхонь за допомогою екранів-втулок; ж – покриття на кінцевій частині вала; з – те саме з використанням попередніх проточок для покриття; и – захист отворів пробками; 1 – основний матеріал виробу; 2 – покриття; 2' – покриття, що утворилося на захисному екрані; 2'' – покриття, що утворилося на виробі із закріплених частинок; 3 – екран; 3' – додатковий екран для захисту від відбитих частинок; 4 – траєкторія напилюваних частинок порошку; 5 – екранівна пробка

Недолік металевих екранів у тому, що під час струминно-абразивного оброблення вони швидко руйнуються. Тому для захисту поверхонь там, де можливо, необхідно використовувати гуму. Іноді доцільно створювати цілі пристрої з гумових деталей. Якщо допустимо, можна використовувати гумову стрічку. Для заізолювання поверхонь застосовують також спеціальну клейку стрічку або спеціальну водорозчинну масу, яку наносять на поверхню щіткою.

Щоб отримати рівномірні за товщиною покриття на невеликих ділянках поверхні, використовують спеціальні екрани з відігнутими назустріч руху потоку напилюваних частинок внутрішніми краями, які встановлюють на відстані не більше від 50 мм від поверхні напилення.

Використання плоских екранів спричинює формування нерівностей на зовнішній поверхні покриття, це пов'язане з відбиванням частинок від торця екрана (рис. 3.16, б) [18]. Відбивання частинок від сформованого в процесі напилювання шару спричинює відкладання порошку на прилеглому уступі (рис. 3.16, в). Якщо не бажано, щоб на уступі утворювалося відкладення, уступ захищають спеціальним екраном (рис. 3.16, г). Під час напилювання окремих ділянок поверхні часто суміжні ділянки захищають за допомогою накладних масок із тонкого металу (рис. 3.16, е).

Як маски для зовнішніх циліндричних поверхонь можуть використовувати тонкостінні втулки. Ефект відбивання напилюваних частинок від тонких накладок незначний, і перемички між покриттям на напилюваній поверхні та покриттям із зовнішньої поверхні накладки не утворюються.

Запитання для самоперевірки

1. З якою метою виконують підготовку поверхні перед напилюванням?
2. Які вимоги ставлять до виробів, підготовлених до напилювання покриттів?
3. На що впливає спосіб підготовки поверхні перед напилюванням?
4. Назвіть основні методи очищення та миття деталей.
5. Назвіть та стисло охарактеризуйте механічні способи оброблення поверхні перед напилюванням без знімання стружки.

4. МЕТОДИКА РОЗРАХУВАННЯ ТОВЩИНИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ

4.1. Загальні рекомендації щодо механічного оброблення газодинамічних покриттів

Технологія розмірного оброблення захисних і відновлювальних покриттів та кількість переходів залежить від співвідношення допусків на розміри заготовки $\delta'_{\text{заг}}$, деталі з покриттям $\delta_{\text{дет}}$ і покриття $\delta_{\text{п}}$. Можливі три випадки [10]:

- 1) $\delta'_{\text{заг}} > \delta_{\text{дет}}$ – за будь-яких значень $\delta_{\text{п}}$ покриття треба розмірно обробити;
- 2) $\delta'_{\text{заг}} = \delta_{\text{дет}}$ – покриття також треба розмірно обробити;
- 3) $\delta'_{\text{заг}} < \delta_{\text{дет}}$ – за $\delta_{\text{дет}} - \delta'_{\text{заг}} \geq \delta_{\text{п}}$ немає потреби розмірно обробляти покриття за умови, що в процесі напилювання не відбувається короблення деталі (окрім спеціальних вимог); якщо $\delta_{\text{дет}} - \delta'_{\text{заг}} \leq \delta_{\text{п}}$, покриття треба розмірно обробити.

Для того щоб вибрати оптимальне співвідношення міжперехідних розмірів під час виготовлення деталей з покриттями, слід здійснити техніко-економічний аналіз. Якщо наносять захисні шари з дорогих матеріалів за значних витрат на їх нанесення, економічніше зменшити поля допуску $\delta'_{\text{заг}}$, що збільшує витрати на попереднє оброблення заготовки.

Особливості оброблення напилених покриттів різальним інструментом зумовлені такими чинниками [10]:

1) у разі оброблення деталі з покриттям виникає більш складний, ніж у разі оброблення однорідного матеріалу, напружено-деформований стан, пов'язаний з особливостями структури напилених покриттів, наявністю перехідної зони між покриттям та основним матеріалом, а також із виникненням термічних напружень через різні коефіцієнти термічного розширення покриття й основного матеріалу;

2) різні теплофізичні властивості матеріалу покриття й основи створюють більш складну картину поширення теплових потоків;

3) природа фізико-хімічних явищ у зоні контактування інструмента й оброблюваного покриття пов'язана з особливостями шаруватої будови матеріалу покриття та його структури (наявність оксидних включень, слабкість зв'язків між частинками), відрізняється від такої в разі оброблення щільних однорідних матеріалів.

Вибираючи метод і режими оброблення покриттів різанням, важливо оцінити можливий їхній вплив не лише на властивості матеріалу покриття й поверхневих шарів основи, але й на міцність зчеплення покриття з основою.

Специфіка оброблення газодинамічних покриттів різанням зумовлена їхньою структурою. Частинки слід зрізати, не вириваючи їх із покриття; також потрібно виключити пошкодження (подряпування) оброблюваної поверхні відірваними частинками. Оцінюючи шорсткість обробленої поверхні, враховують вплив пористості покриття. Трапляються випадки, коли на базовій довжині, на якій контролюють шорсткість поверхні, є декілька пор. Це впливає на оцінювання параметрів шорсткості обробленої поверхні. Подеколи треба спеціально обробляти покриття, щоб усунути пори.

4.2. Розрахункові формули для визначення операційних розмірів і товщини покриттів

Мінімальну товщину наношеного покриття $T_{п.мін}$ зумовлюють такі чинники [23]:

1. Мінімальна робоча товщина покриття $t_{п.мін}$, яку отримують на останньому переході його оброблення. Її, своєю чергою, визначають такі параметри:

а) товщина шару покриття $t_{п.н}$, достатня й необхідна, щоб виріб нормально функціонував, а також щоб можна було відновити покриття й відремонтувати виріб. За великих механічних навантажень значення $t_{п.н}$ розраховують або визначають емпірично так, щоб виключити механічні пошкодження, які порушують щільність покриття або поверхневих шарів основи, а також деформування основи з покриттям, що перевищує допустиме.

Наприклад, в умовах тертя утворення задирок призведе до того, що доведеться знімати пошкоджений шар основи й збільшувати товщину покриття, яке повторно наносять. Якщо покриття наносять, щоб надати захищеній поверхні однієї або кількох спеціальних властивостей (наприклад, діелектричної міцності та зносостійкості), то товщина шару $t_{п.н}$ має задовольняти необхідні вимоги;

б) товщина шару покриття на зношення $t_{п.зн}$, що забезпечує потрібний ресурс роботи виробу. Здебільшого залежність між шляхом тертя L і величиною зношення лінійна. Тоді

$$t_{п.зн} = I_{зн} L, \quad (4.1)$$

де $I_{зн}$ – інтенсивність зношення;

в) висота нерівностей $Rz_{п.н}$, отриманих на останньому переході оброблення покриття (враховують, якщо покриття експлуатують у корозійних середовищах та інших умовах, коли процес руйнування покриття залежить від топографії поверхні);

г) висота хвилястості $W_{п.н}$.

Мінімальну робочу товщину покриття можна розрахувати за формулою [18]

$$t_{n.min} = t_{n.n} + t_{n.зн} + Rz_n + W_n. \quad (4.2)$$

В умовах корозійного впливу зовнішнього середовища термін служби покриття зумовлений мінімальним значенням локальної фактичної товщини, тобто $t_{n.n} + t_{n.к}$. Це ж значення є визначальним тоді, коли будь-яка фізична величина, наприклад діелектрична міцність, залежить від товщини покриття. Через те що найглибші впадини на поверхні покриття можуть бути навпроти нерівностей основного матеріалу, які найбільше виступають, у розрахунках $t_{n.min}$ потрібно завжди враховувати величини W_n і Rz_n .

2. Мінімальний загальний припуск на оброблення покриття

$z_{0.min} = \sum_{i=1}^n z_{i.min}$. Його визначають за методиками, відомими з технології машинобудування [10]. Розрахункова формула для визначення припуску на першій операції оброблення покриття має вигляд

$$z_{i.min} = (Rz_0 + H_0) + |\rho_{заг} + \varepsilon_1|, \quad (4.3)$$

де Rz_0 і H_0 – відповідно, висота мікронерівностей і глибина дефектного шару покриття після напилення;

$\rho_{заг}$ – просторове відхилення розташування поверхні вихідного покриття відносно базових поверхонь заготовки;

ε_1 – похибка встановлення на першій операції оброблення покриття.

Величину $\rho_{заг}$ можна подати як векторну суму

$$\rho_{заг} = \rho'_{заг} + \rho''_{заг}, \quad (4.4)$$

де $\rho'_{заг}$ – просторове відхилення розташування поверхні вихідної заготовки, обробленої для покриття;

$\rho''_{заг}$ – додаткове просторове відхилення розташування поверхні, що виникає в процесі нанесення покриття.

3. Просторове відхилення $\rho'_{заг}$ розташування поверхні розподілу основного матеріалу з покриттям відносно базових поверхонь заготовки з покриттям (у вихідній заготовці).

Щоб запобігти утворенню браку, під час розмірного оброблення газодинамічних покриттів потрібно зменшувати (або збільшувати – для внутрішніх поверхонь) розміри порпередньо оброблених заготовок на величину просторових відхилень і відповідно збільшувати товщину шару покриття [5]. Основними відхиленнями, які враховують у розрахунках товщини покриттів, є неспіввісність шийок ступінчастих валів з лінійними центровими гніздами, неперпендикулярність торцевих поверхонь до осей базових циліндричних поверхонь, вигин заготовок валів та осей, зміщення

осі отворів з покриттями в корпусних деталях у межах допусків на координатні розміри, що виконують на операціях оброблення отворів для покриття й розмірного оброблення покриттів, тощо. Розраховуючи товщину, слід урахувувати так звані неконтрольовані похибки форми, які не було виявлено під час контролю відповідних діаметральних або координувальних розмірів. Такі похибки зумовлені непрямолінійністю осі або твірних, їх не можна визначити практикованими методами контролю діаметральних розмірів.

4. Просторове відхилення ρ_{zag}'' розташування поверхні розподілу основного матеріалу з покриттям відносно базових поверхонь, що утворюється в процесі нанесення покриття.

5. Похибки встановлення ε_n , які з'являються на стадіях розмірного оброблення покриття. Якщо останнє виконують, змінюючи встановлювальні бази, то враховують значення ε_n , що виникає на останній операції розмірного оброблення покриття й остаточно формує нерівномірність покриття за товщиною [6].

6. Товщина перехідного шару Δ між основним металом і матеріалом покриття, який відрізняється хімічним складом, структурою та властивостями від матеріалу покриття. Перехідний шар утворюється або довільно через особливості процесу нанесення покриття (сплавлення, дифузія, утворення інтерметалідних шарів тощо), або цілеспрямовано за допомогою спеціальних технологічних прийомів (нанесення підшарів для забезпечення високої міцності зчеплення, послідовне змінювання складу окремих компонентів покриття для забезпечення поступового змінення коефіцієнта термічного розширення основи та покриття).

Мінімальну товщину покриття, яке наносять, можна визначити за формулою

$$T_{n.\min} = t_{n.\min} + z_{0.\min} + \left| \rho_{zag}' + \rho_{zag}'' + \varepsilon_n \right| + \Delta. \quad (4.5)$$

Міжперехідні розміри на оброблення поверхонь з покриттями й товщина останніх вибирають інтуїтивно, не враховуючи конкретних умов оброблення, точності розмірів заготовки й остаточно обробленої деталі [6]. Зазвичай встановлюють завищені значення припусків на оброблення покриттів, а також їхні товщини. Подеколи за розмірного оброблення недостатньо високі значення цих величин призводять до утворення браку. Проте встановлювати завищені значення припусків на оброблення й товщини покриттів, щоб запобігти браку, також недоцільно, оскільки це збільшує матеріало- та енергомісткість отримання покриттів.

Товщину покриття – поняття, що стосується певної оброблюваної поверхні, вимірюють за нормаллю до цієї поверхні. Коливання розмірів, які отримують на кожному етапі оброблення, визначають зміну товщини покриття. Розрізняють такі можливі значення товщини покриття, яке

потрібно розмірно обробити: номінальна товщина, найбільша можлива товщина, найменша можлива товщина і середня товщина.

Вибрана система відліку товщини покриття повинна задовольняти такі вимоги: об'єктивно враховувати закономірності змінювання товщини покриття на різних стадіях оброблення поверхні деталі; відповідати системі допусків та посадок і теорії розмірних ланцюгів. Цим вимогам відповідає система, у якій за початок відліку прийнято номінальне значення розміру [19]. Побудовані на основі такої системи відліку схеми розмірних зв'язків між операційними розмірами, припусками і допусками на оброблення вала показано на рис. 4.1 [19]. Аналогічну схему для оброблення отвору зображено на рис. 4.2 [19].

Основними параметрами схем є номінальні значення розміру вихідної заготовки $A_{заг}$, операційних розмірів A_i і розміру готової деталі $A_{дет}$. Розмір після оброблення для покриття A_3 також можна розглядати як розмір вихідної заготовки $A_{заг}$ перед нанесенням покриття.

Ці схеми повністю відображають послідовність оброблення поверхонь заготовки, зокрема й етапи попереднього оброблення для покриття, нанесення покриття та їх подальше розмірне оброблення, а також відповідні розмірні зв'язки між окремими переходами оброблення. За допомогою таких схем легко виявити й розрахувати технологічні розмірні ланцюги [19].

Простішу схему для визначення можливих значень товщини покриття на циліндричних зовнішніх поверхнях після розмірного оброблення, яка не враховує маршруту оброблення поверхні перед нанесенням покриття та після нього, наведено на рис. 4.3 [19].

Для оброблення отворів аналогічну схему наведено на рис. 4.4 [19].

На рис. 4.3 показано чотири можливі варіанти розташування шарів покриттів на оброблюваній поверхні, отримані в результаті суміщення мінімальних та максимальних розмірів заготовки, підготовленої до нанесення покриття, і максимальних та мінімальних товщин покриттів. На основі цієї схеми можна встановити всі названі вище значення товщини покриття.

Розрахункові рівняння, отримані в результаті розрахування розмірних ланцюгів, наведених на рис. 4.3 і 4.4, зведено в табл. 4.1. З їх допомогою можна виконати майже всі потрібні розрахунки, зокрема визначити розміри заготовки для покриття за заданого $t_{п.мін}$. Вибираючи величину допуску $\delta''_{заг}$ на розмір заготовки для покриття, враховують співвідношення витрат на оброблення заготовки й нанесення покриття [6]. За розмірного аналізу (див. табл. 4.1) припускають, що під час розмірного оброблення покриття немає похибок встановлення заготовки та просторових відхилень розташування оброблюваної поверхні відносно технологічних баз. Інакше в розмірному аналізі слід зробити відповідні корективи. Послідовність розрахування товщини та операційних розмірів на основі рівнянь, зведених у табл. 4.1, наведено на рис. 4.5 [19].

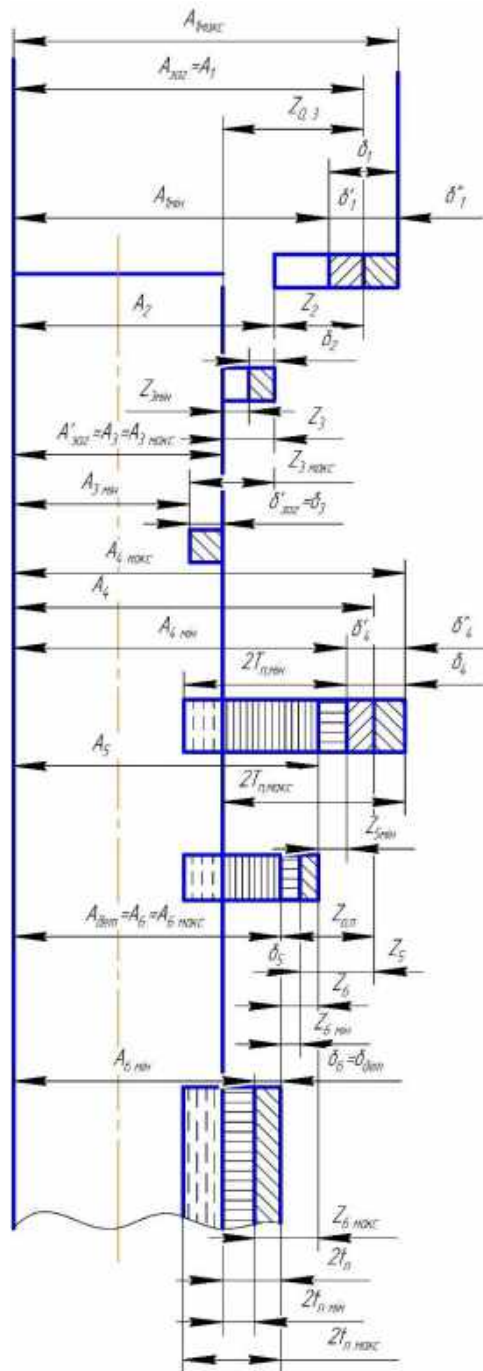


Рис. 4.1. Схема розташування полів операційних припусків і допусків на оброблення вала з покриттям: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ – номінальні значення операційних розмірів, відповідно, заготовки, чорнового та чистового обточування, нанесення покриття, чорнового та чистового шліфування; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$ – допуски на вказані розміри; Z_2, Z_3, Z_5, Z_6 – номінальні значення припусків, відповідно, на чорнове, чистове обточування, чорнове та чистове шліфування покриття; $Z_{0.3}, Z_{0.4}$ – загальний припуск, відповідно, на оброблення заготовки й покриття; t_n – номінальне значення товщини обробленого покриття; δ_{dem} – допуск на розмір деталі; T_n – номінальне значення товщини нанесеного покриття (індекси «макс» і «мін» означають максимальні та мінімальні розміри відповідних величин)

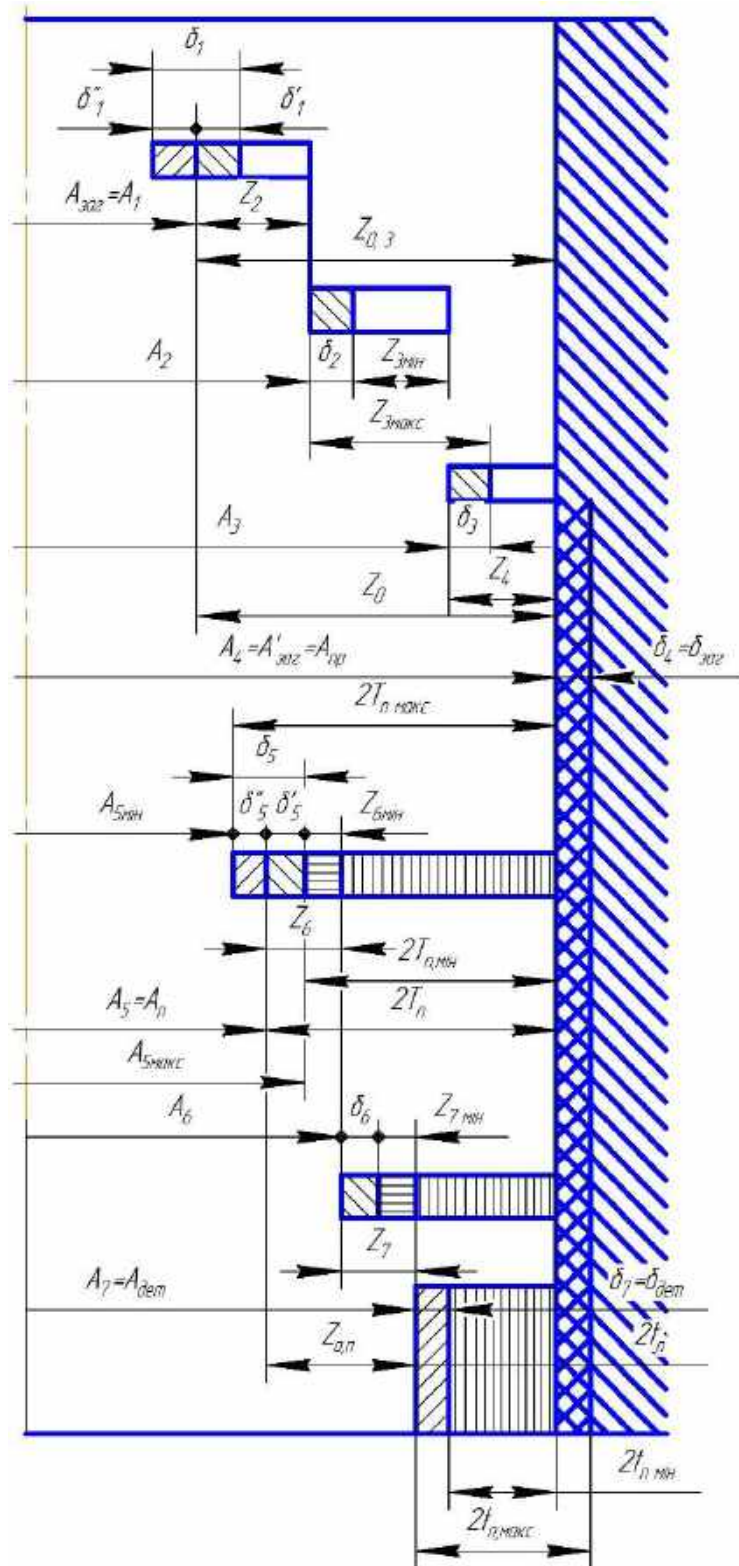


Рис. 4.2. Схема розташування полів операційних припусків і допусків на оброблення отвору з покриттям: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ – номінальні значення операційних розмірів, відповідно, заготівки, чорнового, напівчистового та чистового розточування, нанесення покриття, чорнового та чистового внутрішнього шліфування; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7$ – допуски на вказані розміри; Z_2, Z_3, Z_4, Z_6, Z_7 – номінальні значення припусків на оброблення (інші позначення такі самі, як на рис. 4.1)

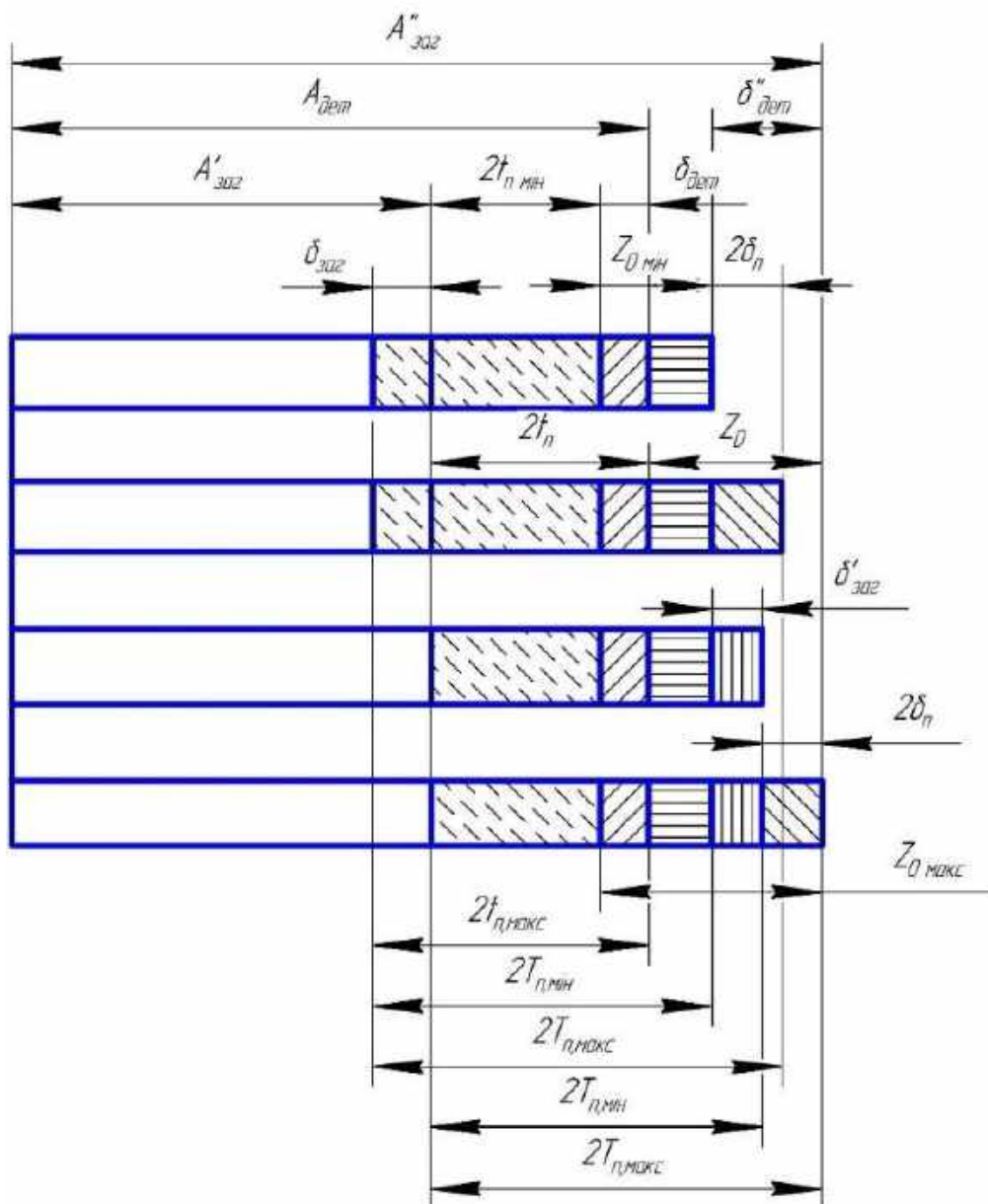


Рис. 4.3. Схема розташування полів газодинамічних покриттів, допусків і припусків на їх оброблення для охоплюваної поверхні:

$A''_{заг}$ – номінальний розмір заготовки з покриттям; δ_n – допуск на товщину напиленого покриття; Z_0 – припуск на оброблення покриття; $\delta''_{заг}$ – допуск на розмір заготовки з напиленим покриттям

Найбільше та найменше значення товщини оброблюваного покриття розраховують і використовують, щоб перевірити відповідність обраного технологічного процесу технологічним вимогам до виготовлення деталі, а також службовому призначенню й умовам експлуатації для забезпечення заданого терміну служби. Ці значення співвідносять із допустимими і за результатами порівняння роблять висновок про прийнятність та якість технологічного процесу. Операційні розміри потрібні, щоб контролювати технологічний процес.

Значення товщини напилених покриттів використовують не лише для міжопераційного контролю, а й для зіставлення із допустимими товщинами покриттів, які отримують обраним методом. Максимальна товщина напилених покриттів має виключати появу надмірно високих залишкових напружень та інше.

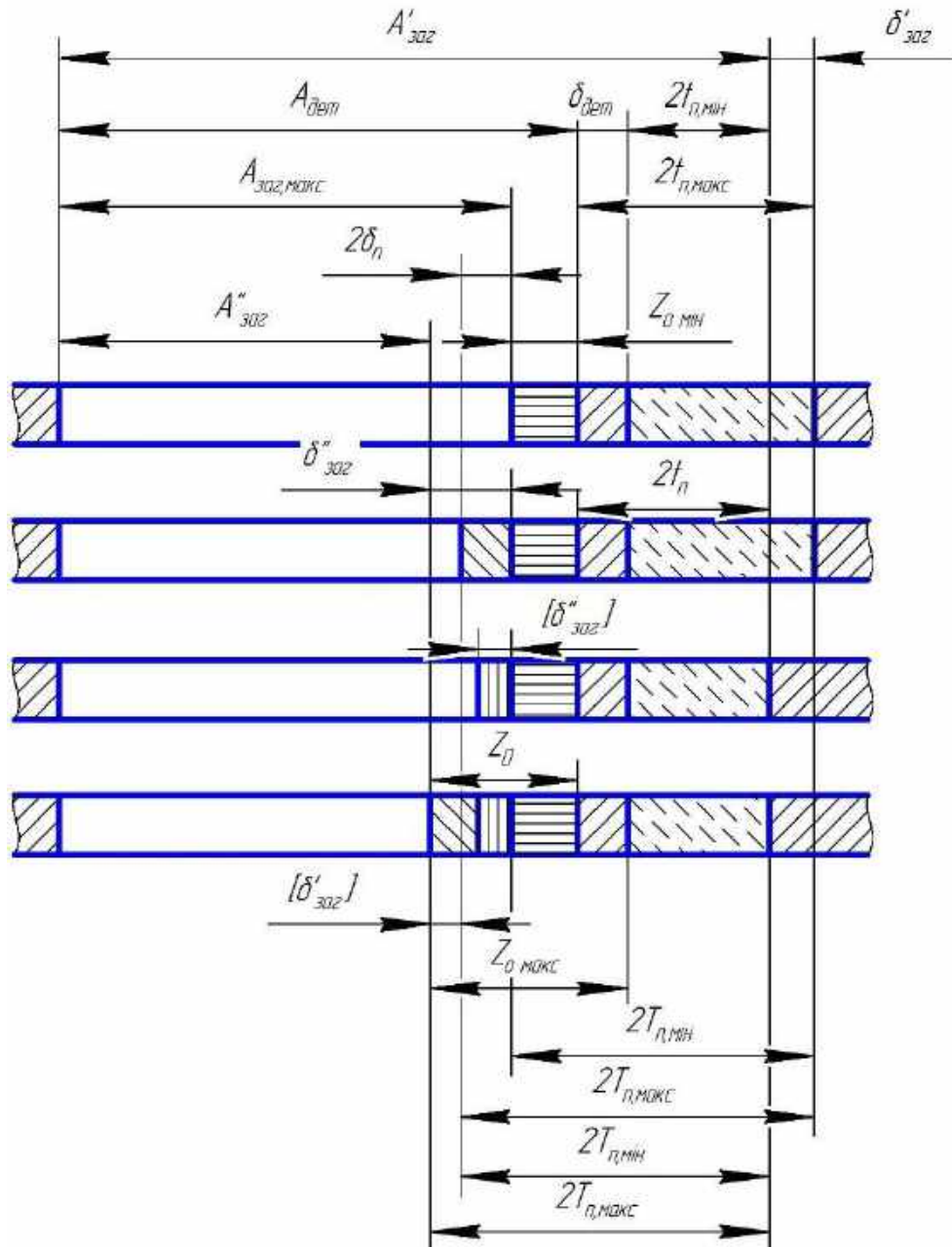


Рис. 4.4. Схема розташування полів газодинамічних покриттів, допусків і припусків на їх оброблення для охоплювальної поверхні (позначення такі самі, як на рис. 4.3)



Рис. 4.5. Алгоритм розрахунку товщини покриттів та операційних розмірів на оброблення поверхонь з покриттями (цифри в колах відповідають позиціям табл. 4.1)

Таблиця 4.1
Розрахункові формули для визначення операційних розмірів і товщини покриттів

Поверхні	
охоплювані	охоплювальні
1. Мінімальна товщина обробленого покриття	
$t_{n.min} = t_n - \delta_{det} / \Phi$	
2. Допуск на товщину обробленого покриття	
$\delta_n' = \left(\delta_{zag}' / \Phi \right) + \delta_{det}$	

3. Максимальна товщина обробленого покриття	
$t_{n.\max} = t_n + \delta'_{\text{заг}} / \Phi$	
4. Номінальна товщина обробленого покриття	
$t_{ni} = (A_{\text{дет}} - A'_{\text{заг}}) / \Phi$	$t_n = (A'_{\text{заг}} - A_{\text{дет}}) / \Phi$
5. Номінальна товщина покриття на переходах розмірного оброблення	
$t_{ni} = (A_i - A'_{\text{заг}}) / \Phi$	$t_{ni} = (A'_{\text{заг}} - A_i) / \Phi$
6. Допуск на розмір заготовки з покриттям	
$\delta''_{\text{заг}} = \delta'_{\text{заг}} + \Phi \delta_n$	
7. Максимальна товщина напиленого покриття	
$T_{n.\max} = t_n + z_0 / \Phi, \text{ або } T_{n.\max} = t_{n.\min} + (z_0 + \delta_{\text{дет}}) / \Phi, \text{ або}$ $T_{n.\max} = t_{n.\min} + z_{0.\max} / \Phi, \text{ або } T_{n.\max} = t_{n.\min} + (z_{0.\min} + \delta_{\text{дет}} + \delta''_{\text{заг}}) / \Phi$ $T_{n.\max} = t_{n.\min} + \delta_n + (z_{0.\min} + \delta_{\text{дет}} + \delta''_{\text{заг}}) / \Phi$	
8. Мінімальна товщина напиленого покриття	
$T_{n.\min} = T_{n.\max} - \delta_n, \text{ або } T_{n.\min} = t_{n.\min} = t_n + z_0 / \Phi - \delta_n, \text{ або}$ $T_{n.\min} = t_{n.\min} + (z_0 + \delta_{\text{дет}}) / \Phi - \delta_n, \text{ або } T_{n.\min} = t_{n.\min} + z_{0.\max} / \Phi - \delta_n$ $T_{n.\min} = t_{n.\min} + (z_{0.\min} + \delta_{\text{дет}} + \delta''_{\text{заг}}) / \Phi - \delta_n, \text{ або}$ $T_{n.\min} = t_{n.\min} + (\delta_{\text{дет}} + z_{0.\min} + \delta'_{\text{заг}}) / \Phi$	
9. Номінальний припуск на оброблення покриття	
$z_0 = z_{0.\min} + \delta''_{\text{заг}}, \text{ або } z_0 = z_{0.\min} + \delta''_{\text{заг}} + \Phi \delta_n$	
10. Максимальний припуск на оброблення покриття	
$z_{0.\min} = z_0 + \delta_{\text{дет}}, \text{ або } z_{0.\max} = z_{0.\min} + \delta''_{\text{заг}} + \Phi \delta_n + \delta_{\text{дет}}$	
11. Номінальний розмір заготовки з напиленим покриттям	
$A''_{\text{заг}} = A'_{\text{заг}} + \Phi T_{n.\max}$	$A''_{\text{заг}} = A'_{\text{заг}} - \Phi T_{n.\max}$

12. Максимальний розмір заготовки з напиленим покриттям	
$A''_{заг.макс} = A''_{заг} = A'_{заг} + \Phi T_{п.макс}$	$A''_{заг.макс} = A''_{заг} + \delta''_{заг}, \text{ або } A''_{заг.макс} = A'_{заг} - \Phi T_{п.макс} + \delta''_{заг}$
13. Мінімальний розмір заготовки з напиленим покриттям	
$A''_{заг.мін} = A''_{заг} - \delta''_{заг}, \text{ або } A''_{заг.мін} = A''_{заг} + \Phi T_{п.макс} - \delta''_{заг} = A'_{заг} + \Phi T_{п.макс} - \Phi \delta_n - \delta''_{заг}$	$A''_{заг.мін} = A''_{заг} = A'_{заг} - \Phi T_{п.макс}, \text{ або } A''_{заг.мін} = A'_{заг} - \Phi t_n - \Phi \delta_n$
14. Середня товщина покриття	
$t_{п.ср} = \frac{t_{п.макс} + t_{п.мін}}{2}, \text{ або } t_{п.ср} = \frac{t_n + (\delta'_{заг} - \delta_{дет})}{2\Phi}$	
<i>Примітка.</i> Φ – фактор форми. За одностороннього розташування покриття $\Phi = 1$; для циліндричних поверхонь і за двостороннього розташування покриття $\Phi = 2$	

Запитання для самоперевірки

1. Що таке мінімальна товщина покриття та які чинники впливають на її значення?
2. Назвіть складові розрахункової формули для визначення мінімальної товщини покриття.
3. Який алгоритм розрахування товщини покриттів та операційних розмірів на оброблення поверхонь з покриттями?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Данько, К. А. Підвищення життєвого циклу деталей авіаційних двигунів технологічними методами : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / Данько Костянтин Анатолійович. – Харків, 2018. – 197 с.
2. Дубовий, О. М. Технологія напилювання покриттів : підручник / О. М. Дубовий, А. М. Степанчук. – Миколаїв : НУК, 2007. – 236 с.
3. Зорік, І. В. Технологія відновлення і ремонту деталей авіаційних двигунів : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / Зорік Ігор Володимирович. – Харків, 2020. – 287 с.
4. Нанесення покриття : навч. посіб. / В. М. Корж, В. Д. Кузнєцов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко ; за ред. К. А. Ющенка. – Київ : Арістей, 2005. – 204 с.
5. Нижник, С. М. Технологія шліфування деталей авіаційних двигунів з урахуванням збільшення активної поверхні абразивного зерна : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / Нижник Сергій Миколайович. – Харків, 2018. – 156 с.
6. Рожков, О. Д. Технологія нанесення покриттів: навч. посіб. Ч.1 / О. Д. Рожков. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2008. – 51 с.
7. Рожков, О. Д. Технологія нанесення покриттів: навч. посіб. Ч.2 / О. Д. Рожков. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2008. – 38 с.
8. Стецько, А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей : монографія / А. Є. Стецько. – Львів : АРС, 2013. – 240 с.
9. Обробка деталей при відновленні і зміцненні: навч. посіб. / Ю. О. Харламов [та ін]. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2007. – 500 с.
10. Champagne, V. K. Jr. Practical Cold Spray / V. K. Jr. Champagne, O. C. Ozdemir, A. Nardi. – Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 441 p.
11. Dual-frequency ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy [Electronic Resource] / X. Chen et al. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – Vol. 40. – P. 433–441. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.07.027. – Viewed on December 3, 2024.
12. Surface Preparation and Thermal Spray in a Single Step: The PROTAL Process—Example of Application for an Aluminum-Base Substrate [Electronic Resource] / C. Coddet et al. // Journal of Thermal Spray Technology. – 1999. – Vol. 8, no. 2. – P. 235–257. – DOI: 10.1361/105996399770350467. – Viewed on December 3, 2024.
13. Davis, J. R. Handbook of Thermal Spray Technology. Materials Park / J. R. Davis. – USA : ASM Intern., 2004. – 338 p.
14. Fauchais, P. L. Thermal Spray Fundamental: From Powder to Part. 2nd ed. / P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, M. I. Boulos. – New York, USA : Springer Science+Business Media, 2021.

15. Experimental research on the influence of ultrasonic vibrations on the laser cladding process of a disc laser [Electronic Resource] / X. Han et al. // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 406. – P. 126750. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126750. – Viewed on December 3, 2024.
16. Kahraman, A. D. Effect of substrate surface preparation on cold sprayed Al-Zn-Al₂O₃ composite coating properties [Electronic Resource] / A. D. Kahraman, F. Kahraman, O. Çulha // Materials Testing. – 2019. – Vol. 61, no. 8. – P. 755–758. – DOI: 10.3139/120.111381. – Viewed on December 3, 2024.
17. Laser Patterning Pretreatment before Thermal Spraying: A Technique to Adapt and Control the Surface Topography to Thermomechanical Loading and Materials [Electronic Resource] / R. Kromer et al. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 25, no. 3. – P. 401–410. – DOI: 10.1007/s11666-015-0352-x. – Viewed on December 3, 2024.
18. Structural modifications induced by ultrasonic vibration during plasma spray deposition Ni coating on Al substrate [Electronic Resource] / Z. Li et al. // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 441. – P. 128600. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128600. – Viewed on December 3, 2024.
19. Surface preparation by using laser cleaning in thermal spray [Electronic Resource] / H. Li et al. // Journal of Laser Applications. – 2008. – Vol. 20, no. 1. – P. 12–21. – DOI: 10.2351/1.2831623. – Viewed on December 3, 2024.
20. Murthy, J. K. Effect of grinding on the erosion behaviour of a WC–Co–Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes [Electronic Resource] / J. K. Murthy, D. Rao, B. Venkataraman // Wear. – 2001. – Vol. 249, iss. 7. – P. 592–600. – DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00682-2. – Viewed on December 3, 2024.
21. Oyinbo, S. T. A comparative review on cold gas dynamic spraying processes and technologies [Electronic Resource] / S. T. Oyinbo, T.-C. Jen // Manufacturing Review. – 2019. – Vol. 6. – P. 25. – DOI: 10.1051/mfreview/2019023. – Viewed on December 3, 2024.
22. Pawlowski, L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition / L. Pawlowski. – England : John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 626 p.
23. High speed grinding characteristics and machinability of WC-10Co-4Cr coatings deposited via high velocity oxygen fuel spraying [Electronic Resource] / Z. Shang et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2018. – Vol. 32, iss. 7. – P. 3283–3290. – DOI: 10.1007/s12206-018-0630-x. – Viewed on December 3, 2024.
24. Effects of 3D Roughness Parameters of Sandblasted Surface on Bond Strength of HVOF Sprayed WC-12Co Coatings [Electronic Resource] / J. Wang et al. // Coatings. – 2022. – Vol. 12, no. 10. – P. 1451. – DOI: 10.3390/coatings12101451. – Viewed on December 3, 2024.

25. Effect of Grit Blasting and Subsequent Cold Spraying on Low-Cycle Fatigue Crack Growth of Q355B Steel [Electronic Resource] / J. Yang et al. // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 32, no. 9. – P. 04020260. – DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003304. – Viewed on December 3, 2024.

26. Prediction and Analysis of the Grit Blasting Process on the Corrosion Resistance of Thermal Spray Coatings Using a Hybrid Artificial Neural Network [Electronic Resource] / D. Ye et al. // Coatings. – 2021. – Vol. 11, no. 11. – P. 1274. – DOI: 10.3390/coatings11111274. – Viewed on December 3, 2024.

27. Preparation of the Surface of Long-Dimensional Rods of Hydro-Cylinders for Thermal Spraying Using an Abrasive Jet [Electronic Resource] / G. Zhetessova et al. // Coatings. – 2022. – Vol. 12, no. 10. – P. 1514. – DOI: 10.3390/coatings12101514. – Viewed on December 3, 2024.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. МЕТОДИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ	4
1.1. Використання газотермічних методів напилювання в авіадвигунобудуванні	4
1.2. Газополуменеве напилювання	5
1.3. Надзвукове газополуменеве напилювання	7
1.4. Детонаційне напилювання	8
1.5. Плазмове напилювання	9
1.6. Дугове металізування	10
1.7. Холодне газодинамічне напилювання	11
1.8. Порівняльна характеристика методів газотермічного напилювання	11
2. МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ ПОКРИТТІВ РІЗАННЯМ	14
2.1. Токарне оброблення	14
2.2. Оброблення шліфуванням	15
2.3. Інші методи оброблення різанням	20
3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ОБРОБЛЕННЯ	21
3.1. Підготовка поверхонь деталей до напилювання	21
3.2. Механічні способи оброблення поверхні перед напилюванням зі зніманням стружки	24
3.3. Механічні способи оброблення поверхні перед напилюванням без знімання стружки	31
3.4. Струминно-абразивне оброблення	35
3.5. Ізолювання поверхонь, які не потребують напилювання	40
4. МЕТОДИКА РОЗРАХУВАННЯ ТОВЩИНИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ	43
4.1. Загальні рекомендації щодо механічного оброблення газодинамічних покриттів	43
4.2. Розрахункові формули для визначення операційних розмірів і товщини покриттів	44
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	55

Навчальне видання

**Шорінов Олександр Володимирович
Волков Андрій Олегович
Зорік Ігор Володимирович**

ОБРОБЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ РІЗАННЯМ

Редактор О. В. Коновченко

Зв. план, 2024

Підписано до видання 06.12.2024

Ум. друк. арк. 3,3. Обл.-вид. арк. 3,69. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001