

Тема 3. Мікрообробка

3.1. Способи мікрообробки

Мініатюрні або мікродеталі із найрізноманітніших матеріалів – метали, кремній, полімери, кераміка – давно й успішно застосовують у багатьох галузях промисловості. Однак в останні 8 років ринок мікродеталей і мікрокомпонентів розвивається найбільш динамічно, демонструючи завидні темпи росту.

Найбільше поширення мікродеталі і мікрокомпоненти отримали в медичній і біомолекулярній техніці і електроніці. У зв'язку з цим варто визначити розміри деталей, отриманих при мікрообробці. Узагальнюючи думки багатьох фахівців, можна вважати, що такими є деталі з розмірами менше 1 мм. Як наочний приклад візьмемо мобільні телефони, розміри яких безупинно зменшуються, а кількість виконуваних ними функцій, незважаючи на зменшення розмірів плат і збільшення їх кількості на тій же площі, також безупинно росте.

Очевидна потреба в подібних деталях і в медицині, де від їх розмірів (і розмірів виготовлених з таких деталей приладів, наприклад кардіостимуляторів) нерідко залежать можливість виконання операцій і час видужання пацієнтів.

Авіаційна промисловість теж має потребу в мініатюрному кріпленні, фітингах і датчиках, приладах для контролю потоку повітря і рідини. В автомобілебудуванні цілком реальне використання надмалих електродвигунів і виконавчих органів для систем безпеки, забезпечення зручності водіїв і т.д. У складних системах упорскування палива і їхніх елементів мікродеталі також знаходять своє місце.

Однією з основних цілей мініатюризації за допомогою мікрообробки є отримання можливості інтеграції мікроелектронних схем разом з отриманими при обробці, тим самим цілком інтегрованих мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Такі системи мають ряд переваг у порівнянні з окремими датчиками, виконавчими механізмами і приводами або схемами. У них вища надійність і

експлуатаційні показники, їх серійне виготовлення і експлуатація вимагають менших капітальних витрат.

Такі системи можуть бути виконані з використанням гібридної чи монолітної інтеграції. У першому випадку структури датчиків і/або виконавчих механізмів розміщують на окремих платах - одній або декількох. Очевидна перевага такої схеми полягає в тому, що базова плата і вбудована в неї (з датчиками і виконавчими механізмами) виготовляються окремо, що забезпечує широкий вибір можливостей технологій виготовлення для кожної плати, що складає мікросистему. Втім, це ж і її недолік, оскільки ефективність експлуатації МЕМС у цілому знижується, а складність з'єднання окремих компонентів у єдину систему підвищується. В окремих випадках, наприклад при виготовленні більших дисплейних матриць, таку схему не можливо реалізувати.

При монолітній інтеграції мікроелектронних схем у МЕМС можна в принципі забезпечити найбільш компактні й універсальні мікросистеми, а в окремих випадках (наприклад для великих дисплейних матриць) вона просто незамінна. У той же час така інтеграція ускладнює конструкцію і процес виготовлення системи, а оскільки більшість інтегральних схем виконано з кремнію, це створює певні проблеми сумісності.

Виділяються наступні способи мікрообробки:

- обробка зі зняттям стружки (механічна і абразивна);
- електрофізична обробка (електроерозійна, лазерна, ультразвукова, струминна);
- лиття і пресування в прес-формі і ряд інших.

3.2. Мікрообробка різанням

Безперервне підвищення точності різання при механічній обробці дозволило використовувати даний процес і в мікромеханообробці. Важливою умовою при цьому є зменшення радіуса краю інструмента з метою реалізації малої

товщини різця, при цьому потрібно контролювати процес, щоб сили різання не піддавали деформації сам інструмент.

В даний час різці з природного алмазу заточуються з радіусом скруглення ріжучої кромки 50-150 А, що дозволяє зрізати шар матеріалу в 3-5 мкм. Широке застосування отримало, в першу чергу, мікросвердління.

Мікросвердління має наступні переваги:

1. Електричні властивості робочого інструменту не впливають на процес різання. Таким чином, метали і пластмаси легко піддаються механічній обробці. Один з типових прикладів – свердління отворів на друкованих платах мікросхем.

2. Час механічної обробки легко керований тому, що процес стабільний, коли встановлена необхідна подача і швидкість обертання свердла.

З іншого боку, недоліки мікросвердління наступні:

1. Піддані механічній обробці отвори часто знаходяться під кутом відносно вісі, оскільки оброблена частина отвору впливає на орієнтацію свердла. Щоб уникнути цього необхідно обертати не свердло, а деталь.

2. Дуже тверді і ламкі матеріали важко обробляються. Алмазне свердло з маленькою глибиною різця може вирішити цю проблему, проте мікросвердло може зламатися.

Мікросвердла, виконані головним чином зі швидкорізальної сталі і твёрдого сплаву, найчастіше використовують при свердлінні друкованих плат. Їх застосування ефективно також при свердлінні отворів у медичних голках, підшипниках і корпусах для годинників, сопел для клапанів упорскування. Мінімальний діаметр свердла, що випускають серійно в теперішній час - 40 мкм.

У процесі мікрорізання відбувається механічна взаємодія гострої ріжучої кромки інструмента (радіус якої складає 30 - 40 А) з матеріалом заготовки, що призводить до його руйнування по визначених траєкторіях і до видалення непотрібних частин заготовки у вигляді стружки, розмір якої дорівнює декілька на-

нометрів. Для реалізації такого процесу матеріал інструменту повинен бути значно міцнішим за матеріал заготовки і між ними не повинна відбуватися дифузія, обумовлена термічними явищами. Крім того, радіус ріжучої кромки інструменту повинен бути порядку товщини стружки або менше. З огляду на те, що розміри оброблюваних заготовок бувають біля декількох десятків мікрометрів, товщина отримуваної стружки і, відповідно, радіус ріжучої кромки досягають, в окремих випадках, декількох нанометрів (до 1 нм для міді й алюмінію, оброблюваних алмазним інструментом з радіусом ріжучої кромки 50-100 А). Таким чином, монокристалічний алмаз є найбільш придатним інструментом для мікрорізання, хоча його застосування обмежене внаслідок високої хімічної подібності зі сталлю, що викликає дифузію і неприпустиме зношування алмазу. Іншою необхідною умовою реалізації мікрорізання є наявність надпрецизійних верстатів, що мають по різних вісях координат точність позиціювання порядку 5 нм. Такі верстати вже працюють у лабораторіях.

Однією з найважливіших проблем, які виникають при мікрообробці різанням є відносно високі сили різання, які впливають на точність обробки і внаслідок відхилень інструменту і заготовки, що істотно обмежують розміри оброблюваних деталей. Критичний вплив на силу різання здійснює гострота ріжучої кромки інструмента, зокрема її радіус.

Серйозні проблеми виникають і при виготовленні інструментів, що роблять не тільки з алмазів, але і зі спеченого твердого сплаву. Ряд фірм випускають двозубі кінцеві фрези і свердла діаметром 100 мкм. Досліджується можливість промислового випуску інструментів меншого діаметра, якими крім сталі і кольорових металів можна обробляти пластики і композити, наприклад свердлити отвори в багатошарових електронних платах. Хоча заготовки твердих і крихких матеріалів при виконанні технологічних операцій піддаються обробці різанням, при якій часто спостерігається крихке сколювання оброблюваного матеріалу при дуже малих глибинах різання (порядку 0,1 мкм для кремнію), та-

ке різання можливе твердосплавним інструментом у режимі пластичності. Наприклад, у боросилікатному склі свердлили отвори діаметром 10 мкм і глибиною 20 мкм. Проте, такі матеріали більш ефективно обробляються нетрадиційними методами – електроерозійним, лазерним, ультразвуковим, струминним й іншими.

Найбільш важливою перевагою мікрорізання в порівнянні з іншими методами є можливість отримання об'ємних складних мікроструктур, наприклад гостріння концентричних і гвинтових канавок шириною 13 мкм на циліндричних заготовках з алюмінію з досягненням шорсткості $R_a = 0,3$ мкм і фрезерування прес-форм з інструментальної сталі для лиття пластмас з отриманням шорсткості $R_a = 0,5$ мкм.

Завдяки дуже малій глибині різання мікрошліфування найбільш ефективно для обробки, що застосовується переважно у напівпровідниковій техніці крихких матеріалів, поверхня яких може бути доведена до дзеркального стану. Інструмент, а це звичайні шліфувальні круги шириною від 15 до 1000 мкм, складаються з абразиву і матриці. Для отримання мікронерівностей профілю менш $R_z = 10$ нм глибина різання не повинна перевищувати 100 нм. Існує дві можливості досягнення таких параметрів:

- підтримка малої глибини різання круга шляхом використання грубозернистих кругів;
- використання кругів з надмілкозернистих абразивів.

У першому випадку вимагаються дуже точні верстати й ідеальне виправлення шліфувального круга. Одним з таких верстатів є наджорсткий Tetraform C, що забезпечує шорсткість поверхні при шліфуванні загартованої підшипникової сталі навкруги з КНБ із зернистістю 76 мкм не менше 10 нм. У другому випадку використали абразивні гранули, що склалися з надмілкозернистих часток двоокису кремнію, розмірами 10-20 нм, отриманих за допомогою елект-

рофорезного осаджування. Останнім часом отримав поширення метод наношліфування, по якому алмазні зерна впроваджували в м'яку олов'яну пластину, виступання зерен з якої було гранично малим. У результаті при обробці сплаву Al203-TiC отримали шорсткість Ra = 1,14 нм і карбиду кремнію SiC Ra = 0,79 нм.

Фрезерування в мікрообробці залишається найбільш гнучким технологічним процесом, у якому застосовують алмазні однозубі фрези (летучі різці) шириною порядку 100 мкм і багатозубі кінцеві з мінімальним діаметром близько 300 мкм для обробки кольорових металів, а також твердосплавні (аналогічні використовуваним при звичайній обробці) для обробки сталі. Останні не підходять для обробки оптичних поверхонь, тому що залишають на них мікрориски. І все-таки з економічних міркувань фрези зі спеченого надмілкозернистого (розміри зерен 0,5-1 мкм) твердого сплаву на базі карбиду вольфраму і кобальту дотепер залишаються найбільш розповсюдженими при мікрообробці сталі.

Надточне фрезерування реалізує тривимірне випукле зображення обличчя за допомогою мікродеталей (рис. 3.1).

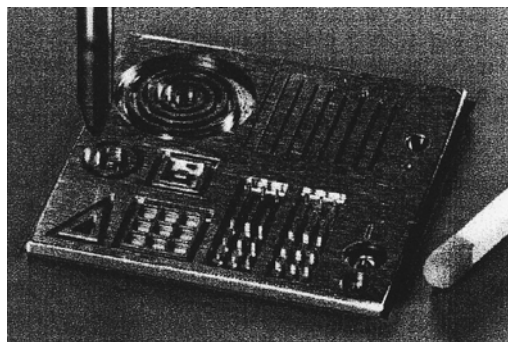


Рис. 3.1. Мікроструктури, виконані мікрофрезою (не той рисунок!!!!)

Надточним фрезеруванням за допомогою алмазного інструмента були оброблені мікроструктури порядку 10 мкм (рис. 3.2).

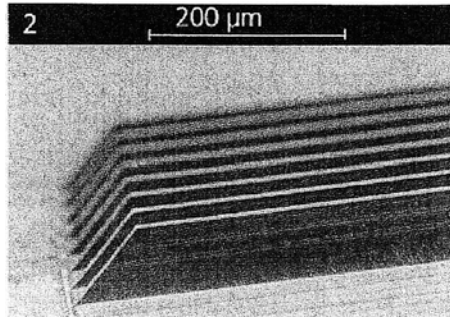


Рис. 3.2. Формування іонів для компонентів оптико-волоконних систем за допомогою мікрофрезерування

Для фрезерування матриць прес-форм компанія Magafor розробила спеціальний фрезерний інструмент з діаметром менш 50 мкм, тобто тонше волосини (рис. 3.3). При цьому форма кінця інструмента модифікована з метою досягнення кращої якості оброблюваної поверхні (рис. 3.4).

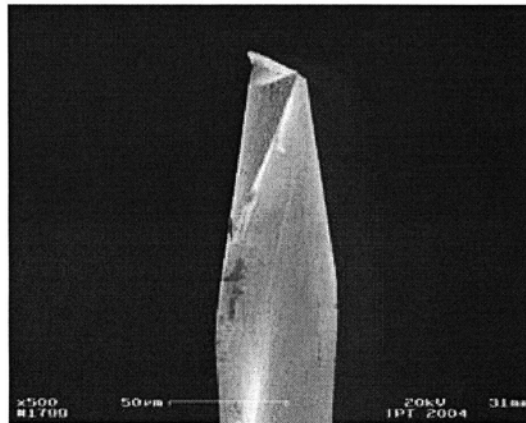


Рис. 3.3. Інструмент Ø50 мкм для мікрофрезерування

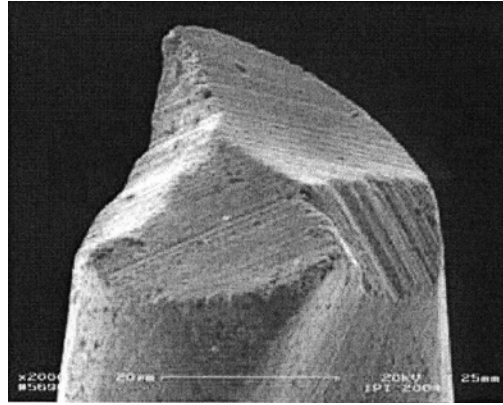


Рис. 3.4. Спеціальна форма кінця інструмента

Оскільки робота інструмента відбувається при швидкостях шпінделя порядку 160000 об/хв (верстат Kern), то існує ризик поломки інструмента в процесі фрезерування. Наступна заміна такого інструмента в процесі обробки привела б до порушення безперервності мікроповерхні, але спеціальні стратегії в CAD/CAM можуть допомогти в мінімізації зазначеного ризику:

- врізання інструмента в деталь повинне бути як можна більш гладким і тривалим, використовуючи похиле врізання або врізання по спіралі зверху вниз;
- щоб домогтися однорідності траєкторії руху інструмента, можна використовувати ті ж стратегії, що і при високошвидкісній обробці (High Speed Cutting, HSC), наприклад стратегії скруглення кутів і спірального фрезерування;
- для чорнової обробки мікропоглиблень (мікроматриць) дуже важлива наявність знань про стан заготівки в сучасний момент обробки, тому що неправильна інформація про стан заготівки може призвести до поломки інструмента.

До верстатного устаткування для мікрообробки висуваються нові спеціальні вимоги. По-перше, виробники пристосовують існуючі верстати до виконання задач мікрообробки, для чого до визначених меж зменшують розміри як самого устаткування, так і окремих його вузлів і додають до нього окремі функції, необхідні при мікрообробці. По-друге, створюють нові покоління верста-

тів, спеціально призначених для виконання мікрообробки. Велика частина таких верстатів перебуває в стадії розробки та випробувань, але деякі можна вже побачити в ділі.

При вдосконаленні порівняно великих верстатів під вирішення задач мікрообробки варто враховувати, що після доведення верстата до визначених розмірів фактори, якими в окремих випадках можна зневажити в звичайних верстатах, зокрема вібрація, температура, зсув інструмента, твердість і видалення стружки, в мініатюрних машинах починають відігравати велику роль, значно впливаючи на остаточний розмір деталі. Істотно більш складним стає, також, маніпулювання деталями і їх кріплення, у зв'язку з чим при здійсненні цих операцій (у більшості випадків за допомогою вакууму) варто бути особливо обережними, щоб не зашкодити крихкій деталі. Оскільки традиційні щупи і вимірювальні прилади теж занадто великі і мають недостатню точність виміру, при мікрообробці використовують переважно пневматичні, оптичні та інші безконтактні методи виміру й оцінки.

Найбільш широке поширення в мікрообробці отримали токарні автомати поздовжнього точіння, фрезерні верстати і обробні центри. Токарні верстати випускає американська фірма Hardinge, а токарні автомати – в основному японські фірми Citizen, Brother і ін. Ринок токарських автоматів, у тому числі для мікрообробки, в зв'язку з мініатюризацією виробництва, розвитком електронної і медичної промисловості постійно зростає. Якщо, за деякими оцінками, у 2000 році в світі було продано 8500 шт., то в 2003 році – вже 10000 шт., а до 2007 року продаж досяг 20000 токарних автоматів поздовжнього точіння.

У числі найбільш характерних токарних верстатів для мікрообробки слід зазначити мод. GT27SP фірми Hardinge (рис. 3.5). На ньому з точністю до 0,3 мкм обробляють деталі з відношенням довжини до діаметра 5:1, що закріплюються в цангах діаметром до 0,4 мм.



Рис. 3.5. Верстат GT27SP фірми Hardinge

Серед виробників фрезерних верстатів і обробних центрів лідирують фірми двох країн – Німеччини і Японії, однак законодавцем мод у цій галузі виступає все-таки Японія. Практично всі великі японські фірми представили хоча б по одному багатоцільовому верстату для мікрообробки, які, як правило, мали наступні характеристики:

- привід від лінійного двигуна по основних вісях координат;
- гідростатичні направляючі;
- наявність пристроїв для компенсації або ліквідації впливу теплового джерела;
- дуже високі частоти обертання шпинделів (понад 40000 об);
- станина і стійка з натурального граніту;
- лазерна система зворотного зв'язку при позиціюванні;
- пристрій ЧПУ, здатний обробляти і виводити на екран дисплея нанометричні одиниці виміру;
- безконтактне визначення стану інструмента або безконтактна вимірювальна система.

У числі основних виробників таких верстатів у Японії – фірми Makino, Fanuc і інші, а в Німеччині – Primacon, Kern і Kugler. Трьохкоординатний вер-

тикальний обробний центр мод. Nuper 2J фірми Makino (рис. 3.6) встановлений на гранітній станині товщиною 250 мм, а його шпиндель з автоматичним внутрішнім масляним охолодженням і частотою обертання 3000-40000 хв¹ (170000 хв¹ за замовленням) забезпечений системою безпосереднього кріплення інструмента (наприклад, кінцевих фрез діаметром до 0,03 мм), що запобігає його вібрації при обробці. Переміщення по осях координат здійснюються за допомогою шарикогвинтових передач зі швидкістю 12 м/хв. Точність позиціонування складає $\pm 0,3$ мкм, повторюваність $\pm 0,2$ мкм. Для підтримки такого рівня точності верстат встановлюють в окремому приміщенні з регульованою температурою.



Рис. 3.6. Трьохкоординатний вертикальний обробний центр Nuper 2J
фірми Makino

Більшу частину обробних центрів для мікрообробки виконують з керуванням по п'яти осях координат, причому по трьох лінійних осях використовують стандартні лінійні двигуни, а по двом поворотним (поворот на 360°) - вбудовані синхронні серводвигуни. У верстаті мод. Roboano альфа-01 фірми Fanuc, побудованому за такою схемою (рис. 3.7), передбачено два шпинделі з пневмоприводом (з контролем температури повітря) для токарної обробки і для фрезерування з частотою обертання відповідно 7000 і 50000 хв¹ і биттям 0,05 мкм. За допомогою фрезерного шпинделя можливо також шліфування. Заготів-

ки кріплять на столі розмірами 210×210 мм. Лінійні двигуни забезпечують швидкість переміщення для мікрообробки 72 м/хв. Прямолінійність переміщень по лінійних осях складає 0,2 мкм. У числі деталей, оброблюваних на цьому верстаті, можна назвати лінзи Френеля, дифракційні решітки, об'ємні дзеркала.



Рис. 3.7. Верстат Robonano альфа-0і фірми Fanuc

На фрезерному верстаті мод. PFM24 NG фірми Primason (рис. 3.8) з переміщеннями по осях координат 240×240×240 мм і робочим столом 345×295 мм, у якого досягається точність позиціонування ± 1 мкм і повторюваність $\pm 0,5$ мкм, можна обробляти не тільки графітові електроди, але і складні загартовані сталеві мікродеталі твердістю до 60 HRC, оскільки можлива установка і зміна до 80 інструментів. Крім того, по осі Z можливе шліфування деталей складного профілю змінним пальцевим кругом, частота обертання якого досягає 40000 хв⁻¹.



Рис. 3.8. Фрезерний верстат PFM24 NG фірми Primacon

До особливостей п'ятикоординатного обробного центра німецької фірми Kugler із гранітною станиною можна віднести використання гідро- і аеростатичних направляючих і наявність пасивних елементів пневмодемпфірування, що гасить частоти вібрацій понад 5 Гц. Це забезпечує дуже високу жорсткість верстата, а отже, і високу точність позиціонування, яка складає $\pm 0,5$ мкм. Дискретність переміщень по осях координат дорівнює 10 нм. На відміну від більшості подібних верстатів із гранітними станинами в трьох- і п'ятикоординатних верстатах фірми Kern стійка виконана з полімербетону, ступінь демпфірування якого приблизно в 10 разів більше, ніж у чавуна. Частота обертання шпинделя досягає 160000 хв^{-1} , а точність обробки не менше ± 2 мкм при шорсткості поверхні $Ra = 0,09$ мкм.

Шліфування при мікрообробці застосовують не настільки часто, як фрезерування і свердління, тому, що при перших двох операціях нерідко досягаються достатні точність і якість поверхні. Однак у ряді випадків, особливо при виготовленні довгомірних деталей, без шліфування обійтися важко. Саме для таких випадків призначений шестикоординатний верстат із ЧПУ мод. SAM SXE-B американської фірми Glebar (рис. 3.9). Він конструктивно виконаний у вигляді токарного автомата поздовжнього гостріння з рухливою передньою ба-

бкою і призначений для круглого і бесцентрового шліфування в медичних цілях, насамперед дроту діаметром 0,05-3,2 мм. Алмазним кругом діаметром 300 мм і шириною 0,25-25 мм шліфують не тільки діаметр дроту, але і виступи, лиски й інші профілі на ньому. Дріт, що обертається при обробці з частотою до 5000 хв^{-1} , кріплять у цанзі. При точності позиціювання по кожній осі 5 мкм точність обробки по діаметру складає $\pm 2,5 \text{ мкм}$ і по довжині $\pm 25 \text{ мкм}$.



Рис. 3.9. Шестикоординатний верстат із ЧПУ САМ SXE-B фірми Glebar

Все більше застосування для мікрообробки знаходять обробні центри. Одним з останніх представників таких центрів є вертикальний високопродуктивний 3-координатний обробний фрезерний центр VF 800 (Fanuc).



Рис. 3.10. Вертикальний 3-координатний обробний фрезерний центр VF 800 (Fanuc)

Сучасні високопродуктивні фрезерні обробні центри серії VF застосовуються у всіх галузях промисловості: автомобільній, енергетичному машинобудуванні, аерокосмічній, приладобудуванні, а також у всіх суміжних областях для виготовлення прес-форм і штампів високої якості. Вони характеризуються високими параметрами різання, точністю позиціонування і винятковою надійністю, завдяки застосуванню першокласних механічних і електронних комплектуючих таких фірм, як THK, Timken, SKF, Star, Fanuc, Fagor, Heidenhain, Siemens, Mitsubishi, сучасних засобів контролю виробництва, а також новими рішеннями в конструкції і компануванні верстатів. Вертикальний центр VF 800 з розмірами столу 800×1700 виробництва концерну LMC Corporation поставляється в різних конфігураціях, у тому числі зі зміною паллет, шпинделем на 8000 об/хв. По спеціальному запиті може бути замовлена четверта координата. Точність позиціонування - 0,015 мм.



Рис. 3.11. Горизонтальний високопродуктивний 3-координатний обробний фрезерний центр VT 500 (Fanuc)

Горизонтальний центр VT 500 з розмірами столу 500×600 виробництва концерну LMC Corporation поставляється в різних конфігураціях, у тому числі зі зміною паллет, шпинделем на 6000 об/хв. По спеціальному запити може бути замовлена четверта координата. Точність позиціювання 0,004 мм.

Унікальна конструкція шпинделя LMC забезпечує здатність витримувати високі осьові навантаження практично без підвищення температури. Щоб гарантувати тривалий термін служби, шпиндель герметизується стисненим повітрям для запобігання забруднення. У стандартну комплектацію фрезерного центра VF 800 постачається шпиндель з частотою обертання 8000 об/хв.

Револьверний барабан з 24 позиціями з бічною установкою інструмента оснащений швидкодіючим надійним пристроєм автоматичної зміни інструмента. Конструкція розроблена таким чином, щоб максимально забезпечити конуси оправок від влучення стружки й інших сторонніх тіл (при відсутності інструмента гніздо блокується спеціальними дверцятами), а сам процес зміни інструмента зробити безвібраційним і плавним, що у свою чергу продовжить термін служби центра.

3.3. Лазерна мікрообробка

Лазерна мікрообробка отримала в останнє десятиліття широкий розвиток як для видалення матеріалів, так і для їхнього з'єднання. Найширше використовуються CO₂, твердотільні, діодні і ексимерні лазери, що служать для обробки переважно металів, кераміки, скла, полімерів і напівпровідників. До числа основних характеристик лазерів, по яких визначається їхня придатність для обробки того чи іншого матеріалу, належать довжина хвилі, потужність і тривалість імпульсу та його повторюваність. Мінімальні отримувані при обробці поздовжні розміри визначаються довжиною хвилі і використовуваною оптикою. У цілому ж можна вважати, що чим менше довжина хвилі, тим менші розміри структур можна обробляти і отримувати. Виходячи з цих критеріїв, най-

більш придатні для мікрообробки, у тому числі для отримання отворів, ексимерні лазери, довжина хвилі в яких коливається в межах 157-350 нм. На рис. 3.12 показана полімерна деталь медичного приладу з отриманими за допомогою ексимерного лазера отворами діаметром 2 мкм.

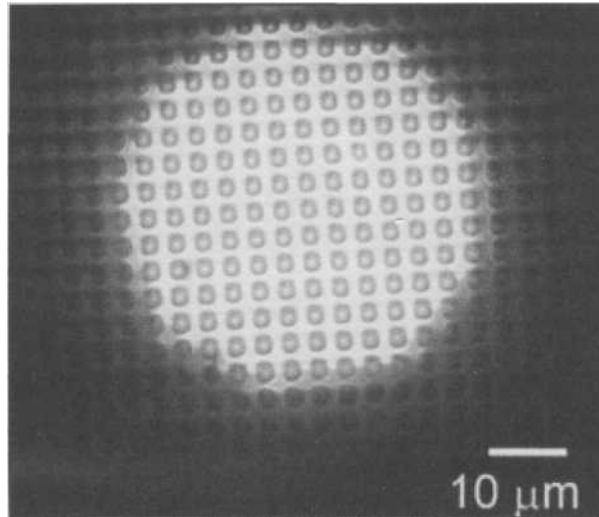


Рис. 3.12. Полімерна деталь з отворами діаметром 2 мкм.

Однією з задач, що найчастіше зустрічається і може бути розв'язана за допомогою лазерів, є виконання мікроотворів у важкооброблюваних матеріалах, наприклад, нікелевих і кобальтових сплавах. З цією метою у лазерів Nd:YAG фірми Lumonics гранично (5 мкм) скоротили діаметр фокусної плями.

Крім медицини, основні області застосування лазерів для мікрообробки – авіаційна й автомобільна промисловість, виготовлення прес-форм і штампів. В авіації, наприклад, з їхньою допомогою свердлять отвори діаметром до 2,5 мм під нове кріплення, при спрацьовуванні старого в листах обшивки товщиною 5-10 мм, у лопатках двигунів для їхнього охолодження (діаметром від 0,15 мм). Отвори діаметром від 3,8 до 1,9 мкм у жиклерах систем упорскування дизельних двигунів автомобілів отримують винятково за допомогою лазерів. І це не межа. В принципі лазерами фірми Lambda Physik можна з великою точністю робити отвори діаметром 1,3 мкм на глибину до 1 мм. Ще меншого діаметру викону-

ють у даний час отвори в струминних принтерах (діаметром 0,6 мкм) і напівпровідникових компонентах (діаметром 1 мкм). Мікрозварювання електронних компонентів також широка область застосування лазерів, діаметр фокусної плями в яких зменшують для цієї мети до 2,5-3 мкм. Основні переваги в таких лазерах – мінімальний тепловідвід, що практично не викликає теплової деформації листів мінімальної товщини, що зварюються.

Основні фізичні процеси лазерного мікроформування (ЛМФО)

1. Випаровування (і абляція в розплавленій фазі) - найбільш популярний процес, що лежить в основі більшості промислових технологій будь-яких матеріалів у МЕ, ММ, МО і Ф; у даний час актуальними залишаються проблеми точності і якості цих процесів.

Разом з тим буквально в останні роки розроблені і, головне, використані для ЛМФО зовсім інші фізичні принципи.

2. Нагрівання до температури розм'якшення (або плавлення) з наступним деформуванням у в'язко-текучій фазі (доповнене тим або іншим механічним впливом – витяжкою, обертанням і т.п.) застосовується для виготовлення близькопольних оптичних зондів, медичного оптичного інструментарію і т.п.

3. Спрямоване локальне нагрівання твердої фази, що викликає появу контрольованого поля напруг та призводить до керованого деформування листових матеріалів (Laser forming), причому не тільки з метою формування, але і прецизійного складання і юстування мікромеханічних компонентів.

4. Локальне нагрівання, що викликає появу надлишкового тиску газу (пари) на поверхні розподілу двох середовищ (наприклад, плівка-підкладка) з метою створення спрямованих мікродеформацій.

5. Пошаровий синтез тривимірних об'єктів методом нарощування шарів, у тому числі стереолітографія, селективне лазерне спікання і пошарове складання з листових матеріалів (laminated object manufacturing).

6. Комбіновані лазерні процеси спільної дії з іншим випромінюванням або з плазмою для ініціювання поглинання і т.п.

7. Маніпулювання мікрочастинками (молекулярне складання), основане на захопленні часток у фокусі лазерного випромінювання тиском світла і наступній побудові мікро- і наноструктур.

8. Формування фотонних кристалів на основі фемтосекундного впливу лазерного випромінювання на прозорі оптичні матеріали.

Останнім часом у мікрообробці особливо широке поширення отримали короткохвильові лазери низької потужності, що працюють в ультрафіолетовому діапазоні – діодні твердотільні з накачуванням і ексимерні. На рис. 3.13 показано ексимерний лазер розміром з невеликий обробний центр.

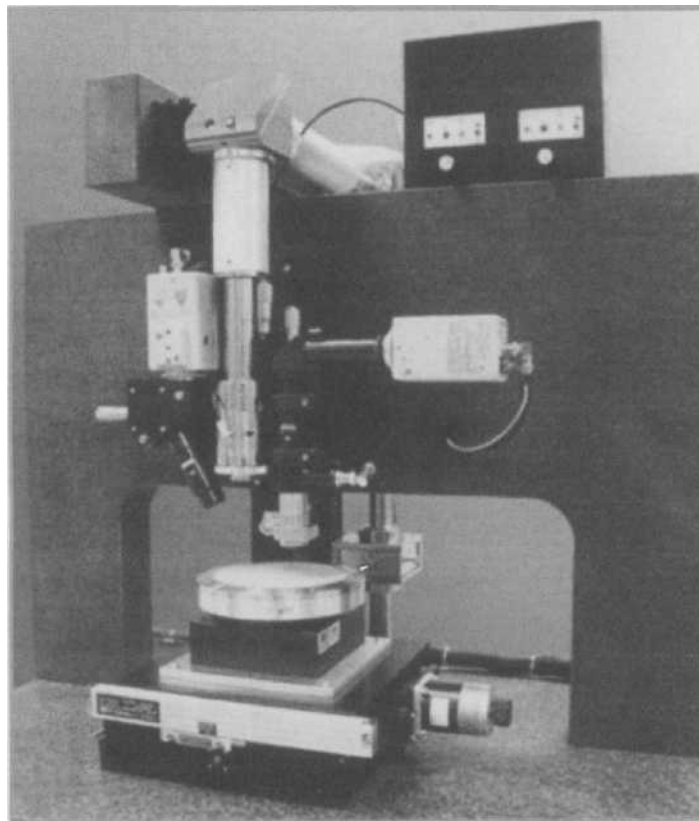


Рис. 3.13. Ексимерний лазер

Він оснащений відеомікроскопом, контрольною і поворотною камерами і системою напрямку променів. Такі лазери не тільки мають набагато меншу потужність у порівнянні з CO_2 -лазерами, але і зона термічного впливу в них обмежена або взагалі відсутня, що дозволяє звести до мінімуму деформацію оброблюваних деталей (товщиною до 0,5 мм) і використовувати такі лазери при мік-

рохірургічних операціях очей. Велика зона, охоплювана лазерними променями (25×13 мм), дозволяє робити в полімерах, кварці або склі по 10000 отворів одночасно. Особливий інтерес викликає здатність таких лазерів видавати строго дозовану кількість енергії точно у певні ділянки. Зазначені характеристики є абсолютно необхідними для використання цих лазерів у таких областях як:

- мікрообробка (двох- і трьохкоординатна механічна обробка різанням, свердління, наплавлення, швидке прототипування);
- складання (зварювання, пайка, обробка тиском);
- ремонт (переробка), заміна ушкоджених або несправних компонентів;
- маркування (гравіювання, модифікація поверхні, видалення покриттів).

Завдяки високій стабільності подачі імпульсів ексимерні лазери особливо ефективні при отриманні глухих отворів з точністю до ± 3 мкм, наприклад, у медичних голках.

Діодні лазери з накачуванням мають дуже високу повторюваність при меншій, ніж у ексимерних, вартості експлуатації, а діаметр фокусної плями в них дуже малий. З урахуванням значно більшої імпульсної частоти (50000 Гц у порівнянні з 400 Гц у ексимерних лазерів) це робить такі лазери найбільш ефективними при прорізці матеріалів з отриманням кутового радіусу, рівного радіусу фокусної плями лазера, тобто 2,5 мкм. Слід зазначити, що при будь-якому виді лазерної обробки в отворі отримують конусність з кутом від 4 до 15°, позбутися якої дуже складно і вимагає великих витрат. Вибір типу лазера, довжини хвилі і питомої густини енергії визначається в основному оброблюваним матеріалом, профілем і товщиною деталі.

3.4. Електроіскрова обробка

До електротехнології відносяться електричні способи обробки металів, що отримали великий розвиток за останнє десятиліття. Електричними способами обробки називаються такі види обробки, при здійсненні яких знімання металу або зміна структури і якості поверхневого шару деталі є наслідком терміч-

ної, хімічної або комбінованої дії електричного струму, що підводиться безпосередньо (гальванічний зв'язок) до деталі і інструменту. При цьому перетворення електричної енергії в інші види енергії відбувається в зоні обробки, утвореної взаємодіючими поверхнями інструменту й оброблюваної деталі. Електрична обробка містить у собі електроерозійні, електрохімічні, комбіновані електроерозійно-хімічні і електромеханічні способи обробки.

Перевага електроерозійної обробки (ЕЕО) складається у можливості обробки дуже широкого спектра електропровідних матеріалів незалежно від їхньої твердості при одночасно досить високій геометричній точності з отриманням, у разі потреби, реальних тривимірних структур. Хоча електроерозійна вирізка значно ефективніша прошивання, оскільки в ній співвідношення розмірів деталей (довжини й ширини або висоти) досягає 80 (у прошивання тільки 25), її з міркувань точності (що досягає в даний час ± 1 мкм) не рекомендується застосовувати при мікрообробці деталей або структур з розмірами менше 20-40 мкм. В даний час вирізка являє собою ключову технологію, використовувану при виготовленні мікропресформ і штампів, оскільки мінімальні зусилля, що розвиваються в процесі електроерозії, і незалежність від твердості оброблюваного матеріалу дозволяють отримувати філігранні профілі в таких матеріалах, що не можуть бути оброблені різанням. Тривала мініатюризація деталей і компонентів збільшує вимоги до їхньої обробки. Переваги дротової вирізки ще в більшому ступені виявляються в міру зменшення діаметра дроту (до 20 мкм).

Мікроелектроерозійна обробка (мікроЕЕО) відрізняється від традиційної електроерозійної не тільки застосуванням мініатюризованих електродів-інструментів, але й, в першу чергу, параметрами генератора і власне процесу обробки, які відповідають вимогам мікροструктуризації. Через малі розміри деталей при їх обробці повинні забезпечуватися обмежені теплові навантаження. Це означає зменшення потужності електричного розряду і щільності струму. В даний час мікроЕЕО використовують при отриманні отворів у голівках стру-

минних принтерів, форсунках жиклерах дизельних двигунів, турбінних лопатках, при виготовленні мікрозубчастих коліс і штампів, електронних компонентів і імплантантів, фасонних насадок на мікроінструменти.

Мікроелектроерозійне прошивання є важливим процесом обробки, за допомогою якого виготовляють об'ємні мікроформи з матеріалів будь-якої твердості. При величині зазору між електродом і заготівкою порядку декількох десятків мікрометрів можна отримати щілини шириною менш 100 мкм.

У мікроелектроерозійної вирізки існують деякі геометричні обмеження. Зокрема, у будь-якому випадку необхідний отвір для введення дроту. Залежно від радіуса використовуваного дроту і міжелектродного зазору, який варто підтримувати строго постійним, встановлюються також мінімальні внутрішні радіуси. Такий радіус деталі, рівний 12-15 мкм, можна отримати лише при діаметрі дроту 20 мкм, гранично малій енергії розряду і мінімальних зусиллях кріплення. Велике значення має, також, відсутність сторонніх включень (оксидів і сульфідів) в оброблюваному матеріалі, тому, в якості заготівок рекомендується використовувати отримані спіканням сталі і тверді сплави. Це дозволяє отримати шорсткість $Ra = 0,06$ мкм у першому випадку і $Ra = 0,04$ мкм у другому.

Сучасні електроерозійні верстати, крім стандартного регульованого по струму генератора, додатково оснащують релаксаційним генератором для мікрообробки і отримання високоякісної обробки поверхні. Подібні мікрогенератори на базі конденсаторів в залежності від величини конденсаторного розряду і паразитної ємності електричного ланцюга, при мінімальному робочому струмі 0,1 А, тривалості електричного розряду до 50 нс і частоті імпульсів до 10 МГц забезпечують мінімальну енергію розряду. Це обумовлює екстремально малу ширину іскрового зазору, що не перевищує 1,5 мкм. У даний час мінімально можливі розміри оброблюваних деталей, обумовлені вимогами повторюваності процесу обробки, складають близько 20 мкм. Японським дослідникам

вдалося на мікроелектроерозійному верстаті отримати в сталевій фользі товщиною 10 мкм отвори діаметром всього 5 мкм.

Мікроелектроерозійні верстати повинні відповідати ще одній дуже важливій вимозі – забезпечувати жорсткі допуски на розміри оброблюваних деталей, що не повинні перевищувати декількох мікрметрів. Звідси випливає потреба в обробному устаткуванні, яке здатне забезпечити, по-перше, високу точність позиціонування за рахунок застосування відповідних приводів переміщення, а по-друге, швидкодія датчиків системи виміру цього переміщення і вібротійкість станини і, як наслідок, тривалу і високу термічну стабільність верстата. Сучасні дротяно-вирізні і копіювально-прошивальні мікроелектроерозійні верстати з дровими і фасонними електродами забезпечують точність позиціонування по осях у межах до ± 2 мкм.



Рис. 3.14. Технічні характеристики EXC100L LQ фірми Sodick

Одним із самих точних ЕІ вирізних верстатів є верстат EXC100L (рис. 3.14). Дискретність подач - 10 нм (10 нанометрів=0,01 мкм)

- Спеціальні безосердні здвоєні лінійні двигуни;
- Закриті аеростатичні направляючі (повітряна подушка);
- Стіл XY, запозичений у лінійного ультрапрецизійного обробного центра Sodick NANO-100;
- Унікальні нанометрові лінійні датчики Heidenhein і власна система керування SMC (Sodick Motion Controller)
- Повнокерамічна конструкція на гранітній станині.
- Автозаправка дроту D 0,03 мм – 0,1 мм
- Досяжна точність на деталі - $\pm 0,8$ мкм (стандартна технологія Sodick)
- Круглість - $R_{\max}=0,35$ мкм!
- Досяжна шорсткість – $R_a=0,03$ мкм
- Прецизійний холодильник-термостат діелектрика з дискретністю $0,2^{\circ}\text{C}$;
- КЧПУ-генератор LQ1W крім CAD/CAM-системи Heart NC оснащений системою 3D моделювання "Q3vic-Solution" (разом з Solid Works, США)

Приклад обробки шестерні із карбїду вольфраму на EXC100L представлений на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Електроіскрова обробка шестерні.

Модуль колеса: 0,052. Число зубів: 60

Матеріал заготовки: карбід вольфраму, $t=3,0$ мм

Дріт: $D 0,03$ мм

Число проходів: 2

Шорсткість: $Ra=0,08$ мкм

Точність обробки: $\pm 0,8$ мкм

В області електроерозійної мікрообробки підсилюється тенденція до створення багатофункціональних електроерозійних верстатів, що дозволяють виконувати різноманітні операції. Однією з переваг подібних верстатів є усунення витратних операцій, пов'язаних з перезакріпленням оброблюваної деталі або електрода. Це, у свою чергу, не тільки зменшує трудомісткість налагодження верстата, але й усуває специфічні похибки позиціонування, що виника-

ють при закріпленні деталі або електрода. Ще одна перевага багатофункціональних електроерозійних верстатів полягає в тому, що вимоги до вибору робочої рідини і параметрів генератора приблизно однакові для всіх методів мікроелектроерозійної мікрообробки.

Прикладом інтеграції декількох способів мікроелектроерозійної обробки в одному верстаті є верстат для електроерозійного свердління отворів дротовими електродами в обертовій деталі. При обробці дуже дрібних отворів (діаметром менш 100 мкм) можна, як правило, не застосовувати неопрацьований тврдосплавний електрод ("із прутка"). Замість цього необхідний діаметр електрода отримують у процесі електроерозійного доведення. Крім доведення електрода, можна використовувати електроерозійне виправлення дротового електрода, при якому стрижневий електрод відіграє роль оброблюваної деталі. Для цього в копіювально-прошивальний верстат додатково вбудовують пристрій для відводу дротового електрода. Перевага подібного рішення полягає в можливості усунення додаткової операції кріплення, що, в свою чергу, забезпечує дуже високу точність позиціонування. В цьому випадку можна отримувати призматичні електроди й електроди у вигляді тіл обертання а також мікродеталі, наприклад специфічні елементи мікрофрез (рис. 3.16).

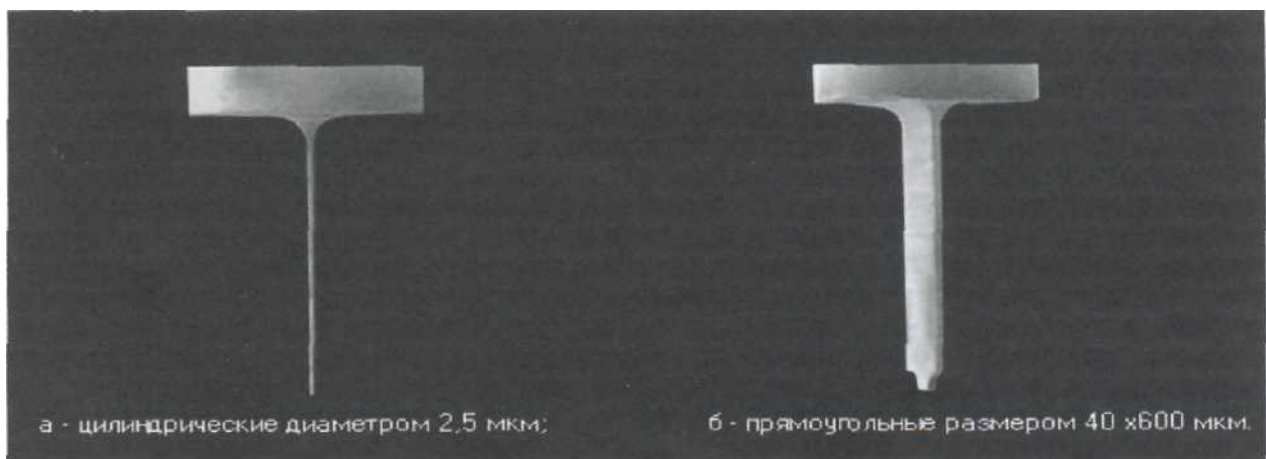


Рис. 3.16. Циліндричні і призматичні електроди



Рис. 3.17. Верстат для електро-ерозійної мікрообробки SX-100 фірма Sarix



Рис. 3.18. Мікроерозійне фрезерування мікроформ 200 мікрон зі ступеневою порожниною глибиною 50 мкм

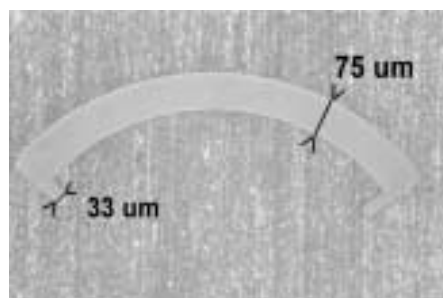


Рис. 3.19. Мікроерозійне фрезерування матриці екструдера, глибина 0,7 мм

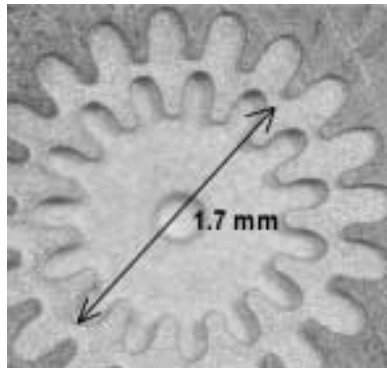


Рис. 3.20. Мікроерозійне дворівневе фрезерування глибиною 0,1 мм

Для отримання мікропорожнин, наприклад при виготовленні штампів для позначок і інструментів для лиття під тиском дотепер використовували, головним чином, мікроелектроерозійні копіювально-прошивальні верстати з фасонними електродами. Однак, у міру мініатюризації цих електродів від такого методу обробки відмовилися, тому що їхнє виготовлення з застосуванням мікрофрезерування являє собою дуже складний технологічний процес і вимагає, як правило, великих фінансових витрат. Позиціювати фасонні електроди щодо оброблюваної деталі і контролювати їх теж складно, оскільки зберігається небезпека зсуву й ушкодження мікроструктури електрода.

Як альтернативний метод обробки мікропорожнин у даний час пропонується обробка на копіювально-прошивальному верстаті із застосуванням стрижневого електрода, за допомогою якого за рахунок кінематики, подібної до кінематики, характерної для торцевого фрезерування, можна обробляти об'ємні контури.

На відміну від обробки на копіювально-прошивальному верстаті або на верстаті для електроерозійного фрезерування обробка на дротяно-вирізному верстаті являє собою загальноприйнятий метод обробки в області мікротехніки. За рахунок застосування найтонших дрових електродів з мінімальним діаметром 20 мкм можна забезпечити дуже маленьку ширину робочого зазору (до 40 мкм). При використанні багатопрохідної обробки навіть зі збільшенням ро-

бочого зазору на кілька мікрометрів шорсткість обробленої поверхні може бути зменшена до значень Ra менше 0,1 мкм. Область застосування мікроелектроерозійної обробки на дотяжно-вирізних верстатах крім безпосереднього виготовлення елементів мікротехніки, наприклад зубчастих мікроколіс або інструментів для мікрохірургії, охоплює також обробку мікроструктурованих штампів і матриць.

3.5. Нанесення мікропокриттів

Найбільший вплив на розвиток цієї області роблять сім маякових напрямків, розроблювальних дослідницькими інститутами за завданням Forschungsagenda Oberflache. Серед інших до них зараховують покриття, що самовідновлюються (самовиліковуються) і «що включаються», тобто такі, що змінюють свої властивості по сигналу ззовні (покриття з дистанційним керуванням). Сюди також відносяться найкращий захист від корозії, покриття з задалегідь заданими властивостями, функціональні покриття, отримувані шляхом комбінації способів обробки поверхні, а також заміна заборонених (токсичних) металів і з'єднань.

Хоча це ще не актуально, можна сюди віднести заміну хромових покриттів, наприклад, карбідом вольфраму (напилені покриття), DLC - плазмове осадження, електроосадження покриття на основі нікелю і кобальту або з декоративною метою – шляхом застосування CrN-PVD-плівок. Композиційні покриття з включеннями алмазного порошку виправдали себе у відношенні твердості і зношування в порівнянні з хімічно обкладеними нікелем, кобальтом і нікелькобальтом.

Велике значення додають застосуванню заготовок у вигляді стрічки, що подається до оброблюваної поверхні. Через ряд особливостей застосовані виконавцями засоби обробки поверхні вимагають розробки серйозних логістичних

рішень. Одним з найважливіших завдань у технології гальванічної обробки є зменшення енергоспоживання шляхом проведення відповідних заходів.

Подальший розвиток вимагає застосування нанотехнологій, що уже сьогодні впроваджуються, наприклад, в області отримання пластичних і таких, що деформуються, хромових покриттів, керамічних оксидних покриттів, а також твердих і зносостійких поверхонь. Це актуально, також, і у випадку пінних (пористих) металевих плівок, які, крім іншого, служать носіями каталізаторів.

В основному використовуються гальванічні хромові покриття, які цілком або повністю покриті плівками золота, платини або PVD-плівками, або частково протравлені.

В електроніці в даний час вдається захищати з'єднання силіконовим лаком, який відрізняється кращими фізичними і хімічними властивостями від застосовуваного до цих пір акрилового і до того ж економічніше. Наноструктуровані електроди в літійових акумуляторах значно продовжують їх термін служби.

Застосування в літакобудуванні легкого титана стає можливим завдяки кращій зносостійкості, що досягається при модифікуванні поверхні боридами інших металів за допомогою лазерного опромінення. До одних із чисельних способів застосування нанопокриттів у літакобудуванні відноситься заміна твердого хрому в пристрої шасі.

Функціональні покриття на пластмасах – від металізованої фольги методом напилювання до безпосереднього електроосадження на пластмасу – дозволяють замінити металеві деталі. За допомогою нанотрубок можна зробити пластмасу електропровідною і наносити покриття на пластмасові крила (автомобілів) гальванічним способом.

У машинобудуванні і при виготовленні інструментів можна на 50% уникнути втрат при зношуванні, застосовуючи придатні для забезпечення трибологічних властивостей методи обробки поверхні і мастильних матеріалів. Крім того, вдалося замінити CVD-плівки на отримувані при низьких температурах

тверді PVD-покриття. За допомогою термопар Ni-Cr-Ni можна вимірювати і оптимізувати температуру на поворотних ріжучих кромках під час роботи інструментів. Для поліпшення зчеплення різального інструменту, замість отримуваних PVD-способом нітридних покриттів застосовують модифіковані нітридні покриття без внутрішніх напружень і інші фізичні покриття. Термін дії підшипників у високопродуктивних технологічних пристроях можна подовжити за допомогою PVD-покриття.

Комбінація алітування і алюмінування забезпечує необхідну термостійкість лопаток газових турбін. Зношування форм для лиття алюмінію під тиском запобігається за допомогою тришарових PVD-покриттів.

Модифіковані скляні поверхні крім того, що самоочищуються, сприяють підвищенню якості, зниженню вартості і поліпшенню енергетичного балансу будинків. Провідні, функціональні і електрохромні покриття, що зворотно змінюють колір при проходженні струму, осаджуються на скло гальванічним або PICVD-способом (Plasma impulse chemical vapour deposition). Будівельні роботи можна полегшити застосуванням, наприклад, покритих патиною мідних листів для дахів.

Посріблені контакти для сигналу подачі рідких водню і кисню в ракетній техніці функціонують при низьких температурах, причому міцність зчеплення забезпечується попереднім срібленням, або амальгамуванням. Надалі способи покриття контактів благородними металами ще будуть розвиватися.

Для з'єднання майже всіх матеріалів у даний час є різні клеї. Від впливу агресивного середовища дуже навантажені нарізні сполучення пристроїв, що працюють під дією сили вітру, захищають органо- неорганічними цинковими ламельними покриттями замість хроматного пасивування.

До успіхів гальванотехніки в медицині можна віднести отримані PICVD-методом і використовувані для протезування сітківки алмазні покриття, що дають сліпим можливість бачити. Протези тазостегнових і колінних суглобів ви-

готовляються зі сплаву цирконію з ніобієм з дуже гарною зносостійкістю, поверхня якого захищена товстим оксидним шаром. Розроблено метод анодного оксидування поверхні титана. Для захисту від мікробіологічних факторів розроблені лаки, у складі яких є склокерамічні частки, що містять іони срібла. Помітно збільшуються безпечні для здоров'я терміни збереження пива і фруктових соків у поліетиленових пляшках, якщо на внутрішню поверхню плазменним способом наносять склоподібний діоксид кремнію. Для дотримання вимог до чистоти у фармацевтичній промисловості металеві деталі заміняють виготовленими з фтормістких полімерів, що отримуються литтям під тиском або спіканням.

Гнучкі скляні наноплівки забезпечують домашньому начинню різні функціональні властивості, наприклад, поліпшують ковзання праски. Побутова техніка, виготовлена з попередньо покритих деталей (Coil), не тільки значно дешевше, але й має різні функціональні властивості. Крім того, оптимізації властивостей продукції сприяє і попередня модифікація поверхні нержавіючої сталі. Електрохімічним способом реставрують стародавні прикраси.

Тим часом розвиваються, також, способи забезпечення безпеки і боротьби з тероризмом: магній у складі бетону в будинках заміняється бактерицидною міддю, а вбудовані в різних місцях мікросенсори посилають сигнали про зараження.

Одним з найбільш перспективних методів нанесення мікропокривтів є гальванопластика.

Гальванопластичні способи, що мають ряд переваг, у тому числі можливість порівняно простого отримання деталей складної форми, в основному використовуються для виготовлення інструментів. Це показано на прикладі виготовлення пластмасових деталей, які використовуються для полегшення ваги автомобілів. Для виготовлення гальванопластичним способом структурованого золотом дроту як негативний електрод використовується мідний дріт, що фор-

мується в сірчанокиислому електроліті за допомогою застосування спеціальних добавок і зміни умов осадження. Внутрішні поверхні (von Masters) з PVC виходять більш рівномірними у випадку хімічного осадження міді, ніж при звичайному диспергуванні часток срібла для забезпечення електропровідності. Мідні покриття осаджуються на нержавіючу сталь із сірчанокиислого електроліту, відокремлюються від субстрату і піддаються термообробці. Метод знімання частини поверхні фотохімічним травленням у даний час має велике значення як нетрадиційний метод виготовлення виробів в області медицини й електроніки.

Завдяки мініатюризації виробів все більше застосування не тільки в електроніці, але й в інших областях знаходять мікрогальванопластика і мікрогальваноструктурування. При цьому гальванотехніка грає не останню роль, як показує розробка і виготовлення мікроструктурованих охолоджувачів (холодильник, радіатор в автомобілі) за допомогою гальванічної обробки і спеціальних методів пайки. Досліджується можливість методу виготовлення термічних акумуляторів і сенсорів, що включає стадії електроосадження і структурування мікроплівок вісмуту і телуру. Є спроби в промислових умовах доповнити мікрогальванотехнічні методи технологіями мікроевалювання, глибокої мікроритяжки і мікропресування.

Також досліджується мікроплазмове напилювання, наприклад, крапельне нанесення різних матеріалів на імплантанти в медичній техніці. За допомогою комбінацій методів отримують високоточні кремнієві форми для лиття під тиском. Метод електролітичного імпульсного осадження золота полягає в отриманні міцних мікроструктур товщиною до 200 мкм, наприклад, для годинників.

Електроосадження металів дозволяє вирішити ряд нових технічних завдань. У цьому випадку велика увага приділяється взаємозв'язку між параметрами осадження й властивостями електролітів і покриттів. Це особливо актуально у випадку функціональних покриттів, для яких варто обмежити використання недостатньо вивчених органічних домішок.

Що ж стосується виду струму, то постійний струм вибирають, якщо вимагаються блиск і вирівнювання, імпульсний же використовують для отримання потрібної пористості і твердості, що залежать від розміру зерна. При електролітичному осадженні дифузійний шар значною мірою залежить від розподілу струму і потенціалу, і його впливом визначаються мікрошорсткість і вирівнювання. Описана роль водню, що утворився при електролізі, у покритті, наприклад, утворення гідридів у твердому хромі, і в підкладці, де він викликає охрупчування. Для того, щоб визначити співвідношення між металом і воднем, що виділяються, в залежності від рН потрібно проводити контроль як при катодному завантаженні, так і під час осадження. Механізм дії органічних комплексуютьовачів при електроосадженні металів був досліджений. Напруги, що призводять до утворення нитковидних кристалів у гальванічних цинкових покриттях, можуть бути викликані продуктами розпаду органічних добавок, а при гарячому цинкуванні – перемішуванням усередині гранул у результаті невеликих коливань температури.

Вплив малих температур і перегріву на властивості електролітів і покриттів описані. Застосування нових нерозчинних анодів дозволяє запобігти розкладанню органічних добавок. Недостатньо ізольовані підвіски (струмопровідні напрямні) призводять до підвищеної витрати металу і реактивів. Важливий також фактор часу. Видалення металевих покриттів у фосфорній кислоті особливо вигідно з економічного і екологічного боку.

Є програмне забезпечення для практичного розрахунку взаємозв'язку між щільністю струму, швидкістю проходу деталей, що покриваються, а також товщиною покриття при металізації на прохід. Спеціальний розрахунок дозволяє обґрунтувати конструкцію електролізера, форма якого забезпечує рівномірний розподіл струму в тривимірній пористій матриці для нанесення «нікелевої піни», використовуваної як каталізатор у паливних елементах.

Маються статті, у яких приводяться історичні для розвитку електрохімії дані, а також публікації з приводу сторіччя рівняння Тафеля.

Хромування. Поряд із твердістю і зносостійкістю хромові покриття здобувають інші цікаві функціональні властивості. Так, в одній з робіт обговорюється можливість отримання структурованих хромових покриттів з використанням механізмів росту .

При структуруванні поверхонь тонких стрічок, отриманих холодною прокаткою, поряд з піскоструминною і (струмо)іскровою обробкою все більше застосовується так званий «топохром»-процес. У цьому випадку на твердих хромових покриттях при впливі імпульсним струмом формуються напівсферичні структури. З цією ж метою застосовуються також хромові композиційні покриття, причому додавання часток діоксида церію й ультрадиспергованих алмазних часток призводить до найкращих результатів, як це показано в роботах.

У зв'язку з нападками, які підсилюються, на «шестивалентні» електроліти хромування в даний час розробляються електроліти на основі тривалентного хрому, придатні для отримання декоративних хромових покриттів з доброю корозійною стійкістю, підтвердженою в результаті довгострокових випробувань.

В численних дослідженнях розглядаються різні аспекти електроосадження хрому з водяних розчинів. Критичній оцінці піддаються різні теорії щодо хімізму і механізму процесу; зроблені висновки про найбільш ймовірний механізм.

Мідь і її сплави. Огляд ринку міді показує, що в даний час мідь застосовується в багатьох інноваційних технологіях, причому в майбутньому найважливішими споживачами міді стануть електроніка, енергетика, транспорт і архітектура. Під цим кутом зору розглядаються цитовані нижче роботи щодо подальшого розвитку, який перебуває на високому рівні електроосадження міді.

Цианідні електроліти міднення знаходять найширше застосування, хоча і вважаються недостатньо прийнятними для навколишнього середовища. Шляхом варіації складів електролітів і параметрів осаду одержують широкий спектр властивостей отримуваних покриттів. Оскільки неможливо забезпечити безпеку

навколишнього середовища і дотримати техніку безпеки, альтернативним вважається застосування безціанідних лужних електролітів. Вони забезпечують аналогічні властивості покриттів і дозволяють відмовитися від складної технології при мідненні алюмінію і цинкових деталей, що отримуються литтям під тиском, а також від придбання дорогих реагентів. Якщо мова йде про застосування ціанідних електролітів для прямого міднення сталі, то альтернативу їм можуть скласти пірофосфатні електроліти.

Досліджений також механізм осадження міді із сірчаноокислих електролітів; визначений взаємозв'язок між швидкістю обертання дискового електрода і швидкістю осадження. Особливо гарні трибологічні властивості мають мідні покриття, отримувані із сульфатомістких електролітів на основі водяного розчину етанолу в присутності бензол-14-краун-4-полі-ефіру. Вищезгадане справедливе і стосовно електролітичного сплаву Cu-Cd. Органічні домішки, застосовувані в залежності від умов осадження і необхідної інгібуючої дії, входять до складу сірчаноокислих електролітів для заповнення «сліпих» мікроотворів у виробництві друкованих плат.

З метою заміни ціанідних електролітів розробляється кислий глюконатомісткий електроліт для осадження сплаву Cu-Zn.

Латунне покриття на дроті (який використовується для отримання металокорда), яке утворюється при дифузії осаджуваних один за одним мідних і цинкових покриттів, виходить однорідніше, якщо осадження проводять не у вертикальних, а в горизонтальних паралельних, відділених один від одного, одноканальних осередках.

Нікель і сплави нікелю. Хоча вартість солей нікелю і нікелевих анодів за останні п'ять років зросла більш, ніж удвічі, і активно ведуться пошуки гідної заміни нікелевих покриттів, нікелювання в колишньому обсязі використовується в багатьох галузях науки і техніки.

Розроблені композиційні покриття з мікрокапсулами, заповненими маслом. Такі покриття впродовж тривалого часу зберігають гарні трибологічні властивості. Крім того, можна отримувати покриття з заданими трибологічними властивостями в залежності від товщини покриттів і інших умов. Нікелеві покриття з включеннями часток фуллерена C_{60} мають особливо високу зносостійкість і гладкість.

Становлять інтерес покриття сплавами нікелю, наприклад, Ni-Fe, отримані із сульфатних електролітів з пірофосфатом натрію в якості комплексоутворювача. Такі покриття мають особливо гарну корозійну стійкість. Досліджується механізм електроосадження сплаву Ni-B з електроліту з диметилборатом і виявлено ряд побічних реакцій, що впливають на вміст бору в покритті. Електролітичним сплавом Ni-P у багатьох випадках можна замінити зовнішнє покриття штепселів, звичайно отримуване хімічним способом, причому можна застосовувати більш тонкі покриття. Досліджували, чи можна замінити електролітичний чистий Ni при виготовленні мікроструктурованих деталей сплавом Ni-P. При дослідженні кінетики осадження покриття Ni-W встановлено, що утворюються плівки з вмістом вольфраму до 61 %.

Дослідження показують, що шорсткувата поверхня обкладених із сірчано-кислих розчинів нікелевих покриттів зумовлена накладанням на постійний струм струму змінної полярності. Незважаючи на прогресуючий розвиток нікелевих електролітів, домішки, як і раніше, підрозділяються за принципом дії на первинні, вторинні, вирівнюючі, антипітінгові і змочуючі; склад електролітів наводиться в огляді. Наведено склади розчинів для електрохімічного зняття (розчинення) покриттів Ni і Ni-P. Деякі публікації присвячені історії нікелювання.

Цинк і сплави цинку. Цинк, як і раніше, є «робочою конячкою гальванотехніки», хоча на даний час публікацій по цій темі небагато. Повідомляється про дослідження аномальних процесів при одночасному електролітичному оса-

дженні цинку з нікелем або кобальтом, які пояснюються зсувом потенціалу осадження цинку.

Покриття Zn-Ni виявляють важливу для облагороджування високоміцних металів властивість кадмієвих покриттів – обезводнюванні при низьких температурах, можливе завдяки мікрошорсткості їх ламінарної структури. У лужних електролітах для осадження покриттів Zn-Ni, що особливо підходять для цих цілей, утворюються цианіди Ni, що погано піддаються переробці, чому можна запобігти (уникнути) застосуванням напівпроникних мембран. Причина виходу з ладу безамонійних слабокислих електролітів цинкування полягає в тому, що емульсія органічних компонентів при 40°C і досить високій концентрації руйнується. Домішки ацетату натрію, хлориду амонію і алкілсульфонату натрію розширюють межі стійкості таких розчинів. Для того, щоб пояснити механізм дії функціональних груп при осадженні блискучих цинкових покриттів були проведені дослідження з додаванням органічних барвників.

Покриття благородними і іншими металами. Різноманітні відтінки і товщина золотих покриттів на сплавах нікелю зумовлені різними потенціалами, які можна уніфікувати травленням поверхні основи. Для осадження покриттів Au-Co в установках на стрічку розроблений слабокислий електроліт, що дозволяє отримувати особливо тверді покриття з вмістом Co від 0,25 до 0,3 мас. %. Золоті композиційні покриття з нанокристалічними алмазними частками мають підвищену зносостійкість, що поліпшується зі збільшенням вмісту алмазів, що залежать від рН і щільності струму .

Срібні покриття, майже ідентичні по властивостям отриманим з цианідних електролітів, осаджують з розчинів з білковою амінокислотою в якості комплексоутворювача; це відноситься і до попереднього сріблення. Запропонований безцианідний електроліт, що містить нітрат срібла, пірофосфат, сульфат амонію, а також нітрат калію. При осадженні на імпульсному струмі електроліт має добру покривну здатність.

Родієві електроліти на основі сульфатів дозволяють отримувати майже беспористі (малопористі) плівки, які можуть бути використані для захисту від зносу срібних контактів, аналогічно покриттям, осадженим із хлоридних розчинів. Плівки, що містять рутеній і його оксиди, можна застосовувати як дифузійний бар'єр для з'єднань (контактів) на друкованих платах. Досліджено механізм осадження покриття Pd-Co .

У відомих публікаціях представлена оглядова інформація про контакти, використовувані в електроніці і покриті благородними металами, а також наводяться вимоги до них і апробовані на практиці рішення.

Розроблено новий метод, що дозволяє отримувати олов'яні покриття з розміром зерен, у п'ять разів меншим у порівнянні зі звичайним, у результаті чого поліпшується спаювання. Досліджується вплив сульфат-іона на осадження олова з кислих електролітів. Зміна кольору (знебарвлення) після оплавлення олов'яних покриттів, застосовуваних для заміни олов'яно-свинцевих припоїв, робить непотрібним підшар Ni-P і застосування «сатинового» олова. Розроблено нові електроліти для осадження матового олова, що заміняє олово-свинець. В залежності від типу електроліту олов'яні покриття мають різні електричні і трибологічні властивості. Ці покриття використовуються для забезпечення необхідних властивостей електричних з'єднань (схем). Розроблено спосіб осадження корозійностійких покриттів Sn-Ni. Катодні плівки сульфідів олова для фотоелектрохімічних фотохімічних і фотокондуктивних гальванічних елементів осаджуються з водяного розчину хлориду олова і тіосульфату натрію на підготовлену поверхню скла. З метою нанесення покриттів олово-селен для сонячних батарей використовується так званий «тампонний» метод .

Для регенерації зношених деталей на їх поверхню осаджують пластичний (м'який) підшар заліза і твердий поверхневий шар зі спеціально розроблених сірчаноокислих електролітів. У результаті дослідження впливу різних складних (складових, комплексних) поверхнево-активних речовин на властивості електролітичного сплаву Ni-Fe показано, що основну роль грають функціональні

групи. Для захисту молібденових деталей при високому корозійному навантаженні розроблений метод нанесення вольфрамових покриттів з розплавів солей.

Хімічна металізація (хімічне осадження металів). В області безструмової металізації основний інтерес представляють хімічні нікелеві покриття, особливо функціональні композиційні покриття. Порівняльні дослідження показують, що такі покриття з металевими і керамічними частками різної величини можна отримувати не тільки хімічним, але й електрохімічним способом.

Розроблено електроліт для отримання гладких і таких, що мають гарну зносостійкість і корозійну стійкість, а також задану твердість композиційних покриттів Ni-P з частками TiO₂. Наночастки Al₂O₃ з розмірами від 50 до 300 нм збільшують твердість покриттів Ni-P, особливо після термообробки, що призводить до поліпшення розподілу часток у покритті. Включення часток Mo₂S роблять поверхні покриттів Ni-P більш гладкими і знижують їх твердість у тому ступені, що визначається складом електроліту і параметрами осадження. PTFE- (тефлонові) частки в покритті Ni-P поліпшують коефіцієнт тертя при одночасному зменшенні твердості, причому додавання фтормісткого змочувального агента до електроліту забезпечує рівномірний розподіл часток впродовж довгого часу.

Згідно директивам RoHS (обмеження використання небезпечних речовин) і ELV (End of life vehicle) розроблені електроліти для нанесення хімічних покриттів Ni-P без використання свинцю, як стабілізатора, і кадмію в якості блискоутворюючої домішки. Такі процеси дозволяють отримувати покриття з тими ж властивостями, що й у випадку застосування цих домішок, але вимагають більших витрат. З розчинів, що містять ацетат нікелю, гидразин і сахарин, можна осаджувати чистий нікель, що володіє доброю провідністю і поліпшеним зпаюванням. Серед сплавів нікелю становлять інтерес немагнітні плівки Ni-W-B. При вмісті вольфраму від 1,8 до 2,3 мас. % вони аморфні; наступна термообробка робить їх кристалічними внаслідок утворення бориду нікелю. Завдяки добрій термо- а також зносостійкості становлять інтерес покриття Ni-Mo-B, отри-

мувані з пірофосфатного електроліту з диметиламінобораном у якості відновника, причому вміст молібдену в цих покриттях складає від 11 до 22 мас. %. Для того, щоб досягти поставлених задач за допомогою функціональних хімічних нікелевих покриттів, потрібно виходити з прикладів використання їх у літакобудуванні і враховувати фактори, що впливають на їх подальший розвиток.

Так зване «динамічне хімічне осадження» полягає в тому, що розчини, які містять солі металів і відновник, наносяться на поверхню зі спеціальних розпилюючих пристроїв. При почерговому нанесенні міді і нікелю отримують особливо корозійностійкі багат шарові покриття. Отримані не відбиваючі світло чорні плівки Ni-P, застосовувані для виготовлення космічних апаратів, додатково їх піддають травленню в суміші кислот. Копії металевих поверхонь можуть бути отримані як електролітичним способом, так і хімічним осадженням металів, у цьому випадку перший шар повторює форму поверхні. Щоб отримувати на твердих пластинах гладкі щільні, компактні осадження, перед нікелюванням напилують хром і нікель товщиною до 300 атомних розмірів.

Конверсійні покриття. Найактуальнішою проблемою в області отримання конверсійних покриттів є заборона хрому (VI), насамперед це стосується процесів хромування цинку і його сплавів. Однак технології з використанням розчинів, з яких отримують покриття, порівнюючи з хроматними по захисній здатності, є значно більш дорогими. Проблемними є різьбові сполучення, оскільки різна твердість і коефіцієнти тертя безхромових покриттів не забезпечують виконання необхідних функцій, і більшість таких з'єднань необхідно перевіряти за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми. Ведуться подальші розробки, крім уже відомих, кобальтомістких електролітів для отримання товстошарових покриттів, а також фосфоромістких електролітів для чорного хромування з додатковим верхнім шаром покриття (Topcoat). Плазмові полімерні покриття на основі кремнійорганічних і фосфоромістких мономерів утворюються на поверхні цинку у вигляді дуже тонкого наносферу, яким заміняють конверсійні покриття, що застосовувалися до цих пір, особливо при насту-

пному лакуванні наноплівки. Аналогічним чином для наступної обробки підходить метод SAM (self-assembled monolayer – моношари, що самоорганізуються), а полімерний шар, що утворився раніше, слугує для поліпшення адгезії. Ведуться пошуки способів обробки після гарячого цинкування без застосування хрому (VI). Тим часом є досвід застосування на практиці дуже складного устаткування для безхромового пасивування деталей масового виробництва.

Повідомляється про заміну фосфатних покриттів, насамперед функціональних. Так, отримання залізофосфатних плівок при волочінні замінюють методом нанесення поліфосфатних покриттів при кімнатній температурі. Перед лакуванням замість залізофосфатних покриттів застосовують наноплівки товщиною від 10 до 30 нм, що отримуються при низьких температурах напилюванням, або зануренням.

Спостереження впродовж тривалого часу показують, що фосфатні покриття на основі марганцю підходять для таких дуже навантажених деталей, як сполучні муфти (втулки, розтруби) протяжних трубопроводів (комунікацій). Можна продовжити термін дії розчинів фосфатування, якщо шлам, що утвориться, видаляти центрифугуванням. Слід зазначити, що при електролітичному фосфатуванні не утворюється шлам. Повідомляється про промислове отримання залізофосфатних покриттів без стічних вод. У роботі описані нові технології травлення і пасивування нержавіючої сталі.

Емалювання. Завдяки гладкості і твердості емальованих поверхонь росте зацікавленість до застосування їх у техніці, а також в архітектурі. Розроблено емаль з діелектричними властивостями, що поліпшує корисні властивості кухонного посуду (блюд), у тому числі для грилю. В технології емалювання з'явився новий спосіб розрахунку колірних рецептур. Попередня обробка впливає на якість емалі. Зокрема, піскоструминна обробка з наступним оксидуванням поліпшує зчеплення емалі з литими виробами. Хімічна стійкість емальованих поверхонь, у тому числі в лужному середовищі, підсилюється після обробки в парах хлориду алюмінію. На ушкоджені емалі наносять наноплівки.

Гаряче цинкування є найважливішим способом захисту від корозії не тільки в будівельній справі, але і знаходить застосування в автомобілебудуванні. До негативних сторін цієї технології відносяться проблеми енергозбереження або регенерації енергії, яку намагаються вирішити, наприклад, шляхом ізоляції або застосування сорочок на ванни. В роботі досліджували вплив складу металу, що покривається, на процес гарячого цинкування, особливо домішок кремнію і фосфору в сталі.

Що стосується PVD/CVD-методів, то ці плазмові покриття ріжучих кромок інструментів, шестерень і ін. деталей можна удосконалити з урахуванням вимог сьогодення. Для цього, а також для активування поверхні пластмас і подальшого застосування, розроблене нове джерело плазми. Автори займалися вивченням потоків енергії в плазмових методах обробки поверхні. Для отримання люмінофорів застосовується порошкове напилювання в атмосферній плазмі. При взаємодії хромомістких покриттів з газоподібним азотом утворюються надзвичайно зносостійкі PVD-хром-нітридні покриття. Для запобігання окислювання титан-алюмінієвих покриттів на них наносять товстий шар алюмінію після фторування поверхні. Для інструментів, що знімають стружку, застосовують твердосплавні наноплівки (наприклад, AlTi), отримувані методом плазмового напилювання. Особливо стійкі до корозії стрічки (смуги), оцинковані або електролітичним способом, або гарячим цинкуванням, і покриті плівкою диоксида кремнію PVD-методом. CrAlNi-покриття зі спеціальним мастилом поліпшують трибологічні властивості шестерень. Плівки дисульфиду молібдену з підвищеним блиском можуть бути використані в космічній галузі. При порівнянні вартості різних методів нанесення покриттів на ободи автомобільних фар було виявлено, що дешевше всього обходиться отримання металевих покриттів осадженням з парової фази з наступною плазмовою обробкою для отримання захисного шару.

Дифузії корунду досліджували шляхом вивчення фазового складу легovanого нікелем цинкового покриття при дифузії корунду. Представлено модель

дифузії вуглецю в процесі газового науглерожування. У роботі досліджували метод термічного нанесення поверхневого шару за допомогою лазера. Перевагою цього способу є можливість селективної обробки. Азотовані в газовій фазі тверді хромові покриття мають високу твердість і зносостійкість. Процес загартування (зміцнення) і різання покриття здійснюється за допомогою лазера.

Описано погляд на застосування різних металевих покриттів, отримуваних металізацією напилюванням, для захисту від корозії, а також на вакуум-плазмове напилювання тугоплавких металів.

Органічні покриття. У різних публікаціях по даній темі простежений вплив типу лаку і його складу на стійкість і інші властивості лакових покриттів, а також на спосіб їх застосування. Для забезпечення особливо доброї стійкості до погодних умов отримано порошок для порошкового покриття на основі фторполімера. Порівняльні дослідження показали, що нанопігменти забезпечують найкращий захист від корозії.

Що стосується, власне, процесу лакування, то в цій області велика увага приділяється проблемам рентабельності у випадку великих деталей, при електростатичному лакуванні. Покращується економічність при зменшенні вартості продукції, що досягається шляхом точного дозування і змішування, а також при загальній оптимізації процесу й оптимальному розміщенні аплікаційних пристроїв. У гальванічних цехах заводів практичніше використовувати туби для спрощення процесу лакування, ніж пістолети-розпилювачі. Для керування і моделювання технологічного процесу створюється спеціальне галузеве програмне забезпечення, причому керування найчастіше здійснюється безпосередньо роботами. Деякі публікації присвячені вивченню проблем електролітичного нанесення покриттів. Обговорюється якість і її контроль при лакуванні. При нанесенні покриттів розпиленням важлива вірно організована фільтрація, причому пластмасові деталі лакують в імпульсному режимі (періодична подача); обробка великих деталей має свої особливості, для захисту від корозії застосовують багатошарові напилювані покриття.

Витрата повітря і швидкість потоку, поряд з іншими параметрами, визначають якість продукції і рентабельність при нанесенні покриттів розпиленням. Особливо економічне отримання спечених покриттів розміщенням деталей у розплавленому під впливом струму шарі порошку. Розроблено новий метод, що дозволяє кількісно визначати найважливіші властивості поверхні перед напилюванням. Для декоративних поверхонь різного зовнішнього вигляду є спеціальні види порошоків.

У нових технологічних процесах висушування або випалювання реалізується лазером, ультрафіолетовими променями й опроміненням у ближній інфрачервоній області. Видалення лакового покриття рентабельно здійснювати за допомогою лазера, але можна також використовувати хімічні реагенти, струминну або вологу обробку. У роботі порівнюються різні методи знімання лакових покриттів, у тому числі кріоскопічні.

Що стосується застосовуваного устаткування, то описані модульні гнучкі установки для малих і середніх підприємств, а також для виробництва спеціальної продукції, імпульсні пристрої (Tipps) для недорогого лакування дрібних деталей масового виробництва, для оптимізації установок, для необхідної (на замовлення) вентиляційної системи і для обслуговування установок. Широко застосовуються роботи, що дозволяють автоматизувати нанесення лакових покриттів.

SIGA технологія. Технологія розроблена в Німеччині приблизно 30 років тому. Аббревіатура означає – рентгенолітографія, гальваніка і формування. Сутність процесу полягає у використанні рентгенівського випромінювання від синхротрона для отримання глибоких, з прямовисними стінками топологічних картин у полімерному матеріалі. Випромінювання синхротрона має надмалий кут розходження пучка. Джерелом випромінювання є високоенергетичні електрони (енергія $E > 1 \text{ Гев}$), які рухаються з релятивістськими швидкостями. Глибина проникнення випромінювання досягає одиниць міліметрів. Це зумовлює високу ефективність експонування при малих тимчасових витратах (рис. 3.21).

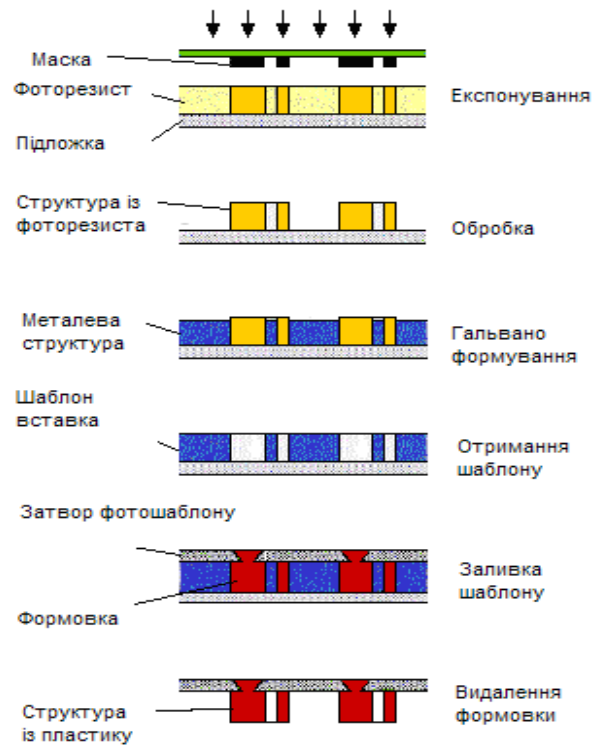


Рис. 3.21. Етапи SIGA технології.

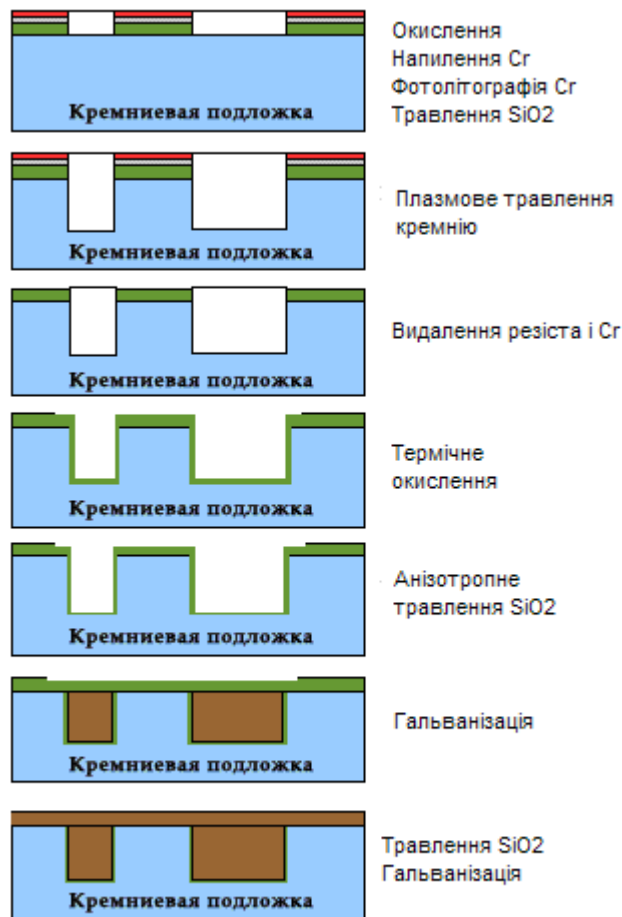


Рис. 3.22. Етапи SIGA- технології

У зв'язку з мініатюризацією виробів за допомогою покриттів можна змінювати не тільки властивості поверхні, але й створювати елементи MEMC.

MUMPs – аббревіатура, що означає MEMC технологію, яка має багато користувачів – це дуже відома комерційна програма, що надає розроблювачу рентабельний доступ до поверхневої механічної обробки. Ця програма, запропонована винятково Cgopos, призначена для надання універсальної мікрообробки різним користувачам, які бажають проектувати і виготовляти MEMS пристрої. Вона почала використовуватися з грудня 1992 року. Цей процес можна вважати трампліном для того, щоб проектувати і перевіряти дослідні зразки MEMC пристроїв і прискорювати процеси розвитку виробу. MUMPs – це процес 3-х шарової полікристалічної поверхневої мікрообробки. Докладно етапи MUMPs представлені на малюнку (рис. 3.22).

3.6. Струминна мікрообробка

У зв'язку з загальною мініатюризацією компонентів традиційні процеси механічної обробки починають в окремих випадках працювати на межі, тому потрібно використання інших технологій, можливості яких ширші, ніж у механічної обробки. До числа таких технологій відноситься водо- і абразивноструминна обробка, за допомогою якої можна отримувати деталі винятково малих розмірів і досить складної форми, наприклад зубчасті колеса. Її використання почалося в 70-х роках ХХ століття, а в 80-х до водяного струменя почали домішувати абразив. За допомогою водяного струменя середнім діаметром 0,08 мм, поданого під тиском порядку 350 МПа, на одній зі спеціально розроблених німецькою фірмою Uhde Hochdrucktechnik установок для водоструминної обробки з листа алюмінієвого сплаву товщиною 0,85 мм були вирізані зубчасті колеса діаметром порядку 0,8 мм із шістьма зубами (мал. 3.23).

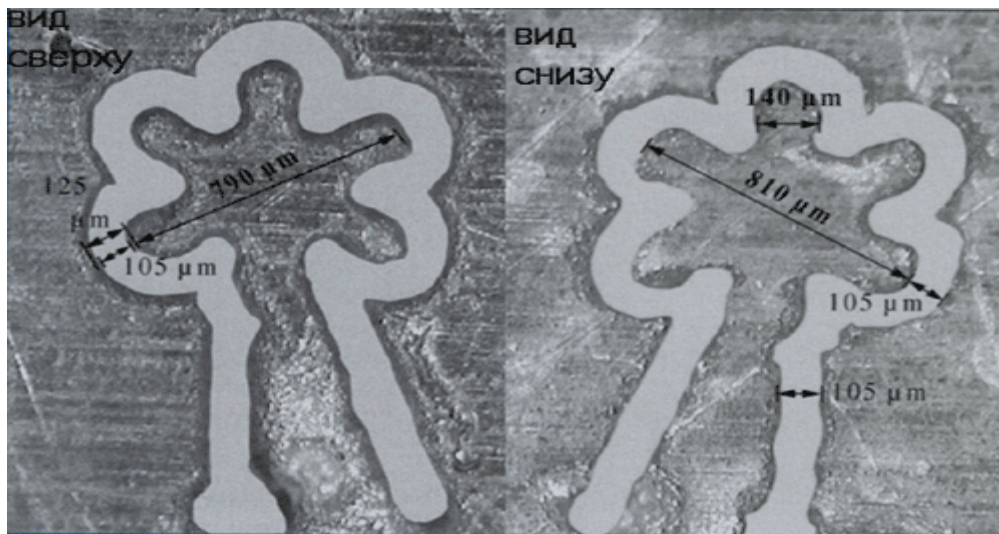


Рис. 3.23. Струминна мікрообробка

Точність цієї вирізки очевидна з рисунка. Це стало можливим у результаті відсутності у водяного струменя безпосереднього контакту із заготовкою (вона знаходиться від голівки, що ріже, на відстані 1-2 мм):

у процесі різання практично не виникає теплових явищ, а разом з ними і структурних змін в матеріалі заготовки;

досягаються висока повторюваність профілів, що вирізуються, паралельність кромek пропилу, а також висока якість розрізуваної поверхні.

Стосовно до мікрообробки струминна обробка не має такої можливості отримання деталей з дуже малими розмірами, як лазерна. Проте, крім вищесказаного, є ряд практичних прикладів її використання, особливо в медичній промисловості.

Таблиця порівняння різних видів мікрообробки

Параметри	Різання інструментами з геометрично визначеною крайкою, що ріже		Шліфування	Електроерозійна обробка		Обробка методом пластичної деформації		Лазерна обробка	Струминна обробка	Ультразвукова обробка
	амазними	Твердоплавними		вирізка	прошивання	обробка	формування			
Переваги	Можливість отримання тривимірних поверхонь, висока геометрична гнучкість		Висока якість поверхні і висока точність геометричної форми	Можливість обробки дуже твердих матеріалів		Економічно ефективно виготовлення великих партій, велика різноманітність оброблюваних матеріалів, особливо полімерів		Можливість обробки дуже твердих матеріалів	Можливість виготовлення без заусе-нців дуже дрібних деталей з різних матеріалів	Малі зусилля різан-ня і можливість обробки безлі-

									чі по-рож-нин	
Недолі-ки	Сліди обробки на поверхні, труднощі виготовлення дуже малих отворів і внутрішніх структур		Труднощі отри-отри-мання дуже малих внутрі-шніх елемен-тів і не-мож-ливість отри-мання отворів	Не дуже висока якість отриму-ваної поверхні, мала продуктив-ність		Виготовлення тільки інстру-ментів і прес-форм		Утво-рення заусен-ців і на-пливів на пове-рхні де-талей, недо-статньо висока якість поверх-ні	Високі експлуата-ційні ви-трати	Мала про-дук-тив-ність
Оброб-лювані матері-али	Ніке-леві спла-ви, ла-тунь, алю-міній, плас-тмаси, скло	Сталь, кераміка, графіт	Керамі-ка, тве-рді сплави, скло	Метали і керамі-ка		Ме-тали	Поліме-ри (ме-талеві порош-ки)	Метали, керамі-ка, скло, поліме-ри, на-пів-провід-ники	Практично будь-які	Скло, кера-міка, крем-ній, гра-фіт
По-довжні	10-1000	10-2000	20-50	20-40	0,2-50	0,2-115	0,3-50	0,6-40	3,0-30	

розміри оброблюваних деталей, мкм										
Можливість отримання необхідних геометричних параметрів	Гарна	Достатня	Достатня	Гарна	Задовільна	Гарна			Задовільна	
Шорсткість, що досягається, Ra, мкм	0,01	0,3	0,1-0,02	0,04 - 0,06	0,2-0,3	Немає звендень	Менш 0,05	Не гірше 0,1	0,08-0,1	0,1-0,15
Експлуатаційні якості	Гарні		Досить високі	Задовільні		Гарні		Достатні	Достатні	Задовільні
Області за-	Прес-форми і складні деталі	і	Складні деталі	Прес-форми і складні деталі	і	Дрібні і великі серії	Медицина і	Складні деталі	в	

стосу- вання					біологія	різних га- лузях	
-----------------	--	--	--	--	----------	---------------------	--

3.7. Мікроштампування й формування

На сьогоднішній день мікроформування є найбільш оптимальною технологією виробництва мікродеталей, зокрема для масового виробництва, тому, що вона потрібна в багатьох індустріальних виробництвах. У порівнянні з іншими виробничими технологіями мікроформування має економічні й екологічні переваги.

Тенденція в напрямку до подальшої мініатюризації, зокрема в сфері виробництва електроніки, як і в інших галузях подібно мікросистемній технології або в медичному секторі, все ще незмінна. Мобільні телефони стають все меншими і з кожним новим поколінням додаються нові функції і mp3-плеєри. Нещодавно були представлені наручні годинники із вбудованою цифровою камерою і мікро твердий мікродиск з об'ємом одного Гігабайта, що може поміститися в яєчній шкарлупі (рис. 3.24).



Рис. 3.24. Мініатюризація: жорсткий диск, ємність один Гігабайт (IBM)

Завдяки дуже великим об'ємам електронної продукції, формувальні процеси відіграють важливу роль у цьому секторі відтоді, як вони стали переважаючими. Типовими процесами в роботі з мікролистами металу є вирубка і згинання. З'єднувачі, контактні пружини і ребриста рама виконуються цими операціями. Рис. 3.25 показує ребристу раму і її внутрішні ребра (212 ребер), що зроблені вирубкою. Внутрішні ребра будуть з'єднані з чипом, що розміщується посередині ребристої рами за допомогою дротових з'єднань, і повна установка буде схована. Товщина і крок листа, що є відстанню між серединою двох сусідніх ребер, складають 150 нм і 168 нм відповідно. Листовий матеріал (звичайні мідні сплави і сплави FeNi), використаний для цих процесів, як правило, знаходиться в стані жорсткої пружини для запобігання зморщування і зминання. Частини залишаються з'єднаними з листовою смугою поки остання формувальна дія, що полегшує обробку і регулювання завдяки руху смужки проти закупорювань і налагодження цього з експериментальними штампами. Залежно від складності частин від 160 (у випадку дуже якісної ребристої рами) аж до 2000 частин за хвилину (частини з простими формами) може вироблятися з високою продуктивністю.

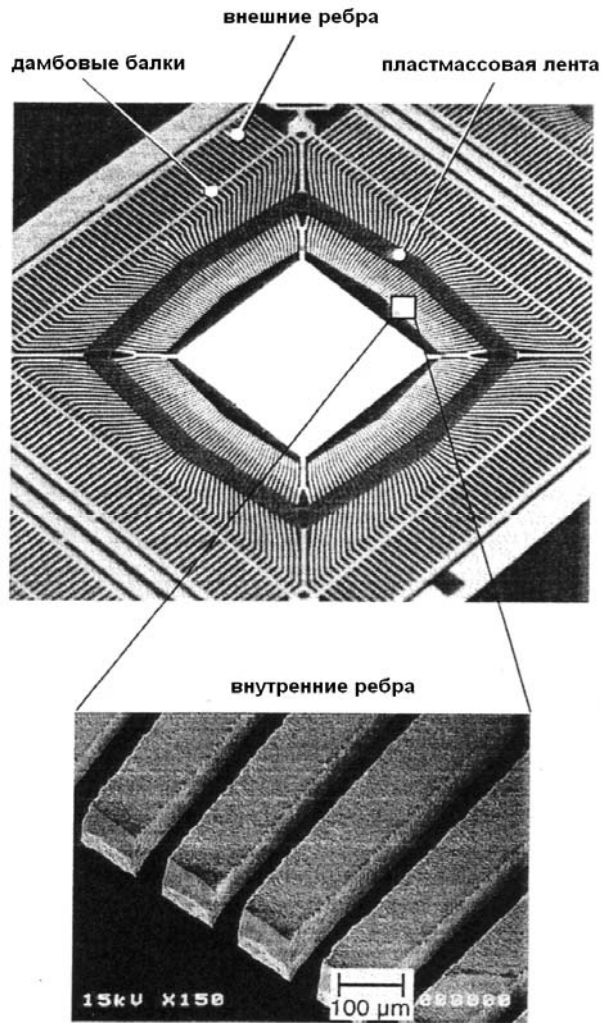


Рис. 3.25. Мікроформа, отримана мікроштамповкою

Ще одним процесом вирубки є зрізання ріжучих лез для шеверів і пресування отворів, наприклад для паливних насадок двигунів. Сьогодні діаметр найменшого отвору складає близько 50 нм, обмежений здебільшого інструментом. Досяжний діаметр також залежить від листової товщини. Для сталі мінімальне співвідношення між отвором діаметром d і товщиною листа t знаходиться, звичайно, в амплітуді $d/t = 0,5$ до $1,0$.

Іншим процесом по роботі з мікро листами металу є згинання і глибока витяжка. Приклади продукції - гільзи для електронного кольорового TV (рис. 3.26) або поршень маленьких двигунів (рис. 3.27).

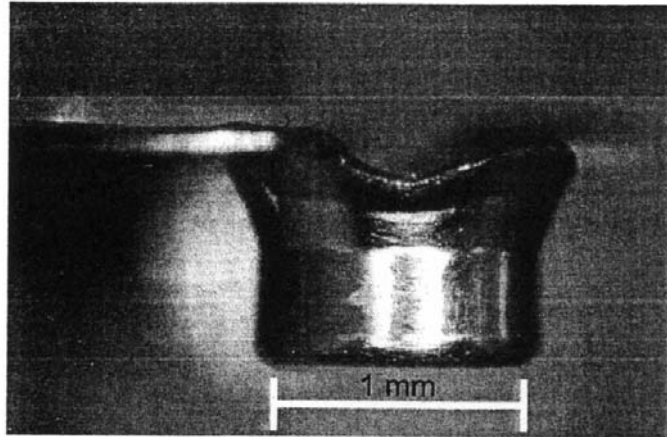


Рис. 3.26. Гільза для електронної променевої гармати

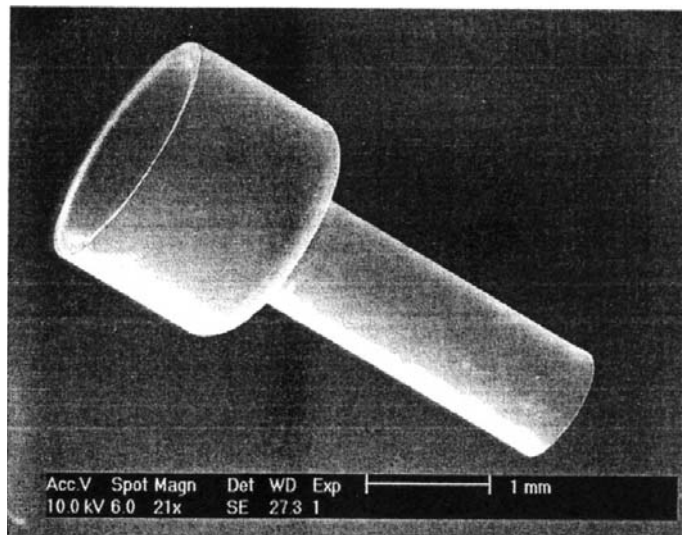


Рис. 3.27. Поршень мікродвигуна

Були проведені дослідження ефектів мініатюризації на різних етапах видавлювання. Результати представлені на рис. 3.28. Зразки показують бажану форму і співвідношення висоти і довжини вала заготовки, яка дорівнює 0,4, а також товщину стінок видавлюваного циліндра.

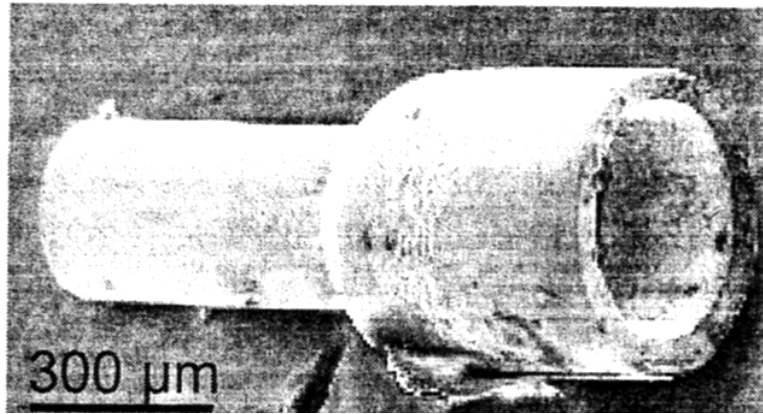


Рис. 3.28. Вал, зроблений видавлюванням: початковий діаметр: 0,5 мм, стінка - товщина: 50 нм

У розширенні можливостей використання металформовочної технології щодо мікроскопічних деталей макроскопічної продукції, процес карбування відіграє важливу роль через його високу точність і високоефективність.

Великі дослідження по карбуванню листів алюмінієвого матеріалу виконали Аїк і Пласак. Гвинторізна голівка, що чеканить, з діаметрами отвору з 0.05 до 1.6 мм була використана, щоб чеканити лист чистого алюмінію товщиною 2 мм і діаметром 30 мм. Результати були оцінені в термінах коефіцієнта стиску сформованого, в залежності від діаметра отвору, радіальної позиції отвору на гвинторізній голівці. Важливий процес, подібний до карбування, - зміна зовнішніх властивостей, через передачу однорідно розповсюджену поверхню мікрогеометрії інструмента до листа.

З метою встановлення мікроформувальних технологій для деталей МЕМС таких як, наприклад, мікромеханізми, Saotome і інші, досліджуване суперпластмасове видавлювання.

Штучний ІНТЕЛЕКТ-78ZN був використаний, щоб робити мікровали механізму з модулем 10 нм і з циклом кроку 100 нм, матеріал якого має переваги зміни під дуже низьким тиском порівняно з умовною пластиковою деформацією. Зразки з початковим діаметром 0,5 мм були розміщені в гарячому кон-

тейнері і видавлені лінійним приводом у вакуум або аргонову газову атмосферу з температурою нижче 520 К. Як мінімум 200 МПа потрібно для видавлювання валів механізму з довжиною більш ніж 0,5 мм. Гладка поверхня виходить при тиску 300 МПа, тоді, як збільшення тиску до 400 МПа призводить до грубої поверхні. Це пояснює той факт, що використаний матеріал має порожнечі (внутрішні дефекти) у межах грануляції при високих напругах.

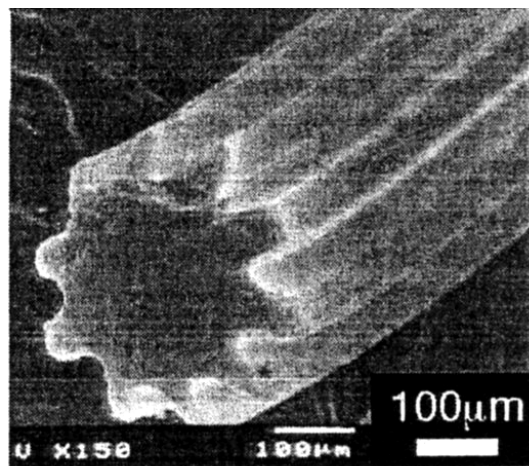


Рис. 3.29. Екструзія прутків

Saotome і Inoue також досліджували видавлювання аморфного сплаву $\text{La}_{65}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{20}$ у переохолодженому рідкому стані, коли виникає досконалий Ньютонівський потік і чудову мікроштампувальність. Мікрочастинки механізму з модулем 50 нм і кроком 500 нм вироблялися при температурі 500 К як поредовим так і зворотним виштовхуванням (рис. 3.29).

Мікрозгинання – процес, який часто використовується для виробництва пружин, затискачів і з'єднувачів. Однією з характеристик таких електронних деталей є те, що ширина деталі в межах амплітуди товщини деталі (рис. 3.30). Це означає, що умовні моделі і 2D FE-simulations, що приймають на себе умови плоского натягу в перекрученій площі, не можуть бути застосовні. Тому, експерименти з вузькими смугами були здійснені і модель була створена для плоского деформування. Анізотропія матеріалу починає відігравати вже більш значну роль, ніж в умовних формувальних процесах. Наприклад, згинання пружини

ни більше, коли деформація йде уздовж горбистого напрямку, ніж коли цей прогин - перпендикулярний. Різниця знаходиться в амплітуді 5° , в залежності від матеріалу і геометрії інструмента.

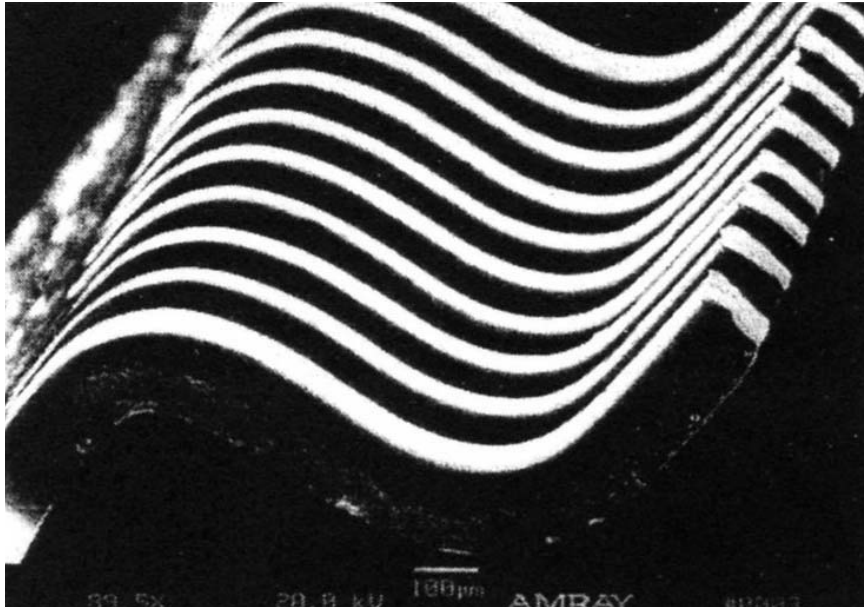


Рис. 3.30. Вигнута провідна структура

Для виробництва мікроінструментів необхідно використовувати дуже тонкі дротові матеріали, через дуже маленькі контури і радіуси.

Іншим умовним виробничим методом для виробництва дуже точних інструментів є шліфування. На рис. 3.31 показаний пуансон діаметром 60 нм для пробивання мікроотворів.

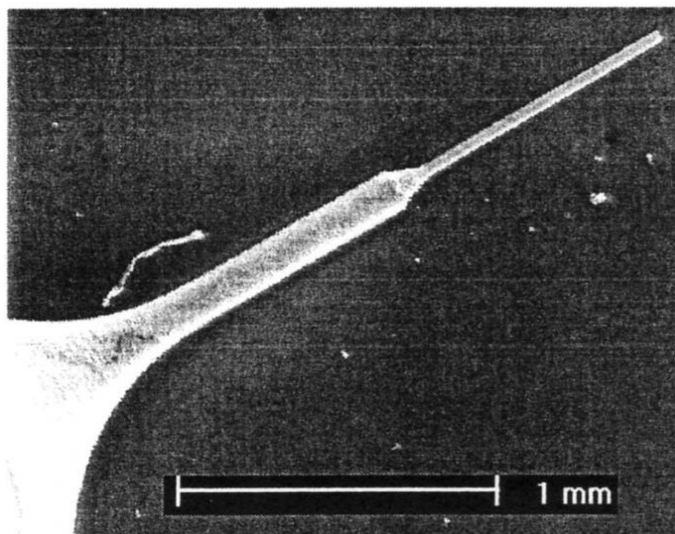


Рис. 3.31. Пуансон для пробивання отворів діаметром 60 нм

Говорячи про мікроустановки потрібно розрізняти умовне устаткування, що створюється під продукцію мікродеталей і устаткування нормальних розмірів. До першої категорії потрібно віднести BSTA від BRUDERER, що відрізняються високою швидкістю штампування.

Прототип другої категорії, що широко використовується для мікроштампування, був розроблений WAFIOS і LFT Erlangen. Устаткування має модульну структуру, де кожний штамповочний модуль має свій індивідуальний привід і може керуватися незалежно від інших. Інший прототип з модульною структурою, у даний момент розроблюваний SCHULER у кооперації з Дармштадтом PTU, використовуючи лінійні приводи для переміщення штампів. Лінійні приводи мають переваги дуже високої точності штампування, не мають потреби в змащуванні, мають низький шумовий ефект і високу надійність. Дуже важлива чистота приміщень для мікроштамповки. Тому, додаткова мета для майбутнього – зменшення розміру преса. Такий прес представив Університет Gunma. Рис. 3.32 показує машину, що була розроблена для суперпластичного прямого видавлювання мікрочастин.

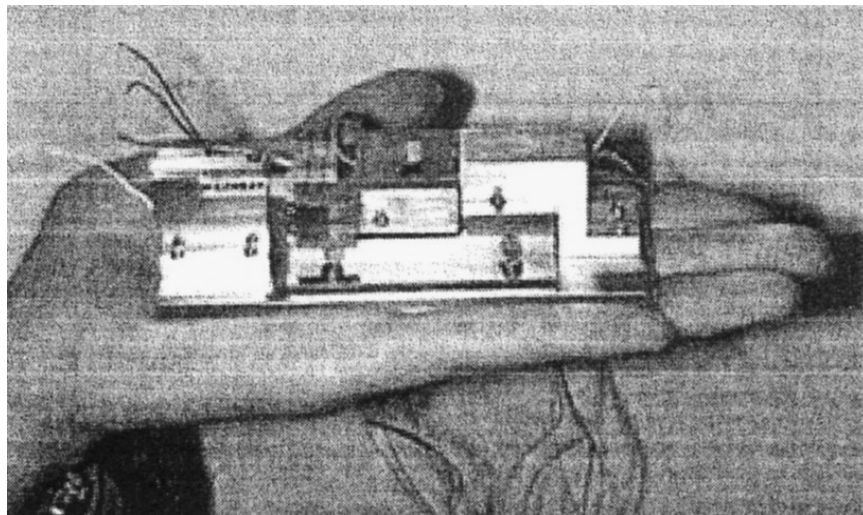


Рис. 3.32. Мікроустановки для суперпластичного видавлювання
(університет Gunma)

Для багатьох видів продукції масове виробництво є найбільш доцільним. Такі процеси як пресування і лиття найбільше підходять для цього. Вимогою для застосування цих процесів для мікроформування – це виготовлення мікроформи. Мікроформа може бути виготовлена за допомогою інших мікрообробних процесів, таких як EDM, LBM, USM і обробка різанням.

У цих процесах необхідною умовою для мікрообробки є висока точність мікропресформи. Найважливішою вимогою до форми є те, що вона повинна бути розріджена, оскільки вентилявання впродовж пресування є неможливим для таких мікропорожнин.

Розміри виробів після процесу виготовлення відповідають технічним умовам, але через якийсь час виникають деформації від залишкових напруг, зміни температур, хімічної взаємодії і стискання після випалу.

Інжекторне формування металу і інжекторне формування кераміки – не давно розвинені методи. Суміш порошку металу або кераміки зі зв'язуючим матеріалом впорскується у форму. Після пресування готові деталі виймаються й випалюються.