

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Пухальська Г.В.

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

**“Зміцнюючі технології у виробництві деталей машин”**

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
освітньої програми «Технології машинобудування»  
усіх форм навчання

2024

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни “Зміцнюючі технології у виробництві деталей машин” для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська .– НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 47 с.

Укладач: Пухальська Г.В., к.т.н., доцент кафедри ТМБ

Рецензент: Козлова О.Б., к.т.н., доцент кафедри ТМБ

Відповідальний за  
випуск Дядя С.І., к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Затверджено на засіданні кафедри  
«Технологія машинобудування»  
протокол № 1 від 06.08.2024 р.

Рекомендовано до видання  
НМК МФ  
протокол № 1 від 27.08.2024 р.

## ЗМІСТ

1	Причини руйнування деталей машин.....	4
2	Методи підвищення надійності деталей машин.....	6
3	Оздоблювальні методи обробки.....	7
4	Властивості поверхневого шару деталей машин.....	12
5	Наклеп поверхневого шару.....	16
6	Методи визначення глибини наклепу.....	18
7	Алмазне вигладжування.....	23
8	Вібровигладжування і віброобкатування.....	30
9	Віброударна обробка	34
10	Методи дослідження залишкових напружень	40
11	Інструменти і робочі тіла, що використовуються при ППД	44
12	Робочі тіла і робочі середовища для ударних методів ППД	45
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	47
	.....	

## 1 ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аналіз відмов газотурбінних двигунів в процесі експлуатації показує, що більшість пошкоджень деталей носить втомний характер, тому проблема забезпечення їх несучої здатності має важливе значення. Безперервно зростають вимоги до надійності і матеріаломісткості ГТД, все більш жорсткими стають умови роботи і режими експлуатаційної навантаженості. При створенні нових двигунів доводиться стикатися з необхідністю забезпечення максимального резерву міцності кожної деталі з урахуванням умов експлуатації і конструктивних особливостей.

Найбільш навантаженими і важкооброблюваними деталями є лопатки, вали, диски. В процесі роботи двигуна ці деталі піддаються впливу знакозмінних і відцентрових навантажень, додаткових навантажень від високочастотних вібрацій. На лопатках, що експлуатуються в несприятливих умовах, розвивається ерозія і утворюються механічні пошкодження у вигляді точкових забоїв і вм'ятин. В процесі експлуатації є випадки поломки лопаток при зіткненні зі сторонніми предметами (птиці, град та ін.)

Умови роботи цих деталей змушують пред'являти до матеріалів і властивостей поверхневого шару дуже високі вимоги. Слід зазначити, що ці деталі є тонкостінними і мають велике число концентраторів напружень у вигляді галтелів, отворів і ін. Їх виготовляють з високолегованих сталей, титанових і жароміцних сплавів, чутливих до конструктивних і технологічних концентраторів напружень. Зародження втомної тріщини зазвичай починається з поверхні через те, що тут виникають найбільші циклічні напруги при вигині, крученні, концентрація напружень від різних дефектів поверхні. Тому від якості поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості - опір втоми, зносостійкість, корозійна стійкість, опір контактної втоми та ін. Оптимальна поверхня повинна бути достатньо твердою, повинна мати стискаючи залишкові напруги, мелкодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей. За допомогою широко застосовуваних методів остаточної обробки (шліфування; хонінгування і доведення) створюється необхідна форма деталей із заданою точністю, але часто не забезпечується оптимальна якість поверхневого шару. Вона досягається поверхневим пластичним деформуванням (ППД), при якому стружка не утворюється, а

відбувається тонке пластичне деформування поверхневого шару. В результаті зміцнюється поверхневий шар, підвищується зносостійкість, стійкість до корозійних впливів і т.д. У багатьох випадках застосування ППД вдається підвищити запаси міцності деталей, що працюють при змінних навантаженнях, в 1,5-3 рази і збільшити термін служби деталей в десятки разів.

### **Причини руйнування навантажених деталей ГТД.**

Найбільш часто руйнування відбувається:

а) в місцях концентрації напружень від змінних навантажень, тобто експлуатаційні напруги перевищують допустимі для даної деталі.

Причини:

- недосконалість методики розрахунку напружень;
  - не враховано можливі перевантаження матеріалу деталі в експлуатації (під час зльоту і посадки вібрації - збільшення навантаження, зношування матеріалу);
  - можливі технологічні дефекти в місцях концентрації напружень. Основні концентратори: галтелі з малими радіусами; отвори біля галтелів, різьові елементи, шліци і т.д.
- б) в місцях максимальних напружень - виникають від експлуатаційних навантажень при відсутності концентраторів напружень.

Причини:

- недосконалість при проектуванні методики розрахунку запасу міцності (врахували не всі види навантажень);
- руйнування від високих контактних напруг, що супроводжуються розвитком фреттинг - корозії з подальшим утворенням мікротріщини - первинного вогнища руйнування (контакт 2-х деталей - відбуваються мікропереміщення 2-х поверхонь відносно один одного).

Спостерігаються в шліцьових з'єднаннях, підшипниках кочення, замків лопаток. Для усунення цього процесу необхідно підбирати сумісні матеріали, застосовувати МОР і мастило, різні покриття.

- в) руйнування від невиявлених дефектів в матеріалі заготовок деталей:
- неметалеві включення;
  - окисні плівки і ін.

## 2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Розрізняють: конструкторські, металургійні, технологічні, експлуатаційні.

Металургійні:

- суть полягає в підвищенні міцності матеріалу шляхом електрошлакового і вакуумно-дугового переплаву;
- розробка прогресивних методів отримання заготовок: з текстурою і напрямком волокон, відповідних конфігурації деталі, що виключають утворення пористості та інших дефектів в матеріалі;
- підвищення якості заготовок за рахунок надійного контролю: рентгенівський, ультразвуковий, методи кольорової дефектоскопії;
- вибір оптимальних режимів т/о.

Конструкторські:

- вибір матеріалу деталі з високими характеристиками міцності; корозійної стійкості; циклічної міцністю і зносостійкістю;
- виключення елементів конструкції - можливих концентраторів напружень в найбільш «небезпечних» місцях при експлуатаційних навантаженнях (радіуси переходів малих розмірів; радіальні отвори у галтелях; канавки для виходу різі та ін.);
- розробка оптимальної конструкції деталі;
- призначення оптимальної точності і якості поверхні, що дозволяють використовувати оздоблювально-зміцнюючі методи обробки.

Технологічні - повинні забезпечити сприятливі характеристики поверхневого шару:

- невелику шорсткість і сприятливий мікрорельєф з «великими» радіусами дна западин - малої концентрації напружень;
- забезпечення заданого ступеня і глибини наклепаного шару (підвищується твердість за рахунок пластичної деформації);
- наведення залишкових напружень стиску, особливо в місцях концентрації напружень.

Експлуатаційні:

- своєчасне проведення регламентних робіт з метою виявлення пошкоджень на ранній стадії; своєчасні і якісні ремонти з метою відновлення: геометрії; точності; якості поверхні; міцності деталей.

### 3 ОЗДОБЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ

Призначені для поліпшення шорсткості поверхні (зменшення висоти мікронерівностей, отримання мікрорельєфу з великою площею контакту і великими радіусами дна западин - знижує концентрацію напружень).

Ці методи поділяються:

- абразивно-механічні - засновані на знятті мікронерівностей поверхні за допомогою абразивних зерен;
- електрофізичні - електрохімічне полірування засноване на «розчиненні» вершин виступів мікропрофілю речовинами більш високої щільності струму на вершинах виступів;
- електромеханічні - електроферромагнітне полірування, сутність якого полягає в знятті шорсткості абразивним магнітним порошком в магнітному полі.

I метод: *суперфінішування* - надтонка обробка; знімається припуск 0,005-0,007 мм, тобто в межах допуску на попередню обробку (шліфування, тонке точіння). Утворюється шорсткість  $Ra = 0,2 \dots 0,025$  мкм. Похибки попередньої обробки не усуваються. Параметри наклепу і залишкових напруг залишаються сформованими при виконанні попередньої обробки. При обробці при постійному навантаженні на бруски відбувається «зрізання» вершин мікронерівностей, при цьому збільшується контактна площа несучих поверхонь до 30%. Застосовується для оздоблювальної обробки поверхонь тертя навантажених валів.

II метод: *хонінгування* - застосовують для оздоблювальної обробки отворів в валах і корпусних деталях.

Завдяки своєрідної кінематики брусків хона, відбувається перетин слідів абразивних зерен, утворюючи дрібну сітку рисок, що поряд з високою чистотою, добре утримує мастило. Припуск на діаметр - 0,01 ... 0,2 мм. - залежить:

- від розміру отвору;
- оброблюваного матеріалу;
- попередньої обробки (розгортання; тонкого розточування; шліфування).

Хонінгування забезпечує:

- точність розмірів - 4...6 квалітет;
- шорсткість -  $Ra = 0,8 \dots 1,0$  мкм.

Цей спосіб усуває похибки форми - конусність, овальність в межах знімаемого припуску.

III метод: *притирання* - застосовують в якості тонкої абразивної обробки зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь, плоских і фасонних поверхонь. Метод забезпечує:

- точність форми і розмірів в межах до 0,001 мм, що відповідає 4-му квалітету;

- шорсткість поверхні -  $Ra = 0,1$  мкм.

Попередня обробка - точна: шліфування, тонке точіння, розточування, розгортання, що знижує час притирання. Притирають точні поверхні валів, з метою забезпечення точності посадки.

IV метод: *електроферромагнітне полірування* - абразивно - магнітна суміш утримується магнітним полем в робочому зазорі - між поверхнею деталі і полюсами електромагніту. Припуск на сторону 0,32 ... 0,16 мкм. Повністю відсутній тиск на оброблювану поверхню і тепловий вплив. Точність забезпечується попередньої обробкою. Шорсткість досягається  $Ra = 0,08 \dots 0,05$  мкм. Продуктивність висока. Доцільно застосовувати для остаточної оздоблювальної обробки зовнішніх циліндричних і фасонних поверхонь.

V метод: *обробка псевдо - зрідженим абразивом /ПЗА/*. Застосовують для зменшення шорсткості, зняття задирок і округлення кромки на деталях складної форми з важкодоступними елементами конструкції: дисках компресора і турбін, зубчастих колесах, валах, корпусних деталях з різних матеріалів. Абразивний матеріал - склад і розмір, підбирається в залежності від:

- розмірів, конфігурації і матеріалу деталі;

- виду операції: підвищення частоти, зняття задирок, скруглення крайок в пазах дисків для кріплення лопаток;

- заданої шорсткості.

Абразив в робочій ємності знаходиться у вільному стані і приводиться в рух стисненим повітрям. Інтенсивність руху встановлюється тиском повітря і розташуванням сопел. Для скорочення тривалості операції і рівномірної обробки поверхонь, деталі обертають за допомогою електроприводу. Режим визначається:

- часом обробки (тривалістю);

- видом і розміром абразивного зерна.

Практично без силового і теплового впливу на поверхню; виключається вплив суб'єктивного фактору на рівномірність обробки.

Точність обробки забезпечується при виконанні попередніх операцій.

VI метод: *полірування*- застосовують:

- для видалення слідів - рисок від попередньої обробки: шліфування, чистового точіння, фрезерування - різких концентраторів напружень, що знижують характеристики міцності матеріалу;
- зменшення шорсткості;
- видалення дефектного шару від попередньої обробки: мікротріщин, наводороженого матеріалу, окислювальних легуючих компонентів.

Всі методи зменшують шорсткість поверхні, але не підвищують точність, яка залежить від попередньої обробки. Висоту мікронерівностей можна зменшити до  $Ra = 0,16 \dots 0,025$  мкм. Точність - визначається допуском на остаточний розмір деталі.

Припуск - передбачається тільки для відповідальних деталей: лопаток, дисків, валів величиною  $0,02 \dots 0,04$  мм. В інших випадках в межах допуску на розмір.

Механічне полірування здійснюється:

- полірувальними м'якими колами;
- абразивним полотном (стрічкою).

Розрізняють:

- ручне полірування полірувальними колами - на полірувальних бабках і за допомогою пневмодрелі (деталі складної форми);
- машинно - ручне - абразивним полотном на верстатах токарної групи - поверхонь обертання зовнішніх і внутрішніх, валів, втулок;
- машинне - обробка нескінченної абразивної стрічкою на верстатах токарної групи (валів, втулок і ін.).

При ручному поліруванні м'якими полірувальними колами з нанесеним абразивом або хімічно - активних паст отримують несприятливий мікрорельєф поверхні з малими радіусами дна западин (різкими концентраторами напружень). Не виключається внаслідок неконтрольованого режиму утворення «прижогів» (структурних і фазових перетворень, що супроводжуються наведенням несприятливих напруг, що розтягують, знижують несучу здатність матеріалу). Застосування його так само доцільно обмежувати через велику трудомісткість і низьку культуру праці і при можливості замінювати оздоблювальної обробкою в ПЗА; машинно-ручним і

машинним поліруванням. В останньому випадку режим контролюється:

- видом і розмірами абразивного матеріалу;
- тиском стрічки на оброблювану поверхню;
- швидкістю різання - руху абразивної стрічки;
- швидкістю обертання деталі;
- тривалістю полірування - машинним часом.

При цьому практично виключається вплив суб'єктивного фактора - виконавця на формування стабільної якості поверхні.

VII метод: *гідро-абразивне полірування* - обробка в струмені абразивної рідини. Складних фасонних і внутрішніх поверхонь деталей. Підвищує чистоту поверхні до  $Ra = 0,63 \dots 0,10$  мкм. Точність - в межах допуску на розмір від попередньої обробки.

Недоліки:

- нерівномірний з'їм металу - процес важкоконтрольований;
- сприяє розвитку корозії.

Висока продуктивність.

VIII метод: *об'ємне полірування*.

Застосовують для порівняно невеликих деталей. Отримана чистота -  $Ra = 0,32 \dots 0,10$  мкм.

Попередня обробка:

- а) шліфування - звичайне, стрічкове;
- б) об'ємне віброшліфування.

Виконують на вібраційних установках, в контейнерах з вільним абразивним матеріалом: биті відходи кіл, мармурова крихта і т.п. Наповнювач - вода з хімічно активними добавками. Деталі невеликих розмірів завантажуються в «навал» партіями; великих розмірів - кріпляться в контейнері нерухомо або з обертанням щодо своїх осей. Амплітуда і тривалість обробки встановлюється дослідним шляхом. Процес високопродуктивний, стабільний. Недоліки - нерівномірний, важко контролюваний з'їм металу.

IX метод: *електролітичне полірування*. Здійснюється в електролітичних ваннах. Полірована деталь - анод. Катод зазвичай виготовляється з важкорозчинних в кислотах матеріалів - свинцю, нержавіючої сталі і т.д.

Склад електроліту і режим електролітичного полірування:

- щільність струму ( $a/dm^2$ );
- температура електроліту;

- тривалість (час) полірування - встановлюється експериментально.

Контроль здійснюється шляхом розчинення вершин виступів в електроліті:

- продуктивність висока - полірується одночасно вся поверхня;
- порівняно інтенсивне знімання металу.

Недоліки:

- можливо розчинення матеріалу поверхні по межах зерен при неправильно підібраних режимах;

- досягається чистота поверхні  $Ra = 0,32 \dots 0,10$  мкм.

Можливе застосування для деталей типу: дисків, турбін, робочих і соплових лопаток турбін - важкооброблюваних механічними методами.

## 4 ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

При виготовленні та експлуатації деталей машин на їх поверхнях утворюються нерівності, а шар металу, що безпосередньо прилягає до поверхні, змінює структуру, фазовий і хімічний склад, в ньому виникають залишкові напруги. Шар металу, що має відмінні від основної маси деталі структуру, фазовий і хімічний склад, називають поверхневим.

В умовах експлуатації поверхневий шар деталі піддається найбільш сильному фізико-хімічного впливу: механічному, тепловому, хімічному та ін. У більшості випадків у деталі починають погіршатися службові властивості поверхні, наприклад, знос, ерозія, корозія, втомні тріщини і інші руйнування розвиваються спочатку на поверхні. Тому до поверхневого шару пред'являються зазвичай вищі вимоги.

Розрізняють такі геометричні відхилення поверхонь в залежності від ставлення кроку  $S$  до висоти нерівностей  $Rz$ :

- $S/Rz < 50$  - шорсткість поверхні,
- $S/Rz = 50 \dots 1000$  - хвилястість поверхні;
- $S/Rz > 50$  - макроскопічне відхилення або відхилення від правильної геометричної форми (конусність, овальність, увігнутість і ін.).

Дефекти поверхні - це окремі нерівності, сукупність нерівностей або ділянки поверхні, розміри яких істотно відрізняються від параметрів шорсткості і хвилястості. До дефектів поверхні відносять подряпини, вм'ятини, раковини, пори, відколи, викришування, тріщини, задири, та ін.

Поверхня твердого тіла в порівнянні з його внутрішньою частиною має ряд особливостей. Атом, розташований всередині твердого тіла з ідеальною кристалічною решіткою, знаходиться в стані рухомої стійкої рівноваги, оскільки для нього в усіх напрямках інтенсивність силового поля однакова. В іншому положенні виявляються атоми, які знаходяться на поверхні: вони мають тільки односторонні зв'язки - з металом, тому їх стан невірноважений, нестійкий; вони більш активні. Мають надлишкову або вільну енергію в порівнянні з атомами, що знаходяться всередині. Поверхня металу в реальних умовах абсорбує атоми елементів навколишнього

середовища, покриваючись шарами адсорбційних газів, парів води, жирів і утворюючи різні оксиди.

В результаті дифузії в поверхневому шарі виникають хімічні та інші сполуки основного металу з проникаючими ззовні речовинами. Дифузійна рухливість атомів може привести до перерозподілу концентрації легуючих елементів, в результаті чого в поверхневому шарі зменшується вміст деяких легуючих елементів (зниження кількості хрому і алюмінію в жароміцних нікелевих сплавах при високих температурах нагріву та ін.) Дифузія через поверхню впливає на властивості металів і перш за все - на властивості їх поверхневих шарів. Це особливо характерно в тих випадках, коли температура в зоні обробки деталей висока (шліфування, швидкісне точіння, цементація, азотування тощо.) Залишковими напруженнями називають такі напруги, які існують і врівноважуються всередині твердого тіла після усунення причин, що викликали їх появу. За протяжністю силового поля розрізняють наступні залишкові напруги:

- напруги першого роду, або макронапруження, що охоплюють області, розміри яких порівняні з розмірами деталі; вони мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі, виникають від неоднорідності силового, температурного поля всередині деталі;

- напруги другого роду, або мікронапруги, що поширюються на окремі зерна та на групу зерен;

- напруги третього роду (субмікроскопічні). Відносяться до спотворень атомної решітки; в цьому випадку термін «напруги» є умовним, іноді їх називають статичними спотвореннями решітки або спотвореннями третього роду.

Напруги другого і третього роду дезорієнтовані і не проявляються у вигляді викривлення або розрізанні деталі на частини. Основними причинами виникнення макронапружень є неоднорідність пластичної деформації і локальний, неоднорідний нагрів металу поверхневого шару, а при наявності перетворень - різниця обсягів виникаючих структур. Мікронапруги - місцеві залишкові напруги в мікронах. Вони є наслідком фазових перетворень, зміни температури, анізотропії механічних властивостей окремих зерен, меж зерен і розпаду зерен на блоки при пластичній деформації. Причиною утворення спотворень кристалічної решітки є, головним чином, дислокація і впровадження атомів. Ступінь і глибина наклепу обумовлені пластичною деформацією поверхневого шару і

безпосередньо пов'язані зі збільшенням дислокацій, вакансій та інших дефектів кристалічної решітки металу.

Витривалість деталей, корозійна стійкість, зносостійкість і ін. експлуатаційні показники залежать в значній мірі від фізико - механічних властивостей поверхневого шару. Зародження втомної тріщини починається в «слабких» зернах, в яких раніше починається пластична деформація. Подальший розвиток тріщини при циклічних навантаженнях призводить до втомного руйнування. Відповідальними за втомне руйнування є розтягуючі напруги, мікронерівності і дефекти, що ослабляють поверхню. Наявність в поверхневому шарі стискаючих залишкових напружень, зменшує рівень діючих напружень, підвищує опір деталей втомному руйнуванню, особливо у деталей з високоміцних сталей. Близько западин мікронерівностей має місце концентрація напруг. С.В. Серенсен встановив, що межа витривалості зразків після точіння виявилася на 40% нижче, ніж у полірованих. Чим міцніше сталь, тим більше вплив шорсткості на опір втоми. Поверхня з мінімальними шорсткостями не завжди є оптимальною. Наприклад, ретельне полірування кулачків розподільного вала, натомість шліфування, може викликати прискорене зношування і наявність частинок металу на поверхні кулачків. Для кожної пари, що треться, з урахуванням умов її зношування існує діапазон значень шорсткостей, що забезпечує найбільшу зносостійкість. Рельєф поверхні складається з окремих виступів і западин різної величини і форми. Шорсткість за рахунок створення концентрацій напруг може знижувати межу витривалості деталей до 20%. Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень при наявності поглиблень (шорсткостей) визначається за формулою Нейбера:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 2 \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{t}{\rho}}$$

де -  $t = R_{z \max}$  максимальна висота мікронерівностей;

$\rho$  - радіус кривизни на дні западини;

$\gamma$  - коефіцієнт що залежить від ставлення кроку нерівностей до їх висоти.

Якщо  $\gamma = 1$ ;  $\frac{t}{\rho} = 0,5 \dots 0,3$ ; то  $\alpha_{\sigma} = 1,5 \dots 2,5$  (для мікрорельєфу після механічної обробки).

## 5 НАКЛЕП ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

Наклеп поверхневого шару є критерієм якісної оцінки пластичної деформації, при механічній обробці, проявляється в підвищенні твердості поверхні. Якщо деталі працюють при оточуючих температурах і знакозмінних навантаженнях, то наклеп підвищує опір втоми за рахунок збільшення межі міцності і межі текучості деформованого металу. При температурах вище 600° С наклеп сприяє охрупчиванню поверхні металу, що знижує опір втоми. При завищених силових параметрах обробки може відбуватися перенаклеп, в результаті якого в поверхневому шарі з'являються небезпечні мікротріщини, намічається утворення частинок відшаровуваного металу, поверхневі зерна сплющуються так, що стають майже непомітними. Різко збільшується шорсткість поверхні. Наклеп металу можна частково або повністю зняти шляхом відпалу.

Перенаклеп - незворотний процес, при якому нагрів не відновлює вихідну структуру металу і його механічні властивості.

Характеристики наклепу - ступінь і глибина наклепаного шару.

Ступінь наклепу  $H, \%$ :

$$H = \frac{H_{\mu}^{нов} - H_{\mu}^{серд}}{H_{\mu}^{серд}} \cdot 100\%$$

де  $H_{\mu}^{нов}$  - мікротвердість поверхні;

$H_{\mu}^{серд}$  - мікротвердість серцевини.

Глибина наклепу - це товщина верхнього шару металу, пластично деформованого в процесі обробки. Мікротвердість поверхні визначають за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 вдавненням алмазної пірамідки при навантаженні від 20 до 200 грам.

Число твердості - це частка від ділення прикладеного навантаження ( $P$ ) на бічну поверхню ( $F$ ) отриманого відбитка в  $\text{мм}^2$ .

$$H_v = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{Q}{d_{cp}^2} = \frac{1,854P}{d^2}$$

де  $H_V$  - середнє її значення,  $\frac{\text{кГс}}{\text{мм}^2}$

$d_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$  - середній розмір діагоналі у  $n$  відбитків, мм;

$d_i$  - довжина діагоналі  $i$ -го відбитка, мм;

$Q$  - навантаження на алмазну піраміду, кГс;

$\alpha = 136^\circ$  - кут проміж гранями алмазної піраміди.

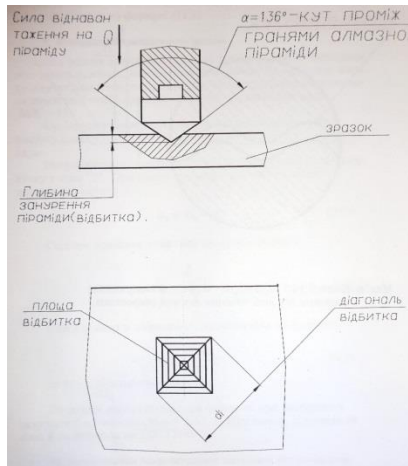


Рисунок 5.1 – Схема вимірювання мікротвердості матеріалу

Площу відбитка висловлюють через середнє значення діагоналі  $d_{cp}$  отримане з 5, 10 повторних вимірів на одній ділянці. Для зменшення похибки, поверхня під виміри повинна бути: без «вторинного наклепу»; не нижче  $Ra = 0,2$  мкм; встановленої перпендикулярно до напрямку сили від навантаження на алмазну піраміду. Розмір діагоналі лежить у виробах від 6 до 240 мкм. Процес вдавнення алмазного накієчника в деталь викликає пластичне деформування шарів металу. Достовірність може бути забезпечена за умови, якщо глибина наклепу в 10 разів перевищує глибину відбитка.

## 6 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ НАКЛЕПУ

Глибину наклепу визначають:

а) виміром мікротвердості матеріалу на різній відстані від поверхні:

- на звичайних шліфах;
- на похилих шліфах - косому зрізі;
- при послідовному видаленні тонких шарів металу (0,005 ... 0,015мм) електричним поліруванням;

б) рентгеноструктурним методом.

Глибину поверхневого шару, появу структурних, фазових та інших змін в матеріалі заготовок після різних методів обробки найчастіше визначають методом звичайних шліфів, виконуваних перпендикулярно до обробленої поверхні. Шліфи вирізують механічним або електролітичними способами і остаточно доводять поліруванням із застосуванням пасти ДОІ (Державний оптичний інститут). При цьому бажано виключити «вторинний наклеп» досліджуваної поверхні при нарізці і доведенні. Фотографують поверхню на приладах типу МІМ-8 при збільшенні в 300 і більше разів.

### Визначення наклепу на звичайних шліфах.

Застосування звичайних шліфів, виконаних перпендикулярно до обробленої поверхні, можливо при невеликій глибині поверхневого шару - 0,100 мм і більше, а саме:

- у необроблених заготовок;
  - після грубих методів механічної обробки;
  - після інтенсивного зміцнення поверхні пластичним деформуванням (механічним наклепом роликками, кульками, дробом і т.д.).
- Заміри мікротвердості виконують послідовно, починаючи від поверхні, дотримуючись відстань між наколами в 3 ... 4 діагоналі відбитків.

### Визначення глибини наклепу на похилих шліфах.

Похилі шліфи отримують шляхом зрізу досліджуваної поверхні під кутом  $\alpha = 0^{\circ}30' \dots 2^{\circ}$ . Косий зріз отримують притиранням,

використовуючи пасту ДОІ, що зменшує можливі зміни поверхневого шару.

Косий шліф дозволяє «розтягнути» досліджуваний шар, що розширює можливості вимірювання мікротвердості при малій його глибині від 1 до 2 мкм при дуже тонкій обробці, до сотень мікрон - при грубої. Фактична відстань від поверхні до  $i$ -го шару матеріалу, твердість якого визначається виміром на зрізі, визначається за формулою:

$$h_i = l_i \cdot \sin \alpha,$$

де –  $h_i$  відстань від поверхні до  $i$ -го шару, мм;

$l_i$  - відстань від початку косоного зрізу до місця вимірювання твердості, що лежить на відстані від поверхні;

$\alpha$  - кут нахилу поверхні зрізу.

Метод простий, але має недоліки: велика трудомісткість доведення шліфів; небезпечний «вторинний» наклеп, який спотворює результати вимірювань особливо у поверхонь.

### **Визначення наклепу методом виміру мікротвердості з поверхні при послідовному видаленні тонких шарів металу електричним поліруванням.**

Вимірювання виконують на зразках розміром, приблизно 30x8x2 мм, вирізаних з натурних деталей або експериментальних зразків, призначених для цільових випробувань. Перші виміри мікротвердості починають з поверхні. Наступні виміри - після видалення кожного шару до глибини, приблизно 20 мкм, знімають по 5 ... 6 мкм, а за тим - по 10 ... 15 мкм.

Процес видалення тонких шарів металу припиняють при досягненні вихідного матеріалу, що фіксують по постійній твердості його після двох - трьох кратного знімання. З пониженням твердості глибина і діагоналі відбитків збільшуються. Коли розміри відбитка однакові, це свідчить про закінчення наклепаного шару. Вимірювання мікротвердості у поверхні через більш тонкі шари матеріалу необхідні

для того, щоб встановити характер її зміни в «експлуатаційному» шарі поверхні деталі. Електролітичний з'їм металу виконують на звичайній гальванічній установці, де анодом є зразок. Склад електроліту і режим полірування підбирають експериментально в залежності від досліджуваного матеріалу.

Процес видалення тонких шарів металу припиняють при досягненні вихідного матеріалу, що фіксують по постійній твердості його після двох - трьох кратного знімання. З пониженням твердості глибина і діагоналі відбитків збільшуються. Коли розміри відбитка однакові, це свідчить про закінчення наклепаного шару. Вимірювання мікротвердості у поверхні через більш тонкі шари матеріалу необхідні для того, щоб встановити характер її зміни в «експлуатаційному» шарі поверхні деталі. Електролітичний з'їм металу виконують на звичайній гальванічній установці, де анодом є зразок. Склад електроліту і режим полірування підбирають експериментально в залежності від досліджуваного матеріалу.

Поверхня під виміри мікротвердості (після електрополірування) повинна бути не нижче  $Ra = 0,2$  мкм без розтравлювання на кордонах зерен. Знімання металу за 1 хвилину рекомендується  $0,002 \dots 0,004$  мм.

Величину зняття визначають:

- безпосередньо виміром мікрометричним інструментом з точністю  $0,002 \dots 0,005$  мм.

- ваговим методом за формулою:

$$h_i = \frac{P_0 - P_3}{s \cdot \gamma}$$

де -  $h_i$  товщина знятого шару  $i$ -го полірування;

$P_0$  - вага зразка до полірування;

$P_3$  - вага зразка після  $i$ -го полірування;

$\gamma$  - щільність матеріалу зразка;

$s$  - площа досліджуваного зразка.

Зважування здійснюється зазвичай на аналітичних вагах типу АДВ - 200 з точністю  $0,0001$  грама.

Гідність методу:

- виключає трудомісткість доведення шліфів, в порівнянні з попереднім методом;
- вище точність вимірювання мікротвердості і визначення глибини наклепу, так як немає «вторинного» наклепу від доведення шліфа. За результатами вимірювання мікротвердості будують графіки зміни її по глибині і визначають ступінь наклепу.

### **Рентгеноструктурний метод**

Рентгеноструктурним методом роблять зйомки спотворень орієнтирів решітки, створених пластичною деформацією. Наклеп виявляється на рентгенограмах у вигляді розмитого кільця. У міру стравлювання наклепаних шарів інтенсивність зображення кільця зростає, а ширина ліній зменшується. Цей метод дозволяє більш чітко виявити кордон між слабо деформованими шарами і вихідним металом. Недоліки - невисока точність.

## 7 АЛМАЗНЕ ВИГЛАДЖУВАННЯ

Вигладжування полягає в пластичній деформації оброблюваної поверхні ковзаючим по ній інструментом – вигладжувачем. Інструмент деформує метал, утворюючи канавці на поверхні.

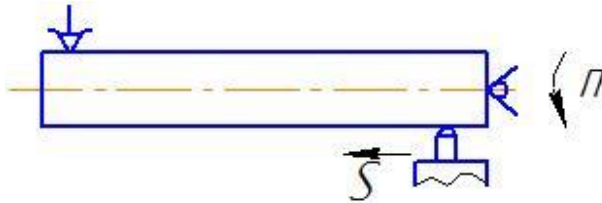


Рисунок 7.1 - Схема обробки при вигладжуванні

Розрахунок коефіцієнта перекриття:

$$h = \frac{a}{S}$$

Після кожного обороту оброблюваної деталі канавка (слід вигладжувача) - переміщається в осьовому напрямку на відстань, рівну подачі  $S$ , відбувається багаторазове перекриття її при наступних оборотах оброблюваної деталі, так як ширина канавки більше подачі.

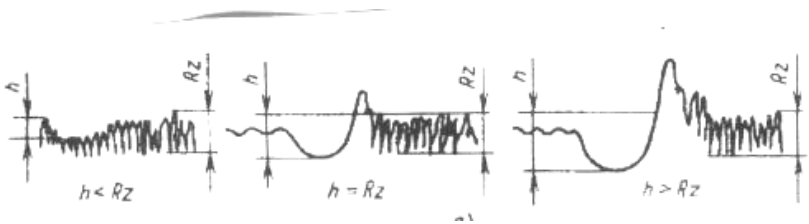


Рисунок 7.2 - Вигладжування, співвідношення між глибиною канавки і висотою мікронерівностей

В результаті пластичного деформування оброблюваної поверхні згладжуються вихідні нерівності і утворюється новий мікрорельєф поверхні зі значно меншою висотою нерівностей

профілю. Розмір деталі зменшується на величину залишкової деформації, в основному за рахунок змяття мікронерівностей. Зазвичай припуск на вигладжування не регламентується.

У початковий момент вигладжування пластичне деформування металу відбувається таким чином: з 2-х сторін частина металу перед інструментом спучується у вигляді валика, а частина видавлюється на край деталі, створюючи невеликий наплив на торці, потім процес стабілізується. Напливи на виході інструменту в 2-3 рази більше ніж на вході, і складають для алюмінію і кольорових сплавів 10-40 мкм, для сталей середньої твердості 5-10 мкм, для високоміцних матеріалів твердістю від 50-60 HRC - не більше 5 мкм. У більшості випадків при вигладжуванні такі напливи допустимі і не впливають на експлуатаційні властивості деталей (крім золотникових і плунжерних пар, деякі деталі гідравлічних машин і ін.) Однак при обробці деталей на прохід і при обробці переривчастих поверхонь різко зменшується стійкість інструменту, особливо з природного алмазу, що володіє підвищеною крихкістю, що обумовлено його будовою. Тому накінецьниками з природних алмазів допустимо виконувати вигладжування на прохід лише переривчастих поверхонь деталей з алюмінієвих і кольорових сплавів, твердість яких не перевищує 130 НВ. Накінецьники з надтвердих синтетичних матеріалів типу баллас і карбонадо можна успішно використовувати для вигладжування переривчастих поверхонь на сталевих деталях.

Вирішальні значення для якості поверхні деталі має шорсткість інструменту. Алмазні інструменти поліруються алмазними колами до 13 кл. шорсткості (дзеркального блиску) для зменшення коефіцієнту тертя, який впливає на рівень температури в зоні контакту і знос інструменту. Коефіцієнти тертя залежать від сили вигладжування і твердості оброблюваної деталі. Зі збільшенням сили вигладжування до оптимального значення коефіцієнт тертя збільшується, а зі зростанням твердості - зменшується. Максимальна значення коефіцієнта тертя - не більше 0,1, зазвичай воно складає 0,05-0,08.

Температура в осередку деформування на глибині не більше 0,1 мм не перевищує 200-400 °С при швидкості вигладжування менше 100 м / хв. При збільшенні швидкості вигладжування до 400-500 м / хв температура зростає в 2-2,5 рази. Зазвичай глибина деформованого шару не перевищує 0,5 мм, а  $P_y < 500\text{Н}$ .

Параметрами вигладжування, що впливають на шорсткість є: сила вигладжування, подача і радіус робочої частини інструменту. При збільшенні сили вигладжування до певного значення шорсткість зменшується. При оптимальних значеннях сили вигладжування вихідні нерівності повністю згладжуються і утворюється шорсткість, обумовлена самим процесом вигладжування, пов'язана з подачею. Подальше збільшення сили вигладжування збільшує пластичні спотворення, висота нерівностей зростає в порівнянні з найменшою, поверхневі шари можуть зруйнуватися і можуть з'явитися тріщини (перенаклеп).

Оптимальне значення сили вигладжування  $P$  визначають за такими формулами:

- для загартованих сталей:

$$P = 0,013HV \cdot \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2$$

- для матеріалів невисокої і середньої твердості

$$P = 0,008HV \cdot \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2$$

де  $HV$  - твердість оброблюваної поверхні за Вікерсом;

$D$  - діаметр оброблюваної поверхні, мм;

$R$ -радіус робочої частини алмазу, мм.

Сила вигладжування більша 200-250 Н для деталей з високоміцних матеріалів і більша 100-150 Н для деталей з матеріалів середньої твердості, як правило, є недоцільною. Основним критерієм вибору радіуса сфери інструменту є твердість матеріалу оброблюваної заготовки: для деталей з м'яких сталей і кольорових сплавів цей радіус має становити 2,5-3,5 мм, для деталей з матеріалів середньої твердості - 1,5-2,5 мм, для деталей з високоміцних сталей - 1,0-1,5 мм.

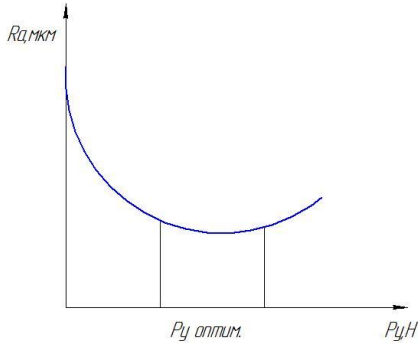


Рисунок 7.3 – Залежність шорсткості від зусилля вигладжування

При зміні подачі від 0,02 до 0,10 мм/об параметр шорсткості зростає, при цьому залишкова пластична деформація зменшується. Найменший параметр шорсткості досягається при подачі 0,02-0,04 мм /об; при подачі нижче 0,02 мм/об параметр шорсткості не змінюється або зростає в порівнянні з оптимальним значенням, що пояснюється перенаклепом поверхневого шару. Зменшення вихідного параметра шорсткості при вигладжуванні з подачами, більшими 0,08-0,10 мм/об, несуттєво, тому вигладжування стає малоефективним.

Параметр шорсткості залежить від числа робочих ходів інструменту. В основному він зменшується під час першого робочого ходу. Зі збільшенням числа ходів до 2-х 3-х параметр шорсткості зменшується, але в меншій мірі, так як повторні робочі ходи виконуються вже по зглаженій поверхні. При числі ходів, більшому 4-х, можливий перенаклеп поверхневого шару; параметр шорсткості при цьому дещо збільшується, тому при вигладжуванні доцільно призначити один робочий хід.

Швидкість вигладжування мало впливає на параметр шорсткості. При зміні швидкості від 16-120 м/хв він практично не змінюється. Зростання швидкості вигладжування від 120-200 м/хв призводить до невеликого збільшення параметра шорсткості і зменшення рівня залишкових напружень у поверхні. При великих швидкостях (200 м/хв і більше) алмаз вслідствии перегріву сильно зношується. В цьому випадку необхідно рясне охолодження зони контакту алмазу з оброблюваної поверхнею.

На якість вигладжування істотно впливає також охолодження. Дія МОР оберігає алмаз від зношування і зменшує коефіцієнт тертя. Рекомендується застосовувати індустріальне масло I-20A, а для деталей з кольорових металів і сплавів - гас. Застосовують також спеціальні склади МОР і поверхнево активні речовини (ПАР).

Параметр шорсткості вигладженою поверхні залежить від вихідного параметра шорсткості. Деталі із загартованої сталі ефективно вигладжувати при вихідному параметрі шорсткості не більше  $Ra = 1,25$  мкм, при цьому досягається стабільне зменшення параметра шорсткості в 4-5 разів. Деталі з незагартованих сталей, бронзи, алюмінію та ін. аналогічних металів можна ефективно вигладжувати при вихідному параметрі шорсткості  $Ra \leq 2,0$  мкм.

Після вигладжування шліфованої або полірованої поверхні, з'являються мікротріщини шириною 1-3 мкм і ін. дефекти (невидимі на шліфованої або полірованій поверхні).

В результаті алмазного вигладжування розмір деталей може змінюватися на 3-5 мкм, що для більшості деталей укладається в допуск на розмір. При вигладжуванні більш точних деталей слід враховувати зміну розміру.

Якщо зміну розміру після першого робочого ходу прийняти за одиницю, то на другому робочому ході розмір змінюється на 0,12-0,14; на третьому - 0,07-0,08; на наступних ще менше. Зміна розміру на другому і наступних робочих ходах матиме місце тільки в разі неповного зім'яття вихідних мікронерівностей при першому робочому ході. Якщо ж сила вигладжування забезпечує повне зім'яття мікронерівностей на першому робочому ході, то подальшої зміни розміру практично не спостерігається. При розбіжності траєкторії руху інструменту на наступному і попередньому робочих ходах, навіть в разі попереднього повного зім'яття вихідних мікронерівностей, спостерігається зміна розміру деталі в межах 0,05 від попереднього. У табл.8.1 наведені результати досліджень зміни розміру обробленої поверхні при вигладжуванні вала зі сталі 40ХН2МА-Ш.

Таблиця 7.1 - Зміна діаметру вала зі сталі 40ХН2МА-Ш

Вигладжування	Сила вигладжування, $P_v, \text{H}$	Зміна діаметру валу $\Delta d, \text{мм}$
Після шліфування	100	0,003
	200	0,004
	300	0,0045
Після точіння	100	0,005
	200	0,0095
	300	0,01
	400	0,012

Як видно з табл.7.1, збільшення сили вигладжування понад 200 Н незначно впливає на зміну розмірів, що пояснюється повним змінанням вихідних мікронерівностей при цій силі. Найважливіші характеристики мікрогеометрії поверхні - відносна опорна довжина профілю, радіус закруглення мікронерівностей після алмазного вигладжування - більш сприятливі, ніж після остаточних методів обробки (табл.7.2).

Оптимальні режими вигладжування для досягнення максимального зміцнення кількка «жорсткіше», ніж для досягнення мінімального параметра шорсткості. Для максимального зміцнення слід на 15-40% збільшити силу вигладжування або на 10-30% зменшити радіус інструменту, можна одночасно кількка «посилити» жоден із цих параметрів.

Таблиця 7.2 - Характеристики мікрогеометрії поверхні деталей після різних методів оздоблювальної обробки

Метод обробки	Ra	Радіус скруглення
		мікронерівностей
мкм		
Алмазне вигладжування	0,16	1000
	0,08	1500
	0,04	2500
	0,02	3500
Суперфініш	0,08	350
	0,04	450
Полірування	0,16	200
	0,08	300
	0,04	400

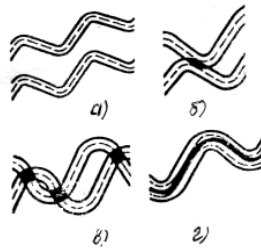
Тонке шліфування	0,16	70
	0,04	100

При вигладжуванні з оптимальними режимами забезпечується ступінь зміцнення 25-40% при глибині зміцненого шару до 0,4 мм і створюються стискаючі залишкові напруги до 1,2 ГПа.

## 8 ВІБРОВИГЛАДЖУВАННЯ І ВІБРООБКАТУВАННЯ

При віброобкатуванні крім осьової подачі  $S$  (як при обкатуванні або при вигладжуванні) інструменту, підібраними до оброблюваної поверхні з силою  $P$ , повідомляється зворотньо - поступальне переміщення з частотою  $N$  і амплітудою  $t$  уздовж осі деталі, що обертається з частотою  $n$ . При використанні в якості інструменту сталевий загартований кулі (діаметром  $d_{ш}$ ) процес називають віброобкатуванням, при використанні сферичного накієчника з алмазу або іншого надтвердого матеріалу (радіусом  $R$ ) - вібровигладжуванням. За винятком зворотньо-поступального переміщення інструменту, інші умови взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею при віброобкатуванні ті ж, що і при обкатуванні кулею, або близькі до них, а при вібровигладжуванні близькі до умов вигладжування.

При обкатуванні і вигладжуванні інструмент видавлює канавку, при вібровигладжуванні (віброобкатуванні) - синусоїдальну канавку. Мікрорельєф, одержуваний при віброобкатуванні, за характером і щільності синусоїдальних каналів поділяють на чотири види (рис. 8.1). Варіювання форм, розмірів і розташування мікронерівностей на поверхні досягається зміною режимів обробки:  $S$ ;  $P$ ;  $t$ ;  $N$ ;  $n$ ;  $d_{ш}$  ( $R$ ).



- а) - канали не торкаються один одного;
- б) - канали торкаються один одного;
- в) - канали перетинаються;
- г) - канали накладаються

Рисунок 8.1 - Характер мікрогеометрії, одержуваний при вібровигладжуванні (віброобкатуванні)

Як інструмент застосовують сталеві загартовані кульки і сферичні накінецьники з природних, синтетичних алмазів і твердого сплаву. Вибір матеріалу залежить від твердості оброблюваної поверхні і її характерних властивостей (налипання на інструмент і ін.). Для обробки деталей з матеріалів високої твердості (від HRC50 до HRC60) застосовують алмазні накінецьники; деталі з менш твердих матеріалів обробляють, як правило, кулями. Вібровигладжуванням можна обробляти поверхні високої твердості; сила притиснення інструменту при вібровигладжуванні 50-200 Н, що дозволяє обробляти малозорсткі деталі, а також поглиблення шириною 5-10 мм, так як вигладжувальний накінецьник має невеликий розмір, може вільно проходити в ці поглиблення. Для віброобкатування застосовують стандартні кулі з підшипникової сталі, сила підтискання інструменту - до 800-1000 Н. Виготовлення спеціальних куль з певного матеріалу з заданою точністю надзвичайно ускладнене, а виготовлення сферичних накінецьників з будь-якого матеріалу нескладно. Тому вібровигладжування є методом, що має більш широкі технологічні можливості в порівнянні з віброобкатуванням, але в багатьох випадках поступається віброобкатуванню по продуктивності.

Залишкові напруги при віброобкатуванні в 1,3-1,7 рази більше ніж при обкатуванні без вібрацій на таких же режимах. Це можна пояснити різким збільшенням деформуючої дії інструменту. При віброобкатуванні довжина каналу збільшується в 1,5-2 рази, постійно змінюються швидкість інструменту (від 0 до  $\max$ ) і напрям переміщення інструменту щодо гвинтовий лінії, тому зростання залишкових напруг можна пояснити збільшенням площин ковзання та осередків розвитку пластичної деформації.

Параметри віброобкатування (сила  $P$ , амплітуда коливань інструмента  $I$ , частота подвійних ходів інструменту  $N$ , діаметр кулі  $d_{\text{ш}}$  або радіусом вигладжувача  $R$ , частота обертання деталі  $n$  і подача  $S$ ) призначають за заданими характеристиками мікрорельєфу:

характером малюнка, ширині  $b$  і глибині  $h$  каналів, відносної площі каналів  $F$ . Характеристики мікрорельєфу зазвичай вказують в кресленнях на деталь, в ТУ або ін. конструкторської документації. Іноді задають силу обробки і радіус інструменту, так як ці технологічні параметри безпосередньо пов'язані зі зміцненням поверхні, а порушення їх може привести до перенаклепу. Силу обробки вибирають в основному виходячи з глибини каналів, заданої

для певного радіусу інструменту, при цьому враховують жорсткість оброблюваної деталі. Залежність глибини каналу від сили обробки знаходять експериментально

При отриманні мікрорельєфів четвертого виду (рис 8.1, г) за міру залишкової деформації і ступеня вигладжування приймають зміну діаметра оброблюваної поверхні і різницю висот вихідних і утворених мікронерівностей. Залишкова деформація, обумовлена тиском, при одній і тій же силі віброобробкування залежить від діаметра кулі  $d_{ш}$  або радіусу сфери алмазного накінецьника  $R$  і діаметра оброблюваної деталі  $D$ . Радіус інструменту вибирають в залежності від отриманої сили і заданих глибини і ширини каналів (площі) з урахуванням жорсткості і габаритних розмірів оброблюваної деталі, а також твердості оброблюваного матеріалу. При обробці маложорстких і неравножорстких деталей слід застосовувати інструмент малого радіусу, так як деформування необхідно забезпечити при менших силах віброобробкування. Зі зменшенням габаритних розмірів деталей також доводиться зменшувати радіус інструменту для того, щоб отримати необхідний малюнок поверхні. Так при декоративній обробці металевих ковпачків авторучок як деформуючих елементів, застосовують кулі діаметром 2 мм. Діаметр кулі зазвичай призначають 2-30 мм, а радіус вигладжуючих накінецьників - 1-6 мм. Амплітуду коливань змінюють від 0 до 4 мм; збільшення її більш ніж 4 мм викликає різке зростання інерційних сил, що погіршують процес обробки.

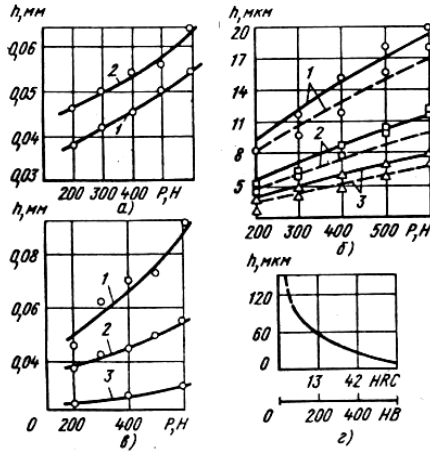


Рисунок 8.2 - Залежності глибини каналів від сили віброобкатування (а, б, в) і максимально досягаємої глибини каналів від твердості оброблюваного матеріалу (г)

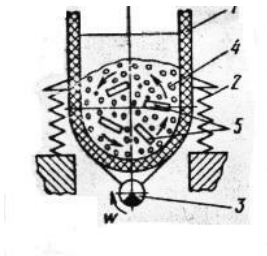
Число подвійних ходів в хвилину  $N$  обмежується можливостями приводів і виникаючими інерційними силами. Зазвичай  $N = 900 \dots 3000$  дв.хід / хв. Зазвичай  $n \leq 100$  хв<sup>-1</sup>.

Однією з основних характеристик віброобкатуваних поверхонь є ступінь перекриття  $k_{II}$  видавленими канавками вихідної обробленої поверхні. Величина  $k_{II}$  визначає шлях, прохідний деформуючим елементом в одиницю часу щодо обробленої поверхні:

$$k_{II} = f \left[ \frac{N; l; P; d_w(R)}{n; S} \right]$$

## 9 ВІБРОУДАРНА ОБРОБКА

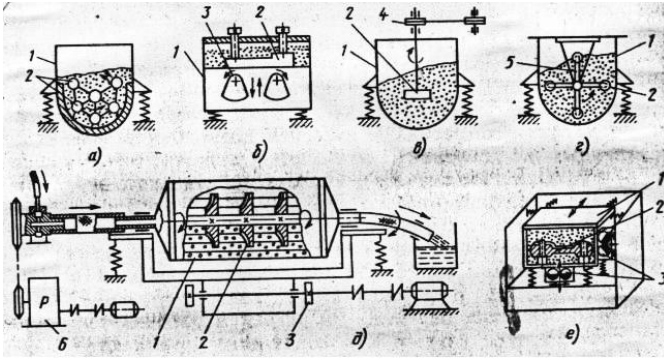
Віброабразивну обробку застосовують для видалення задирок, закруглення гострих кромки, очищення поверхонь деталей, полірування і т.д., а віброударну - для зміцнення. Схема обробки, характер взаємодії оброблюваної поверхні з робочими тілами і інші умови процесу в обох випадках можуть бути однаковими. Основні відмінності цих методів полягають у тому, що в якості робочих тіл при віброударній обробці використовують переважно сталеві загартовані кульки, дріб та інші металеві гранули та обробку виробляють найчастіше з закріпленням деталей в робочій камері (контейнері). А при віброабразивній обробці використовують абразивні гранули різного типу і обробку деталей в контейнері зазвичай виробляють без закріплення деталей (рис 9.1). Наприклад, використовуючи сталеві кульки в суміші зі шліфзерном, досягають зміцнення поверхні і істотного зниження шорсткостей або закруглення крайок. З іншого боку обробка абразивними гранулами одночасно зі зніманням металу і зниженням шорсткості забезпечує зміцнення поверхні.



1-контейнер; 2 - пружні амортизатори; 3 - вібробудник; 4 - робочі тіла; 5 - оброблювані деталі.

Рисунок 9.1 - Схема віброударної обробки заготовки без закріплення

Сила ударної взаємодії при закріпленні деталей буде більше, ніж при їх вільному розташуванні, а деталі масою від 2-3 кг необхідно обробляти тільки закріпленими (рис. 9.2) тому що в іншому випадку відбувається їх зіткнення і пошкодження поверхонь.



1 - контейнер; 2 - оброблювані деталі; 3 - віброзбудник; 4 - привід обертання оброблюваної деталі; 5 - пристрій, що забезпечує самообертання деталі; 6 - привід обертання контейнера з закріпленими в ньому деталями.

Рисунок 9.2 - Схема обробки деталей з закріпленням в контейнері

Двокомпонентна, тобто площинна вібрація характеризується тим, що кожна точка робочої камери здійснює гармонійні коливання в одній площині - вертикальній, горизонтальній або похилій. При 3-х компонентній, або об'ємній, вібрації кожна точка робочої камери здійснює гармонійні коливання по просторовій замкнутій кривій. Застосування об'ємної вібрації дозволяє краще обробляти важкодоступні місця деталей складної замкнutoї форми. Підбираючи робочі тіла з відповідними фізичними властивостями і розмірами, регулюючи режим вібрацій, можна забезпечувати широкий діапазон вирішуваних завдань по зміцненню деталей. Внаслідок високої відносної рухливості робочі тіла добре вписуються в фасонну поверхню деталей, за рахунок чого цим методом можна зміцнювати як зовнішні, так і внутрішні поверхні складних деталей різних розмірів. У той же час віброударна обробка в порівнянні з іншими методами поверхневого зміцнення має обмежені енергетичні можливості, тому що машини з достатньою для практичного застосування довговічністю працюють при віброприскоренні не більше 12-15 g і віброшвидкості 1,0-1,2 м / с.

В силу обмежених енергетичних можливостей тривалість зміцнення значна (від 10-20 хв до декількох годин), а ймовірність перенаклепа деталей практично виключається. Допустимий наклеп і залишкові напруги стиску при віброобробці залежать від способу завантаження деталей, складу і кількості робочих середовищ, напрямки дії траєкторії коливань, параметрів коливального процесу та інших факторів, змінюючи які, можна в певних межах управляти процесом зміцнення.

Інтенсивність зіткнення робочих тіл з оброблюваною деталлю під дією коливань залежить від різниці швидкостей робочих тіл і деталей:

$$\Delta v = v_{P.T.} - v_D$$

При обробці незакріплених деталей останні переміщуються в робочій камері разом з робочими тілами по круговій траєкторії (див. рис. 9.2), при цьому має менше значення, ніж при обробці закріплених деталей. Закріплені деталі або весь контейнер, при площинній вібрації обертають для того, щоб забезпечити рівномірну обробку всієї поверхні, тому що в іншому випадку робочі тіла (див. рис. 9.2). вільно переміщуючись по колу, будуть інтенсивно обробляти одну сторону деталей, а «тіньова» (по ходу переміщення робочих тіл) сторона буде оброблятися з меншою інтенсивністю. Динаміка віброударної обробки закріплених деталей визначається взаємодією робочих тіл зі стінками (дном) контейнера і з закріпленими деталями. Коливання контейнера з прискоренням, у багато разів перевищує прискорення вільного падіння, забезпечує періодичний відрив робочих тіл від стінок (дна) контейнера. А також від закріплених деталей і зіткнення з ними під різними кутами. При зіткненні поверхні деталі з масою робочих тіл під прямим кутом відбувається ударна взаємодія. При зменшенні кута зустрічі відбувається зменшення ударної взаємодії, при цьому тривалість зіткнення поверхні деталі з робочими тілами збільшується

Сила ударного імпульсу частинки робочого середовища:

$$P = \frac{m \cdot v^2}{2} \cdot \frac{R}{r^2} \cdot \left(1 - \frac{3}{8} \cdot K^2\right)$$

де -  $m$  маса робочої частки;

$v$  - швидкість зіткнення;

$R$  - радіус кривизни лунки відбитка;

$r$  - радіус робочої частки;

$K$  - коефіцієнт, що враховує втрату швидкості при ударі.

Ударний імпульс змінюється під дією різних факторів, найбільший вплив на нього робить амплітуда коливань  $A$ . Ударний імпульс практично не залежить від положення деталі в контейнері, за винятком тих випадків, коли деталі розташовані в безпосередній близькості від стінок (дна) контейнера. На відстані 10-20 мм від стінок контейнера ударний імпульс різко зростає внаслідок збільшення відносної швидкості окремих частинок робочого середовища, які отримують енергію від стінок (дна) контейнера і деталі. У міру віддалення деталі від стінок (дна) контейнера енергія часток швидко згасає і на відстані 40-50 мм від стінок контейнера, енергія частинок визначається в основному коливаннями деталі.

Параметри віброударної обробки:

-амплітуда коливань  $A$ , по осях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ;

-частота коливань  $\omega$ ;

-розміри робочих тіл (діаметри кульок);

-маса робочих тіл і співвідношення маси робочих тіл і маси деталі;

-відстань до деталі від стінок контейнера;

-тривалість обробки.

Оскільки ударний імпульс (імпульс ударної взаємодії), а отже, і ступінь зміцнення прямо пов'язані зі збільшенням амплітуди коливань  $A$ , то її значення повинно бути по можливості найбільшим. Зазвичай це значення обмежено можливостями використовуваних вібротришків і становить 1,5-6,0 мм, в деяких випадках до 10 мм.

Діаметри робочих тіл (куль) вибирають в межах 1,5-10 мм, виходячи із загальної маси завантажених деталей і мінімальних розмірів елементів поверхні (пази, галтелі, лунки) оброблюваних деталей. Діаметри кульок повинні бути не менше ніж в 1,8-2,0 рази менше розмірів цих елементів.

Тривалість обробки повинна бути обмежена по техніко - економічних міркувань:

$$\tau = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \lambda \cdot \beta}{4 \cdot r^2 \cdot \omega}$$

де  $\lambda$  - число повторюваних ударів в одну і ту ж точку оброблюваної поверхні (в залежності від твердості матеріалу  $\lambda$  вибирають від 10 до 20, великі значення призначають для меншою твердості оброблюваного матеріалу);

$\beta = 0,5 \dots 3,5$  - коефіцієнт, пов'язаний з формою оброблюваних поверхонь і їх розташуванням в обсязі робочих тіл (при рівномірному розташуванні = 2 - 3);

$r$  - радіус плями контакту:

$$r = \left[ \frac{3}{16} \cdot P \cdot (v_1 + v_2) \cdot R \right]^{\frac{1}{3}}$$

де -  $v_1, v_2$  коефіцієнти пластичності, які характеризують пружні властивості матеріалу робочих тіл і оброблюваних деталей:

$$v_1 = \frac{(1 - \mu_1)^2}{E_1}$$

$$v_2 = \frac{(1 - \mu_2)^2}{E_2}$$

де  $\mu_1, \mu_2$  - коефіцієнти Пуасона для матеріалу робочих тіл і оброблюваних деталей;

$E_1, E_2$  - модулі пружності матеріалів робочих тіл і оброблюваної деталі.

Вібродарну обробку виконують на спеціальному обладнанні - вібраційних верстатах, які називають також вібраційними машинами. Дорезонансний режим характеризується тим, що частота вимушених коливань вібраційного верстата, порушується приводом, нижче частоти власних коливань системи. Цей режим характеризується підвищеним тиском на підшипники вібратора і на пружні зв'язки. Перевагами резонансної системи є можливість створення багатомасових верстатів (мають дві і більше тих, хто вагається маси, пов'язані між собою пружними зв'язками) і менша енергоємність приводу. При резонансному режимі частота вимушених коливань системи значно вище частоти її власних коливань. Цей режим характеризується мінімальними силами, що діють на підшипники вібратора і пружні зв'язки, і досить високою стійкістю. Вібраційні верстати працюють переважно в зарезонансному режимі.

## 10 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Залишкові напруги можна визначити механічним методом, розроблений акад. М.М. Давіденковим (з використанням формул Біргера) і рентгеноструктурним методом. Напруження визначаються на зразках, вирізаних з деталей електроерозійним методом. Вирізка здійснюється на чистових режимах для зменшення дефектного шару. Шорсткість -  $R_a = 2,5$  мкм (після вирізки) при знятті шару електролітичним поліруванням. Для високолегованих сталей і нікелевих сплавів - застосовують електроліт: 45% ортофосфорної кислоти, 45% сірчаної, інші матеріали поліруються з добавками хромового ангідриду, гліцерину і сірчано - кислого заліза. Для титанових сплавів - 30% азотної кислоти, 2% плавикова кислота, інше вода.

Вимоги до електроліту і процесу:

- електрополірування проводиться в спеціальному витяжному шафі, зняття металу повинно відбуватися рівномірно по всій поверхні без підвищення температури електроліту;
- не повинні виникати додаткові напруги в результаті дифузії водню;
- зміною щільності струму і підбором складу електроліту можна регулювати якість оброблюваного металу і швидкістю його зняття;
- якщо температура електроліту не більш ніж  $30^\circ$ , то поверхню зразка захищають парафіном або воском;
- для виготовлення ванн застосовують: вінілпласт., орг.скло, скло, фарфор, кераміку, як катод застосовують свинець.

Для вимірювання в процесі зняття напруженого шару застосовують прилад ПІОН - 2 і самописець БВ - 662 с індуктивним датчиком. У ході самого процесу має місце похибка створена вагою штока датчика (під дією штока зразок деформується). Для усунення цієї помилки застосовують пружинні компенсатори. Товщина знятого шару визначається після закінчення процесу за допомогою мікрометра або по зміні маси зразка. Поточне значення знятого шару  $h$  приймається пропорційно тривалості електрополірування. При нагріванні електроліту також виникають похибки у вимірі деформації.

При розрахунку залишкових напруг використовують не самі прогини зразка, а їх похідне по глибині знятого шару  $\left(\frac{df}{dh}\right)$ , з цього спочатку будується графік  $f$  від  $h$  в великому масштабі, і графічно визначають похідну як  $tg$  кута нахилу дотичній кривій  $f(h)$  до осі абсцис. При неможливості точної побудови  $f(h)$  розрахунок проводять за формулами по 3-м значенням прогинів, переглядають в т.  $h_{i-1}$ ,  $h_i$ ,  $h_{i+1}$ .

$$\frac{df}{dh} = A_{f_{i-1}} + B_{f_i} + C_{f_{i+1}}$$

$$A = \frac{h_{i+1} - h_i}{(h_i - h_{i-1}) \cdot (h_{i+1} - h_{i-1})}$$

$$B = \frac{2h - h_{i-1} - h_{i+1}}{(h_i - h_{i-1}) \cdot (h_i - h_{i+1})}$$

$$C = \frac{h_i - h_{i-1}}{(h_{i+1} - h_{i-1}) \cdot (h_{i+1} - h_i)}$$

При масових дослідженнях обчислення  $\left(\frac{df}{dh}\right)$  активізують включивши в схему обчислення приладу диференціюючу ланку і самописець сам пише графік  $\left(\frac{df}{dh}\right)$ .

### Методика визначення залишкових (осьових) напруг на підставі матеріалів і інструкцій НІАТ

1. Зразок визначається розміром вирізаним на електроіскровому верстаті. Розміри для двигуна Д-36 - III ст КНД  
L = 60мм; b = 10мм. труїться спинка  
Прилад ПІОН - 2 (похибка  $\pm 3\%$ )
2. Необхідно зачистити задирки.
3. Визначають

$$H_{cp} = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{3}$$

Зразок очищають від забруднення і промивають в ацетоні, зважують на аналітичних вагах з точністю до  $\pm 0,0001$ г.

5. Проводиться замирення ширини зразка штангенциркулем.

6. Нанести шар клею на всі поверхні зразків крім досліджуваної і просушити.

7. Закріпити зразок в затиску на поверхні затиску наносять шар воску і занурюють в електроліт.

8. Режим електролітичного травлення:

Склад електроліту для сплава ВТЗ-1:

450 см<sup>3</sup> - CrO<sub>3</sub>;

450 см<sup>3</sup> - H<sub>2</sub>O;

100см<sup>3</sup> - HF – плавикова кислота;

0,05-0,1а/см<sup>2</sup> - щільність струму.

Величина струму травлення встановлюється по щільності струму і площі підбурюваної поверхні. Повинно бути рівномірне зняття металу і не допускається роз'ятрювання кордонів зерен.

10. Інформація зразка записується на стрічці приладу.

11. Зразок знімають, очищають від воску і клею промивають в проточній воді і просушують.

12. Вимірюють довжину зразка про підбурювання частини.

13. Визначають товщину стравленого шару:

$$\delta = \frac{Q_1 - Q_2}{l_{mp} \cdot B_{cp} \cdot \gamma} \cdot 10^6$$

де -  $\delta$  товщина стравленого шару, мкм;

$Q_1$  - вага зразка до травлення, г;

$Q_2$  - вага зразка після травлення, г;

$l_{mp}$  - довжина стравленою поверхні, мм;

$B_{cp}$  - ширина зразка, мм;

$\gamma$  - питома вага зразка матеріалу, г / см<sup>3</sup>

Розрахунок осьових статичних напруг ведеться з урахуванням консольного - жорсткого кріплення:

$$\sigma = \frac{H_{cp}^2 \cdot E \cdot l_{\Delta}}{9 \cdot l^2 \cdot \delta} \cdot \frac{df}{da}$$

де -  $\sigma$  напруга, кг / мм<sup>2</sup>;

$E$  - модуль пружності I роду, кг / мм<sup>2</sup>;

$H_{cp}^2$ ,  $l^2$  - розміри зразка, мм;

$l_{\Delta}$  - довжина діаграми стрічки в мм;

$\frac{df}{da}$

- tg кута нахилу щодо дотичній, проведеної до кривої деформації в даній точці.

Знак залишкових напружень визначають за напрямком переміщення вільного кінця зразка:

розтягуючи - зразок переміщається вгору;

стискаючи - зразок переміщається вниз.

Розрахунок починається при глибині травлення від 2 мкм, тому що спочатку запису крива має спотворення пов'язане з процесом травлення.

Переваги методу:

- простота і наочність;

- зручність використання в серійному виробництві;

- висока точність;

- можливість визначати напруги на будь-якій глибині.

Недоліки методу:

- метод руйнівний;

- присутній суб'єктивний фактор;

- чутливість датчика.

Рентгеноструктурний метод - дає можливість безпосередньо виміряти деформацію кристалічної решітки при впливі напруг. Основна перевага - це неруйнівний метод.

Недоліки:

- можливість визначати напруги тільки в поверхневому шарі;

- невисока точність;

- виникають труднощі у відмінності мікро - та макронапружень.

## 11 ІНСТРУМЕНТИ І РОБОЧІ ТІЛА, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ППД

Матеріали для інструментів і робочих тіл повинні мати більш високі фізико - механічні властивості, ніж матеріали оброблюваних деталей. Вони повинні мати наступні властивості: високу твердість; здатністю чинити опір стирання і ударних впливів при обробці ударними методами ППД; високою межею міцності на стиск, низьким коефіцієнтом тертя по металу; великою теплопровідністю і теплоємністю; здатністю обробляти поверхню до отримання мінімальної шорсткості. Особливості кожного методу ППД висловлюють також вимоги до інструментів і робочих тіл.

Кулі і ролики виготовляють з підшипникових сталей ШХ15, ШХ 15СГ, ШХ 20СГ, 18ХГТ в особливих випадках можна застосовувати корозійно-стійкі сталі 11Х18М, 95Х18, а також вольфрамованадієву сталь 8Х4В9Ф2.

Як матеріал для ударних і деяких інших інструментів застосовують такі інструментальні сталі - У10, У10А, Р18. Р6АМ5; підвищеної теплостійкості Р6М5К5, Р9М4К8, Р9К5, а також сплави, що володіють високою теплостійкістю.

Алмаз має кращі фізико-механічні властивості ніж інші матеріали. Для виготовлення вигладжувачей використовують природні і синтетичні алмази. Синтетичні алмази з розміром зерна більше 3 мм у вигляді полікристалів отримали назву баллас (АСБ) і карбонадо (АСПК) за аналогією з назвами відповідних природних алмазів. Особливість їх структури забезпечує ізотропність фізико-механічних властивостей, дає можливість інструменту зі змінними навантаженнями. Алмази АСБ мають кулькову форму з чітко вираженою радіально-променевої структурою, розміри їх зерен досягають 6 мм.

Алмази АСПК мають форму циліндра 2-4,5 мм і висотою 2-5 мм. Структура їх також радіально промениста більш досконала. Для обробки дробом і вібраційної ударної обробки використовують сталеві і скляні кулі, дріб різної грануляції, виготовлену з різних матеріалів. Для виготовлення дротяних щіток використовують в основному вуглецеву пружинний дріт діаметром 0,2-1,0 мм.

## 12 РОБОЧІ ТІЛА І РОБОЧІ СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ УДАРНИХ МЕТОДІВ ППД

Для віброударної обробки використовують робочі тіла з різних матеріалів і рідкі робочі середовища. Крім сталевих полірованих кульок, сталевого і чавунного дробу застосовують металеву сітку з дроту, гранули з алюмінієвих і кольорових сплавів, відходи листових штампованих заготовок або металургійного виробництва та інші металеві робочі тіла. Одночасно з поверхневим пластичним деформуванням (зміцненням) при віброударній обробці часто досягають значного зниження шорсткості поверхні, округлення гострих кромки, отримання певної мікрогеометрії і т.д. У цих випадках в якості робочих тіл використовують абразивні гранули, порцелянові кулі, скляні кульки, гальку і т.д. Робочі тіла підрозділяють на тіла правильної геометричної форми (циліндр, куля, призма, конус, піраміда і т.д.) і тіла довільної форми. Тіла правильної геометричної форми отримують шляхом пресування, штампування, прокатки, видавлювання, а тіла довільної форми - шляхом дроблення або розмелювання.

Робочі тіла грають основну роль в процесі обробки, забезпечуючи з'єм метала і його окислів з оброблюваної поверхні або її пластичне деформування.

В якості робочих середовищ для віброударної обробки використовують розчини наведених нижче речовин.

Кислота стеаринова технічна  $C_{18}H_{36}O_2$  володіє високими поверхнево-активними властивостями.

Кислота олеїнова  $C_{18}H_{34}O_2$  активно створює окисні плівки, знижує знос робочих тіл.

Аеросил-двоокис кремнію  $SiO_2$  - збільшує стійкість до окислювальних процесів, посилює гідрофобність і антистатичні властивості, утворюються плівки.

Тріетаноламін N ( $CH_2CH_2OH$ ) 3 застосовують як адсорбент, інгібітор корозії, миючий засіб, змочувач.

Речовини допоміжні володіють високою поверхневою активністю, інтенсифікують обробку, полегшують видалення продуктів відходу з оброблюваних поверхонь.

Водний розчин полімеру поліметилметакрилату (10% - ний) інтенсифікує процес обробки. Водорозчинний полімер поліакриламід

регулює швидкість розчинення і сприяє утворенню вузького шару на поверхні металу. Для вібраційної ударної обробки металевими робочими тілами деталей, наприклад, з високоміцних сталей і титанових сплавів, застосовують зазвичай водний розчин триетаноламіну і нітрита натрія при концентрації відповідно 1-15 і 2-5 г/л, а при обробці деталей з алюмінієвих сплавів водний розчин калієвого хромпіка  $K_2Cr_2O_7$  при концентрації 2-5 г/л. Дріб, використовувану для різних методів обробки, відповідно до ГОСТ 11964-81Е поділяють на дріб чавунну литу (ДЧЛ), дріб чавунну литу поліпшену (ДЧЛП), дріб чавунну колоту (ДЧК), дріб сталеву литу (ДСЛ), дріб сталеву литу поліпшену (ДСЛП) дріб сталеву колоту (ДСК), дріб сталеву колоту покращену (ДСКП), дріб сталеву, посічену з дроту (ДСП).

Для зміцнення необхідна куляста і міцна дріб. Щоб уникнути деформування дробу в момент удару, твердість її повинна бути вищою за твердість оброблюваного матеріалу. Однак при значному підвищенні твердості дробу збільшується її крихкість, що приводить до розколювання дробу, пошкодження зміцнюючих поверхонь (гострі ризики) і знижує ефективність процесу. Легування чавуну, з якого виходить дріб, нікелем, хромом і особливо міддю дуже покращує властивості дробу. Наприклад, введення в чавун 0,3-0,5% міді підвищує міцність дробу при ударних випробуваннях на 20-50%. Відпал дробу також позначається позитивно.

Випускають також дріб за технічними умовами. Для зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів застосовують дріб діаметром 0,6-1,2 мм з корозійно-стійкої сталі по ТУ ОП 1-809-30-76; ТУ ОП 1-809-85-77; ТУ ОП 1-809-326-79. Скляні кульки діаметром 0,8 - 1,2 мм випускають за ТУ 6-11-288-73, діаметром 6-20 мм - по ТУ 6-11-78-72. Основний недолік чавунного дробу - її підвищена крихкість і, отже, велика витрата при дробоструминній обробки. Так, витрата чавунного дробу на один ротор дробоструминної установки, призначеної для зміцнення ресор при швидкості 70-80 м / с досягає 50 кг/год.

В останній час у вітчизняній і зарубіжній практиці замість дробу з вибіленого чавуну часто застосовують сталеву дріб. Сталева лита дріб проходить загартування при температурі 860-900°C з подальшим низькотемпературним відпуском при 180-220°C протягом 1,5-2 ч. Вона має високу стійкість (витрата її в 30 разів менше, ніж чавунної). Незважаючи на високу вартість у порівнянні з чавунним

дробом, витрати на сталеву дріб в 8-10 разів менше. В якості робочого середовища при зміцненні дробом застосовують технічні масла.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
2. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник.- Дніпро: НМетАУ, 2021,-89 с.
3. Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофєєва, В.П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016 – 238 с.
4. Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування /І.Е.Яковенко, О.А.Пермяков, А.В.Фесенко – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 421 с.
5. Технологічне прогнозування. Вступний курс: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка та 133 – Галузеве машинобудування /О.А.Пермяков, І.Е.Яковенко – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 160 с.