

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

**СІГОВА В.І., РУДЕНКО П.В.**

**МЕТОДИ ЛОКАЛЬНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ  
ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник

Суми  
Видавництво СумДУ  
2008

**УДК 621.78(076.5)**

**С-34**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
(лист № 14/18-Г-1895 від 17.07.2008)*

Рецензенти:

д-р фіз.-мат. наук, професор О.І.Олемскої  
(Інститут прикладної фізики НАН України);  
д-р техн. наук, професор В.Б.Тарельник  
(Сумський національний аграрний університет);  
д-р техн. наук, професор С.Г.Кравченко  
(ТОВ «Сумитеплоенерго»)

**Сігова В.І., Руденко П.В.**

**С-34** Методи локальної поверхневої обробки деталей машин: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 218 с.

**ISBN 978-966-657-235-9**

У навчальному посібнику коротко викладені відомості про сучасні локальні методи зміцнення деталей машин і агрегатів різного призначення.

Навчальний курс «Методи локальної поверхневої обробки та відновлення виробів» є доповненням курсів «Термічна обробка сталей і сплавів» і «Технологічні процеси зміцнення та АСУ ТП» для спеціалістів і магістрів спеціальностей «Прикладне матеріалознавство», «Матеріалознавство у машинобудуванні» і «Металознавство та термічна обробка».

У посібнику містяться методичні вказівки до виконання лабораторних і самостійних робіт. Текст кожної лабораторної роботи має короткі теоретичні пояснення процесу, описання методики проведення експерименту і дослідження результатів. У кожній лабораторній роботі подані питання для тестового контролю вивченого матеріалу.

Подані завдання для виконання обов'язкових домашніх завдань, контрольної роботи для заочників. Для виконання самостійної роботи надані перелік літератури з курсу і таблиці для вибору режимів термічної обробки.

Посібник може бути корисним для спеціалістів, магістрів та аспірантів інженерних спеціальностей.

**УДК 621.78(076.5)**

**ISBN 978-966-657-235-9** © В.І.Сігова, П.В.Руденко, 2008

© Вид-во СумДУ, 2008

## ЗМІСТ

|   | С   |
|---|-----|
| Передмова.....  | 4   |
| 1 Термічна обробка деталей машин з нагріванням струмами високої частоти.....  | 8   |
| 2 Зміцнення сталей і сплавів пластичним деформуванням... ..   | 14  |
| 3 Зміцнення деталей машин електронно-променевим гартуванням.....  | 24  |
| 4 Зміцнення шляхом дії імпульсного електромагнітного поля.....  | 27  |
| 5 Методи динамічного зміцнення.....   | 32  |
| 6 Плазмово-детонаційна технологія поверхневого зміцнення деталей машин, інструменту, штампів і прес-форм.....                 | 42  |
| 7 Електролітно-плазмове гартування (гартування в електроліті).....  | 45  |
| 8 Властивості сплавів і технологічні особливості методів лазерної термічної обробки.....                                      | 46  |
| 9 Лазерне оплавлення поверхонь сплавів.....   | 59  |
| 10 Отримання поверхневих покриттів за допомогою лазерного випромінювання.....   | 62  |
| 11 Вплив умов охолодження на структуру і властивості загартованої сталі після нагрівання СВЧ.....                             | 73  |
| 12 Лабораторні роботи.....  | 79  |
| Лабораторна робота 1 «Зміцнення деталей машин пластичною деформацією».....  | 79  |
| Лабораторна робота 2 «Гартування деталей з нагріванням струмами високої частоти».....   | 103 |
| Лабораторна робота 3 «Нанесення зносостійких покриттів методом конденсації з іонним бомбардуванням на установці «Булат»»..... | 131 |
| Лабораторна робота 4 «Термічна і хіміко-термічна обробка деталей в електроліті».....  | 142 |
| Лабораторна робота 5 «Електроіскрове легування металевих поверхонь».....  | 148 |
| Лабораторна робота 6 «Карбонітрація сталей і сплавів».....  | 175 |
| Лабораторна робота 7 «Вибір охолоджувальних середовищ під час гартування».....  | 186 |
| Завдання для виконання контрольної роботи або обов'язкового домашнього завдання для заочників.....                            | 208 |
| Список літератури.....  | 217 |

## ПЕРЕДМОВА

У матеріалознавстві стан поверхневого шару конструкційного матеріалу є важливим фактором, що визначає експлуатаційні, у тому числі й зміцнювальні, характеристики виробу, оскільки, наприклад, відомо, що руйнування конструкційного матеріалу починається, як правило, з його поверхні, а це призводить не тільки до втрати необхідної міцності виробу, але і до погіршення умов нормальної працездатності через утворення продуктів абразивного зношування третьових поверхонь, втрати розрахункового напруженого стану спряжених елементів конструкції і т.д.

Зміцнення ж поверхневого шару конструкційного матеріалу тими або іншими допустимими методами технологічної дії дозволяють вирішувати багато найважливіших технічних задач, хоча самі по собі розроблення і реалізація таких технологічних методів зміцнення є виключно складною проблемою науки і виробництва. Проте прогрес у розвитку технологій поверхневого або локального зміцнення очевидний, і саме через це відбувається безперервне зростання якісних показників експлуатаційних характеристик деталей машин і робочого інструменту, наприклад, у частині їх ресурсу і зносостійкості, логічним наслідком чого є збільшення величини надійності функціонування найвідповідальніших елементів конструкцій і опірності конструкційного матеріалу різним несприятливим факторам дії: високим знакозмінним навантаженням, агресивним середовищам, великим температурним коливанням.

Пропонований навчальний посібник охоплює сукупність саме таких технологічних процесів поверхневого або локального зміцнення, цільове призначення яких спрямоване на підвищення технічного ресурсу деталей машин і механізмів. У ньому узагальнений матеріал і дані рекомендації у частині вибору і практичного застосування мето-

дів зміцнення. Викладені у посібнику технологічні процеси зміцнення розглядаються відповідно до основних положень сучасної теорії дислокації.

У посібнику подані способи локальної поверхневої обробки іонно-плазмового і лазерного зміцнення, плазмової, детонаційної та інших видів металізації, термопластичного субструктурного зміцнення, динамічного зміцнення і, зокрема, вибухом, термомеханічною і хіміко-термічною обробкою, потім - поверхневим гартуванням при індукційному нагріванні, різними методами поверхневої пластичної деформації, плакуванням з використанням багат шарових композиційних матеріалів захисних покриттів та ін.

Необхідно зазначити, що до цього часу існує близько двохсот технологічних методів поверхневого зміцнення, але публікація їх фрагментарна, тематично несистемна і розрізнена з окремих науково-технічних видань. Єдиної капітальної праці, де були б відображені всі існуючі методи поверхневого зміцнення, немає.

Сучасне металознавство і термічна обробка сталі характеризуються наявністю двох різних напрямів. **Перший напрям** передбачає можливість отримання різних структурних станів варіюванням інтенсивності охолодження. При цьому термічна обробка складається з неварійованого повільного нагрівання для перетворення вихідних фаз в одну високотемпературну й охолодження у різних умовах для створення видозмін продуктів її перетворення. Цей напрямок ґрунтується на вченні Д.К.Чернова.

**Другий напрям – легування сталі.** Основна мета легування спочатку зводилася до можливості змінювати ступінь прогартуваності. Надалі задачі загального металознавства значно розширилися й ускладнилися. Підвищені вимоги техніки зумовили необхідність створення нових сплавів із вищим комплексом властивостей, що зберігають-

ся в спеціальних умовах експлуатації. Шляхом варіювання складу сплавів, рівня нагрівання і часу витримки, зміною умов охолодження досягнуте значне наближення властивостей спеціальних сплавів до конкретних вимог експлуатації виробів. У даний час є спеціальні сплави, придатні для експлуатації в умовах хімічної дії, електротехнічні й магнітні сплави, швидкорізальні теплостійкі і жароміцні і т.д.

**Останніми десятиліттями** одержав розвиток новий самостійний напрям у металознавстві і практиці термічної обробки, який передбачає розроблення нових принципів дії на структуру і властивості сталі та сплавів. Принциповою відмінністю його є можливість додаткового підвищення властивостей **за рахунок дії на будову і загальний стан високотемпературної фази**. Протягом перших 30 років розвитку цього напрямку основна увага надавалася розробленню методів нагрівання, що передбачають **використання внутрішнього джерела тепла – індукційного або контактного електронагрівання**. Виявилося, що стан аустеніту можна суттєво змінювати. Внаслідок цього змінюються характер і умови перетворень під час охолодження, що призводить у ряді випадків до великих відмінностей у формі і просторовому розподілі фаз у продуктах розпаду і до видозмін морфології мартенситу. Для використання можливості дії на високотемпературну фазу виявилося необхідним вирішити ряд нових складних питань, що належать до механізму і кінетики утворення цієї фази.

Значної уваги потребують питання, пов'язані з особливостями перетворення різних форм аустеніту **за різних умов охолодження**.

Необхідно також відзначити особливі можливості дослідження таких явищ у сталі, які виникають лише у разі **застосування швидкого нагрівання**.

Останніми десятиліттями значного розвитку набуло вивчення іншої форми дії на аустеніт – **механічної деформації (термомеханічна обробка)**. У зв'язку з цим **важливого значення набуває комбінована дія на високотемпературну фазу**, створювана швидким електронагріванням і деформацією одержаного при цьому аустеніту – електротермомеханічна обробка.

Індукційне нагрівання досліджують і застосовують при термічній обробці вже більше 40 років. У даний час його використовують на машинобудівних, приладобудівних, металургійних та інших заводах. У ряді випадків на обробку цим методом переведено до 75-80% усіх виробів, що піддаються термічній обробці.

Термічна обробка з використанням різних форм електричного нагрівання у зв'язку з великими принциповими перевагами і величезними можливостями в майбутньому набуде ще більшого розвитку і широкого поширення. Останніми роками проводять дослідження умов використання **електронно-променевого нагрівання**, а також швидкого нагрівання **при дії світлового променя лазера**.

**Індукційне нагрівання**, що передбачає передачу енергії безконтактним способом, знаходить найширше і різноманітне застосування у сучасній техніці: в електрометалургії для отримання високоякісних сортів сталі, зонної плавки чистих металів, нанесення полуди на тонкий лист у потоці, в операціях кування і штампування, у хімічній, текстильній промисловості і в цілому ряді спеціальних виробництв. Дуже ефективне і доцільне використання індукційного нагрівання для термічної обробки металів і сплавів. Цей вид нагрівання широко застосовують для гартування, нормалізації, патентування, відпуску, хіміко-термічної і термомеханічної обробок. Індукційне нагрівання з розвитком його теорії і доцільної технологічної практики повинне займати положення основного напрямку в те-

рмічній обробці. Операції термічної обробки, що передбачають використання електричного нагрівання, надалі можуть знайти застосування для забезпечення далеких польотів у космічних умовах. Електричний струм, що виробляється в результаті перетворення сонячної енергії, є дуже доцільним теплоносієм під час здійснення операцій термічної обробки.

## **1 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН З НАГРІВАННЯМ СТРУМАМИ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ**

Для визначення фізичної можливості і доцільності використання великих швидкостей нагрівання розглянемо сталевий кут діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 1). Для більшості видів термічної обробки з повільним нагріванням основним правилом призначення температури нагрівання є  $t = Aс3 + (20-30^{\circ}C)$ .

У цьому випадку нагрівання досягає тільки найбільш низькотемпературної частини аустенітної області. Нагріваючи до вищих температур цієї області, як правило, не використовують. Температурний інтервал до переходу в рідкий стан залишається дуже великим і становить 400-700°C (залежно від складу сталі). Він значно менше лише для деяких сталей ледебуритного класу. Отже, зміщення фазових перетворень до вищих температур у разі застосування великих швидкостей нагрівання для більшості сталей не зобов'язує проводити нагрівання до температур за межами аустенітної області, тобто за межами існування тільки твердої фази.

Швидкості нагрівання, практично використовувані на сьогодні, становлять 100-1000 град./сек. У цьому випадку завершення фазових перетворень може зміститися вище на 50-200 град. і більше. Зі всього температурного інтервалу



існування аустенітної області практика термічної обробки при індукційному нагріванні «використовує» приблизно  $\frac{1}{3}$  його величини. Це значно більше, ніж при повільному нагріванні, коли «використовується» тільки  $\frac{1}{20}$  температурного інтервалу аустенітної області.

Відомо, що кінетика процесів виникнення зародків нової фази і їх зростання характеризується наростанням темпу розвитку у міру підвищення температури.

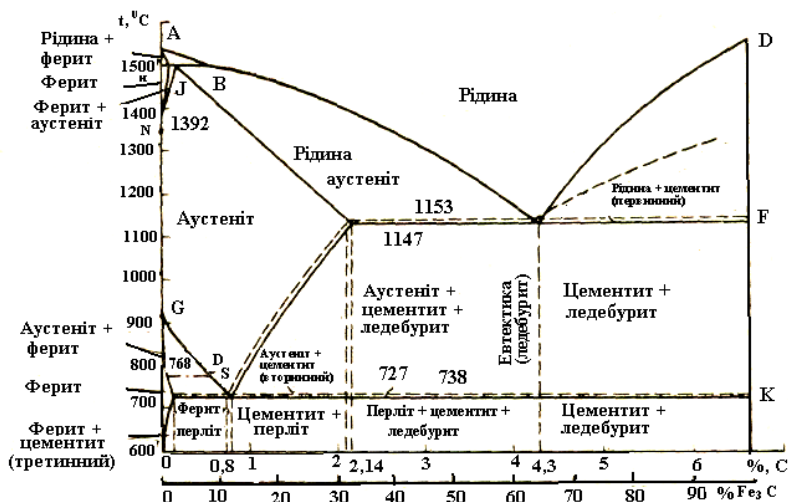


Рисунок 1 - Діаграма стану залізо-вуглець

Однак є дуже суттєві кількісні відмінності. Посилення темпу розвитку процесу зародження відбувається швидше, ніж прискорення зростання зерен нової фази. З підвищенням температури спостерігається все більше кількісне випередження швидкості зародження над швидкістю зростання. У загальному процесі утворення аустеніту у міру його зміщення в область вищих температур все більшу роль відіграє процес зародження. Процес же зростання зерен значнішою мірою пригнічується. Регулюючи кількість

введеної енергії, тобто варіюючи швидкістю нагрівання, можна створювати різний ступінь переваги процесу зародження над процесом зростання зерен нової фази. Отже, можливе створення таких умов проходження фазових перетворень, коли майже єдиною можливістю переходу вихідних фаз в аустеніт виявляється процес зародження, що охоплює майже одночасно весь нагрівальний об'єм. Таким чином, відкривається можливість створення найрізноманітнішого стану аустеніту – від дуже крупнозернистого до дрібнозернистого, коли розміри зерен виявляються сумірними з критичним розміром при температурі, що досягається у процесі нагрівання.

Ця обставина може бути дуже ефективно використана з метою поліпшення властивостей сплаву після гартування, оскільки поєднання великих швидкостей нагрівання з варіюваною вихідною структурою дозволить одержувати також різну неоднорідність твердого розчину, досягати оптимальних її значень для різних умов служби. Швидке нагрівання відкриває також можливість створення градієнтно регульованих концентраційних зон навколо частинок другої фази. При оптимальному розміщенні частинок другої фази і на основі правильно відрегульованого дифузійного поширення вуглецю і легуючих атомів усередині концентраційних зон, що створюються, засобами термічної обробки можна найефективніше «конструювати» структуру сплаву, одержувати кращий опір руху дислокацій при зовнішньому навантаженні. Це дозволяє суттєво покращувати механічні властивості сталі.

Зміщення основних фазових перетворень до найвищих температур (усередині інтервалу існування  $\gamma$ -області) створює інші умови для процесу дифузійного насичення поверхневих шарів вуглецем і легуючими елементами. Проникнення дифундуючих атомів цих елементів у шар металу, що має зародки головним чином розмірами, близь-

кими до критичних, відбувається значно швидше, ніж при звичайній цементатії, дифузійному хромуванні і т.д.

Поєднання дифузійного насичення поверхні з процесом зародження аустеніту у всьому насичувальному шарі призводить, таким чином, до прискорення процесів цементатії, хромування і т.д. у декілька разів.

Швидке нагрівання дуже ефективно і в процесах ТМО. Доцільність такого нагрівання при ВТМО впливає із зіставлення схем, наведених на рис. 2. Схема рис. 2 а і б ілюструє відмінність у величині зерен аустеніту до кінця нагрівання перед деформацією. Замість крупнозернистого аустеніту (рис. 2 а), що виникає при повільному нагріванні, у разі швидкого електронагрівання створюється дрібнозернистий аустеніт (рис. 2 б). Деформація сталі з таким різним станом рівноважного аустеніту призводить до великих відмінностей у характері текстури (рис. 2 в і г). У дрібнозернистому текстурованому аустеніті, створеному деформацією після швидкого нагрівання, число стиків зерен у багато разів більше. Тому зародки рекристалізації виникають одночасно в значно більшій кількості місць. Природно чекати, що застосування швидкого електронагрівання при ВТМО дозволяє одержувати вищі міцність і пластичність. Далі буде показано, що наведені теоретичні передумови повністю підтверджені експериментальною перевіркою.

Швидке нагрівання може відігравати велику роль при НТМО. Відомо, що НТМО ряду сплавів дозволяє одержувати ще більший вигравш у механічних властивостях, ніж ВТМО. Проте для реалізації цієї переваги необхідно застосовувати при НТМО великі ступені деформації (до 70-80%). Тільки в цьому випадку створюються достатньо висока щільність дислокацій і оптимальна структура дислокації. Проте відомо, що при існуючому прокатному устаткуванні реалізація НТМО надто утруднена через необхідність деформації із зазначеними високими ступенями при

порівняно низьких температурах (у області найбільшої стійкості аустеніту, набагато нижчій  $A_1$ ).

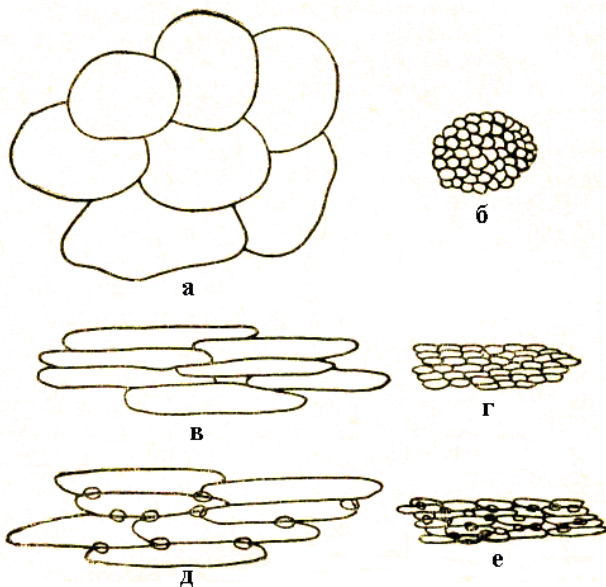


Рисунок 2 - Схема зміни зеренної структури металу при термо-механічній (а, в, д) і електротермомеханічній обробці (б, г, е)

Як було зазначено, при швидкому нагріванні забезпечується отримання дрібнозернистого аустеніту, внутрішньозеренна будова якого характеризується також більшою дрібноблочністю. При деформації досягається додаткове підвищення щільності дислокацій, а можливо, і деяка додаткова фрагментація у внутрішньозеренній будові.

Швидке індукційне нагрівання доцільне, крім того, у тих випадках, коли при подальшому нагріванні необхідно відновити властивості, одержувані ТМО. Заготовки, що пройшли ТМО, для полегшення подальшої механічної обробки піддають високому відпусканні. При цьому великою мірою знижується міцність сталі. У цьому випадку можна

відновити високу міцність до рівня, одержаного ТМО за допомогою гартування при швидкому індукційному нагріванні. За певних умов використання індукційного нагрівання дозволяє додатково зміцнити сталь без погіршення пластичності.

Необхідно зазначити, що застосування індукційного нагрівання не завжди ефективне. Воно, безумовно, недоцільно для відпалу сталі.

З великою **обережністю** потрібно підходити до застосування **індукційного нагрівання для гартування швидкорізальної сталі** та інших сталей, що не мають великого інтервалу між температурою звичайного нагрівання під гартування і температурою плавлення. Оскільки підвищити температуру основних фазових перетворень неможливо, швидке нагрівання в цьому разі не забезпечує необхідного насичення твердого розчину вуглецем і легуючими елементами. Для швидкорізальної сталі це призводило б до суттєвого **зниження червоностійкості**. Можливо, що надалі, коли будуть добре освоєні методи стабілізації температури при індукційному нагріванні, створяться дещо кращі умови для індукційного нагрівання швидкорізальної сталі. Але і в цьому випадку весь очікуваний вигравш може полягати лише в скороченні часу досягнення температури гартування.

**Не завжди є такі принципи підстави для широкого застосування індукційного нагрівання при відпусканні.** Для тих сортів сталі, які в звичайних умовах піддаються високому відпусканню, прискорення нагрівання виключене через те, що підвищити температуру, зважаючи на близькість критичної точки  $A_1$ , неможливо.

У тих випадках, коли потрібно застосувати низьке відпускання, індукційне нагрівання, зміщуючи процеси перетворення в область вищих температур (на 300-400 град. вищі за звичайні температури відпускання), забезпечує

проходження їх за менший час. Це відкриває можливість застосування індукційного нагрівання для відпускання.

Індукційне нагрівання при відпусканні доцільне для поверхнево загартованих виробів, якщо він виконується струмом такої частоти, глибина проникнення якого близька до товщини загартованого шару. У цьому разі здійснюється активне електричне нагрівання.

## **2 ЗМІЩЕННЯ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ**

### **2.1 Термомеханічна обробка сталі**

Уявлення про вирішальну роль структури у формуванні ряду найважливіших, так званих структурно-чутливих властивостей дуже розвинулися, й експериментально доведені положення про вплив на ці властивості недосконалості будови реальних кристалів. Показано, що недосконалість будови багато в чому визначає механізм і кінетику фазових і структурних перетворень при термічній обробці, тобто характер остаточної структури, що задає властивості металевого сплаву. Звідси випливає, що доцільно управляти щільністю і розподілом недосконалості (головним чином, дислокації) у металі на різних стадіях термічної обробки з тією метою, щоб раціонально спрямувати процеси структуроутворення і набути оптимальних властивостей. Одним з основних методів регулювання структури дислокації є пластична деформація. Ці твердження приводять до висновку про доцільність з'єднання пластичної деформації і фазових (структурних) перетворень в єдиній технологічній схемі обробки сплавів.

Така комплексна дія на структуру металевого сплаву і становить суть термомеханічної обробки (ТМО).

**Термомеханічну обробку** потрібно розуміти як сукупність операцій деформації, нагрівання й охолодження

(у різній послідовності), у результаті яких формування остаточної структури металевого сплаву, а отже і його властивостей, відбувається в умовах підвищеної щільності і відповідного розподілу недосконалості будови, створених пластичною деформацією.

При термомеханічній обробці звичайну операцію гартування ніби розривають **на дві окремі операції – деформацію аустеніту** з утворенням визначеної субзеренної і структури дислокації та **гартування** з утворенням мартенситу. Потім здійснюють **відпускання сталі**.

**Основними параметрами термомеханічної обробки**, від яких залежить її ефективність, є температура, швидкість, ступінь, дробова і схема (спосіб) деформації, а також тривалість перебування сталі в аустенітному стані після деформації. Чим нижча температура і більший ступінь деформації аустеніту, тим більше підвищується міцність після термомеханічної обробки. Існує приблизна лінійна залежність між зміцненням аустеніту при деформації і приростом мартенситу, що утворився з нього. Після деформації при відносно високих температурах, коли деформаційне зміцнення аустеніту тією чи іншою мірою знімається швидкоплинними процесами знеміцнення, досягається значно менше підвищення опору деформації.

Залежно від необхідного рівня властивостей і складу сталі температура деформації береться від 950-900<sup>0</sup>С до 500<sup>0</sup>, а ступінь – від 15-20% до 90%. При порівняно високих температурах (700-950<sup>0</sup>С) ступінь деформації звичайно не перевищує 30-40%; при підвищенні швидкості деформації, дробовій її і легуванні елементами, що затримують рекристалізацію, сумарний ступінь деформації може бути збільшений. Термомеханічна обробка з деформацією аустеніту призводить до підвищення ступеня зміцнення у міру підвищення ступеня деформації (як правило, береться ступінь деформації до 75-90 %).

Такий вид обробки призводить до суттєвого зміцнення матеріалів.

Зростання міцності сталі після термомеханічної обробки пояснюється підвищенням щільності дислокацій у мартенситі, дробленням його кристалів на окремі фрагменти величиною в частки мікрона, розділені межами дислокацій або скупченнями дислокацій.

**Технологічні процеси ТМО** застосовуються в машинобудуванні і металургії. При цьому деформація виконується шляхом плющення, волочіння, видавлювання, викочуванням у кувальних вальцях або штампуванням.

Особливо сильно ТМО позначається на короточасних зміцнювальних характеристиках, меншою мірою – на параметрах тривалої високотемпературної міцності. Проте практично для кожного матеріалу, який може бути підданий термомеханічній обробці, існує область робочих температур, де ТМО може бути ефективною і при тривалій експлуатації.

Термомеханічне зміцнення, як це впливає з результатів промислових випробувань виробів, є в даний час найефективнішим способом економії широко поширених у техніці сталей. Використання ТМО дозволяє зменшити витрату металу під час виробництва масових видів металовиробів, зменшити перетини, скоротити кількість запасних частин (у зв'язку зі збільшенням надійності, замінити леговані сталі на вуглецеві).

За певних умов виявляється так званий **ефект спадкоємності**. Він полягає у тому, що зміцнена ТМО сталь може бути піддана високому відпусканню і потім звичайній термічній обробці, гартуванню і відпусканню. При цьому зміцнювальний ефект ТМО частково зберігається. Фізичні причини, що визначають підвищення міцності в результаті термомеханічної обробки, полягають у тому, що ті зміни в будові аустеніту, які створюються під час його деформації,



«успадковуюються» мартенситом, що утворюється при подальшому гартуванні.

При деформації аустеніту збільшується число («щільність»), дислокацій у ньому, кристали аустеніту дробляться на окремі фрагменти. Залежно від температури деформації формується та або інша субструктура (внутрішньозеренна структура) аустеніту. При відносно низьких температурах деформації щільність дислокацій більше; при вищих температурах - менше, але їх розміщення більш упорядковане, й усередині зерен аустеніту утворюються субмежі дислокацій; при ще вищих температурах нагрівання деформації, вже в ході її починається рекристалізація. Якщо деформація аустеніту здійснюється за таких температурно-тимчасових умов, які призводять до рекристалізації, але без зростання зерен, може бути одержане дуже дрібне зерно аустеніту (діаметр зерна  $10^{-1}$  мкм), а при подальшому гартуванні - відповідно кристали мартенситу дуже малих розмірів.

Це призводить до підвищення значень тимчасового опору, межі текучості і пониження критичної температури крихкості.

Досвід показує, що ТМО застосовується, в першу чергу, для отримання зміцнених сталевих виробів порівняльно простою геометрією з мінімальною подальшою механічною обробкою (аркуш, смуга, стрічка, ресори).

ТМО приводить до поліпшення властивостей сталі за однією з трьох таких схем:

- «спадкоємність» мартенситом дефектів структури дислокації аустеніту, що сформувалися в ході деформації витримки перед гартуванням;

- подрібнення мартенситу, що утворюється у подрібненому в ході рекристалізації аустенітному зерні;

- зменшення частки немартенситних продуктів перетворення завдяки підвищеній стійкості деформованого аустеніту в проміжній (бейнітної) області температур.

Теорія ТМО базується на сучасних положеннях металофізики про структурну чутливість механічних властивостей і про механізм дислокації пластичної деформації.

ТМО дозволяє підвищити механічні властивості як сталей з низьким, середнім і високим вмістом вуглецю, так і низько-, середньо- і високолегованих сталей.

Так, наприклад, обкатка роликками і негайне гартування нагрітого струмами високої частоти поверхневого шару валів холодного плющення дозволяють підвищити їх зносостійкість в 2-3 рази.

Найширшою групою матеріалів, зміцнюваних термо-механічною обробкою, є сталі з різним вмістом вуглецю.

У результаті нагрівання до температур вище точки АС<sub>3</sub> сталь переходить у стан аустеніту, зерна якого при правильно вибраному режимі пластичної деформації дробляться на фрагменти. Завдяки наявності високої температури паралельно з деформацією проходять дифузійні процеси, спрямовані на перерозподіл дефектів ґраток і утворення субструктури. (Ділянок з незначних дезорієнтацією ґраток, розділених субмежами природи дислокації. Величина цих субзерен і їх взаємна дезорієнтація є змінною функцією температури, ступеня, швидкості пластичної деформації і часу витримки у діапазоні температур інтенсивного проходження дифузійних процесів).

Розміри субструктурних елементів, що формуються при ТМО, в 2-4 рази менше аналогічних елементів, що утворюються при звичайному гартуванні. При подальшому гартуванні такого деформованого аустеніту утворюються дрібніші пластинки мартенситу, знижується рівень мікронапружень, що позитивно впливає на пластичність і в'язкість.

Така схема ТМО називається високотемпературною (ВТМО) (рис. 3).

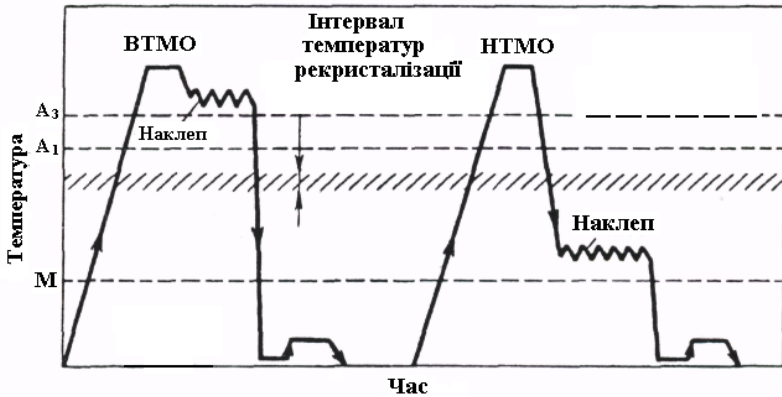


Рисунок 3 - ВТМО і НТМО

Дослідження субструктури рентгенографічним методом дозволяють оцінити середньостатичні зміни в субструктурі. Якнайповніші субструктура виявляється методами електронної мікроскопії. Різде охолодження (гартування) дозволяє фіксувати при низькій температурі структуру аустеніту, що утворилася до кінця пластичної деформації при високій температурі. Після досягнення точки  $M_n$  (початок мартенситного перетворення) відбувається утворення мартенситу за звичайною схемою.

Якщо попередню пластичну деформацію аустеніту проводити в температурних умовах, коли він є тим, що переохолоджує (нижче за точку  $A_{c3}$  і, як правило, при  $T \approx 500^\circ\text{C}$  або ще нижче), відбуваються анолічні описані процеси і матеріал значно зміцнюється. Це пояснюється тим, що явище повернення в таких умовах проходить із значно меншими температурами, ніж у разі високотемпературної деформації, а процеси рекристалізацій взагалі виключаються. Така схема ТМО називається низькотемпературною.

Проведення ТМО забезпечує отримання високих характеристик міцності сталі при випробуванні на розтягування. Це досягається при високотемпературній (ВТМО) і низькотемпературній (НТМО), що передбачає гартування на мартенсит після теплої або гарячої деформації аустеніту.

Застосовуються й інші схеми, умовно названі ізотеричними, які пов'язані з отриманням остаточної феритно-перлітової, перлітової (ВТМізО) або бейнітної (НТМізО) структур, що забезпечують вищу в'язкість сталі при меншій міцності на розрив.

З'явилися різні варіанти контрольованого плющення, застосовні до низьковуглецевих сталей, які, як правило, взагалі не гартуються на мартенситну структуру.

Усі ці обробки, звичайно, потрібно відносити до ТМО. Сюди ж відносять і технологічні процеси, що забезпечують отримання високої пластичності, наведеної перетворенням (ПНП-ефект), і надпластичного стану металів, оскільки потрібні властивості аустеніту в ПНП сталях або необхідна дрібнозерниста будова надпластичних сплавів досягається термодформаційною дією.

На остаточні властивості сталі після термомеханічної обробки дуже впливає ступінь чистоти вихідного матеріалу. Зі збільшенням чистоти підвищується загальний запас пластичності, що дає можливість збільшити попередню деформацію, підвищити дисперсність мартенситу. Підвищення загального запасу пластичності зменшує ймовірність утворення і розвитку мікротріщин під час проведення ТМО і в подальшій експлуатації матеріалу.

ТМО пластична деформація, що проводиться при різних видах, і подальше охолодження супроводжуються значними спотвореннями кристалічних ґраток і збільшенням щільності дислокацій. Ці дефекти ґраток частково зберігаються і в новій фазі після проходження поліморфного перетворення. Шляхи вільного пробігу дислокацій у такій

структурі стають коротшими, а число елементарних актів пластичної деформації в одиниці обсягу матеріалу – більшим. Завдяки збільшенню ступеня одночасності роботи міжатомних зв'язків міцність матеріалу зростає при збереженні задовільної пластичності. Іншими словами, під час проведення термомеханічної обробки зростання зміцнювальних характеристик реалізується за рахунок другого шляху підвищення міцності: накопичення в матеріалі якомога більшого числа спотворень кристалічних ґраток.

При ТМО матеріал набуває такого структурного стану, при якому поглинання енергії (наприклад, у вигляді механічного навантаження), що підводиться ззовні, стає більш рівномірним.

Досягши певної щільності дислокацій, т.зв. критичної, ґратки так значно розпушуються, що елементарні акти ковзання виявляються важкими і матеріал набуває схильності до крихкого руйнування.

При проведенні ВТМО термомеханічної обробки залишаються у силі й інші фактори збільшення міцності, що мають місце при звичайних видах зміцнювальних обробок:

1 Дія поліморфного перетворення як фактора накопичення напружень за рахунок відмінності в питомих обсягах мартенситу та аустеніту.

2 Спотворення ґраток заліза за рахунок збільшення концентрації впроваджуваних атомів вуглецю.

3 Гальмування руху дислокацій двійниковими межами.

Існують чотири основні види термомеханічної обробки сталей, два з яких вже були названі:

1. **Високотемпературна (ВТМО)**, коли деформація здійснюється при температурах вище за температуру рекристалізації аустеніту: як правило, це - температура, яка лежить вище за точку  $A_{c3}$ , тобто сталь деформує в зоні існування стабільного аустеніту (рис. 3).

2. **Низькотемпературна (НТМО)**, при якій деформація проводиться при температурах нижче за поріг рекристалізації аустеніту; як правило це відповідає температурній області нестійкого аустеніту (метастабільного), тобто, нижче за точку  $A_{c1}$  але вище за температуру початку мартенситного перетворення (рис. 3). Цей метод обробки одержав за кордоном найменування «асформінгу».

3. **Попередня термомеханічна обробка** (рис. 4 і 5) (ПТМО).

4. ТМО з деформацією мартенситу.

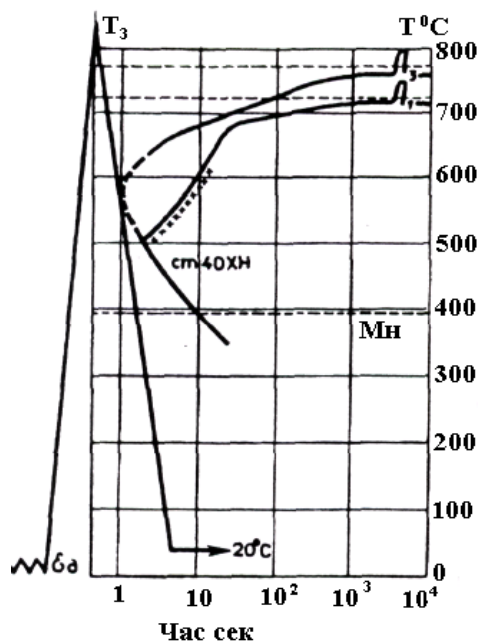


Рисунок 4 – ПТМО для сталі 40ХН

Великий інтерес становить явище спадкоємності («оборотності») зміцнення від ВТМО при повторній термічній обробці. Виявилось, що зміцнення від ВТМО зберіга-

ється, якщо сталь перегартувати з короткочасною витримкою при температурі нагрівання - під гартування або якщо зміцнену ВТМО сталь спочатку піддати високому відпусканню, а потім перегартувати.

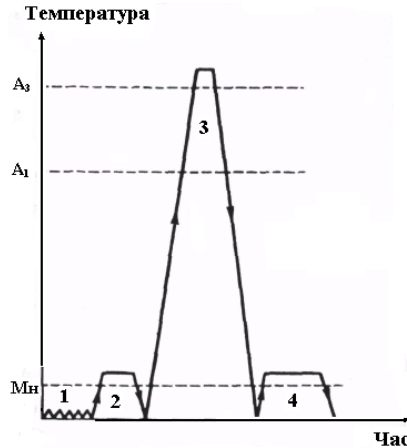


Рисунок 5 – ПТМО

Ефект спадкоємності зміцнення при повторних короткочасних нагріваннях дозволяє розширити область застосування ВТМО. Наприклад, сталь можна загартувати з прокатного нагрівання, після чого піддати її високому відпусканню, що дає можливість проводити обробку різанням або іншу механічну обробку. Одержаний виріб після гартування з невеликою, витримкою набуває підвищену міцність, яка ніби уже була «закладена» в метал при ВТМО. Ефект спадкоємності дуже стійкий.

У роботі Д.А.Прокошина, А.Г.Васильєвої і В.А.Акімова одержане підтвердження ефекту спадкоємності зміцнення, створеного ВТМО, на сталі 40X2H4CM.

М.В.Приданцев і Е.І.Іванцова при дослідженні сталі типу 50X2ГС2 також знайшли збереження зміцнення, створеного ВТМО, подальшої кристалізації.

### **3 ЗМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ГАРТУВАННЯМ**

В основі електронно-променевого нагрівання лежить перетворення кінетичної енергії потоку електронів у теплову при взаємодії з поверхнею виробу, що нагрівається.

Електронно-променеві установки досить широко використовують у машинобудуванні для різання і зварювання. Подібні ж установки, але з меншою концентрацією потужності, можна застосовувати для поверхневого нагрівання металу при термічній обробці. Існуючі електронно-променеві установки, що забезпечують точне позиціонування променя і задане тепловідведення, з відповідними пристосуваннями використовуються для локальної термообробки деталей широкої номенклатури із сталей і чавуну. Комп'ютер дозволяє регулювати відхилення променя таким чином, що розфокусований промінь сканується на оброблюваній поверхні деталі, повідомляючи їй послідовний ряд мікроімпульсів енергії, внаслідок чого відбувається нагрівання в точно заданій ділянці поверхні, яка забезпечує отримання аустенітної структури. Коли нагрівання припиняється, поверхня самозагартується і набуває задану твердість. Для захисту емітера електронів від окислення і запобігання їх розсіянню потрібен високий вакуум у зонах отримання і прискорення електронів. Як правило, у камері електронної гармати за допомогою турбомолекулярного насоса підтримується вакуум  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па, тоді як оброблювані вироби знаходяться в камері, відкачуваній механічним насосом до 6,7 Па.

Електронний промінь "бомбардує" поверхню деталі енергією з густиною до  $8 \text{ МВт/см}^2$ . Розподіл енергії по поверхні за методом "растрової сітки" полягає в розділенні цієї поверхні на ряд адекватно розміщених точок. Електронний промінь послідовно переміщається від однієї лока-



лізованої ділянки до іншої через певні інтервали часу (мінімальні 20-І-6 с), а потім переводиться з дуже високою швидкістю до наступної точки за траєкторією, відповідною заданому контуру поверхні, яка підлягає термообробці. Ця "растрова сітка", по якій переміщається промінь, зберігається протягом всього циклу термообробки, її повторюваність становить 200-300 раз/с.

*Енергія променя* передається на поверхню виробу двома різними методами: "статичною" і "рухливою" сіткою. При цьому забезпечуються швидке нагрівання і формування аустенітної структури, особливості якої залежать від складу заготованого металу.

При методі "статичної" сітки виріб і джерело енергії залишаються нерухомими. Цей метод застосовують у тих випадках, коли оброблювана площа не перевищує 6,5 см<sup>2</sup>.

*Метод "рухливої" сітки* використовують для термообробки гільз циліндрів, кілець, валів або інструментів, причому промінь у процесі обробки прямує паралельно осі оброблюваної деталі. Для запобігання перегрівання поверхні і її розплавлення за допомогою комп'ютера регулюють тривалість нагрівання, енергію променя, струм променя, прискорювальне напруження та інші параметри.

Типовий час, що вимагається для розчинення невеликої кількості рівномірно розподіленого в аустеніті Fe<sub>3</sub>C, становить близько 1/3-1/2 с. За цей час прогрівається шар завтовшки 0,025 см, що достатньо для подальшого гартування. Якщо енергія променя прикладається протягом 1-3 с, товщина зони, в якій формується аустенітна структура, збільшується. Швидкість охолодження після відведення електронного променя дуже велика; якщо вона перевищує 2200-3992°С/с, аустеніт перетворюється на мартенсит. Перетворення в мартенсит, отримання максимальної твердості поверхні і товщини зміцненого шару залежать

від маси деталі, вмісту вуглецю і вихідного стану основного металу.

У цілому твердість поверхні після електронно-променевої обробки як правило, на 1-2 од. за Роквеллем вище тієї, яку одержують після звичної термообробки. Крім того, утворення мартенситу на поверхні викликає залишкові стискувальні напруги, що підвищують зносостійкість.

Перед циклом термообробки для забезпечення установки сітки рекомендується *демагнітизація деталей* (близько 2 Гс або менше) пропусканням їх через котушку змінного струму.

При термообробці круглих деталей (циліндрів, кілець або валів) на поверхні може утворитися лінійна або спіральна зона відпускання шириною 0,05-0,1 см. Установлено, що при комп'ютерному управлінні променем ця зона відпускання не робить помітного впливу на зносостійкість. Оскільки підведення енергії і самогартування здійснюються надзвичайно швидко і рівномірно, розмір і товщину зони зміцнення одержують дуже точними, зона термічного впливу мінімальна, не потрібні правка і шліфування, не відбувається окислення. На відміну від лазерної термообробки не потрібні поглинальні покриття, відсутні захисні гази. При електронно-променевої обробці використовуються 74% прикладеної енергії, при лазерній - тільки 15%.

Створені *різні типи машин електронно-променевої обробки* для різного застосування і виробничих вимог. Типовим прикладом застосування електронно-променевої обробки в автомобільній промисловості є гартування клапанних коромисел. Матеріал, з якого вони виготовляються, має такий *хімічний склад*: 2,2-2,9% С; 0,15-1,25% Мn; 0,02-0,15% Р; 0,02-0,20% S; 0,9-1,9% Si; 0,9-1,1% Cr; 0,4-0,7% Мо. Площа зони термообробки – 4 см, тривалість термообробки – 1,5 с (з використанням методу "статичної сітки"),

товщина зміцненого шару – 1-1,5 мм, твердість на поверхні - HRC 64,5 і на товщині – 1-1,5 мм - HRC 59.

Електронно-променеві установки дешевші лазерних. Електронно-променеве нагрівання найбільш ефективне, якщо промінь спрямований нормально до загартованої поверхні, за необхідності обробки внутрішніх поверхонь промінь можна відхилювати магнітним полем і направляти на поверхню виробу під гострим кутом (до 25-30°). Час обробки при цьому декілька збільшується, але все таки залишається достатньо малим (у межах секунд). Термообробці електронним променем можна піддавати такі автомобільні деталі: куркульки, ротори, деталі кріплення, робочі поверхні підшипників, кулачкові шайби, кульові з'єднання, гільзи циліндрів, різці, кулачкові, колінчасті і вторинні вали, роторні шпинделі, сполучні ланки конвеєрів, деталі зчеплень, сідла і тарілки клапанів, шестерні, інструменти.

#### **4 ЗМІЦНЕННЯ ШЛЯХОМ ДІЇ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

*Метод магнітно-імпульсного зміцнення* полягає у тому, що металева деталь поміщається у сильне імпульсне магнітне поле, створюване за допомогою миттєвого розряду накопиченої в конденсаторній батареї енергії на котушку індуктивності (робочий індуктор).

На відміну від інших відомих методів підвищення зносостійкості при магнітно-імпульсній обробці електрична енергія безпосередньо перетворюється в механічну й *імпульс тиску магнітного поля діє безпосередньо на деталь* без участі якого-небудь передавального середовища. Це дозволяє здійснювати підвищення зносостійкості як у вакуумі, так і в будь-якому середовищі, що не перешкоджає поширенню магнітного поля.

Під час проходження розрядного струму через індуктор в оточуючому його просторі утворюється електромагнітне поле, яке відповідно до закону електромагнітної індукції наводить струми в заготовці. В результаті взаємодії струму, наведеного в деталі, з електромагнітним полем індуктора виникають динамічні дії на заготовку.

При магнітно-імпульсному зміцненні *проникнення магнітного поля через деталь* призводить до появи так званої "*магнітної подушки*".

Найбільш широко застосовують *спосіб деформації* при магнітно-імпульсній обробці металів, заснований на використанні динамічних зусиль відштовхування, що виникають між індуктором і деталлю при розряді батареї конденсаторів через індуктор.

Хороша провідність деталей є однією з основних умов магнітно-імпульсної обробки, оскільки магнітне поле індуктора інтенсивно впливає на деталь лише в тому випадку, якщо воно не встигає проникнути крізь стінки деталі за час розряду. Тому матеріали, що *погано проводять електричний струм*, перед обробкою вимагають нанесення на їх поверхню *покривів з хорошою провідності*.

Деформація імпульсним електромагнітним полем використовується в установках, що дозволяють проводити зміцнення плоских зразків, виготовляти плоскі вироби певної форми (спосіб просічення), одержувати плакувальні металеві композиції тонкого перетину з легких металів і сплавів і т.д.

Величина тиску, що виникає при деформації імпульсним магнітним полем, приблизно того самого порядку, що і при штампуванні вибухом, причому цей тиск можна легко регулювати шляхом зміни напруження при постійній ємності конденсатора.

На рис. 6 наведена одна з поширених *схем деформації енергією електромагнітного поля*. Оброблювану деталь 1 у

вигляді труби електропровідникового матеріалу (з питомим електроопором не більш  $0,0015 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) поміщують всередину котушки-соленоїда 2. При розряді конденсатора 3, що знаходиться під високою напругою, через розрядник, усередині соленоїда утворюється електромагнітне поле, яке розвиває великий радіальний тиск, що діє у напрямі до центра труби і викликає її осідання.

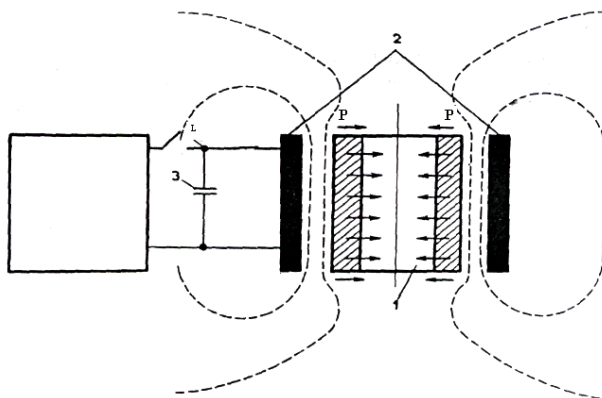


Рисунок 6 - Схема деформації трубної заготовки в електромагнітному полі

Залежно від вибраного режиму можна досягти зменшення діаметра трубної заготовки на 20-25% і більше. Створені і використовуються *схеми імпульсної електромагнітної деформації*, що дозволяють здійснювати збільшення діаметра (роздачу) труб та інших деталей циліндрової форми.

*Магнітно-імпульсним методом* можна зміцнювати деталі з різних *матеріалів і сплавів*, але на практиці найбільш широко використовують матеріали з *високою електропровідністю* (алюміній, мідь і їх сплави), оскільки вони допускають пряме формоутворення заготовок.

*Зміцнення матеріалів із зниженою електропровідністю (наприклад, вуглецевих і корозієстійких сталей), доводиться здійснювати через передавальне середовище або через так звані "супутники" – проміжні матеріали з високою електропровідністю, що поміщаються на оброблювану заготовку.*

Відсутність контакту з формоутворювальними інструментами дозволяє *зміцнювати металеві деталі, укладені у футляри* (контейнери з неметалічних матеріалів). При цьому магнітне поле індуктора, в якому поміщений контейнер з оброблюваною заготовкою, проникає через стінки останнього на оброблювану деталь. Таку технологію застосовують, зокрема, для виготовлення деталей, що вимагають обробки в особливо чистих умовах, під час вивчення впливу різних параметрів процесу на мінімальне зусилля, необхідне для отримання оптимального ступеня зміцнення. Магнітно-імпульсне зміцнення металу можна здійснювати з використанням як *передавальне середовище рідини* (магнітно-гідравлічна формозміна).

Важливою перевагою описуваних методів є можливість *зміцнювати метал у шарі значно більшої глибини*, ніж при наклепі методами пластичної деформації. Зміцнення металу відбувається в результаті дії основної і відбитої ударних хвиль, причому ефект зміцнення не можна пояснити тільки пластичною деформацією металу, оскільки ступінь залишкової деформації при імпульсному зміцненні значно менше, ніж при зміцненні статичною деформацією. У ряді випадків зміцнення при імпульсній обробці спостерігається навіть при залишковій деформації, близькій до нуля. Якщо при статичному стисненні деформація супроводжується сильною формозміною зерна і здійснюється переважно ковзанням, то при імпульсному зміцненні вона відбувається за механізмом інтенсивного двійникування і супроводжується виникненням великої

кількості рівномірно розподілених дислокацій. Зміцнення металів під дією сильних ударних хвиль можна пояснити зародженням дислокацій в областях, раніше вільних від них. Це зародження дислокацій відбувається при досягненні дотичними напруженнями рівня теоретичної міцності.

Зміцнювальна імпульсна обробка сталей дає помітне зростання їх зміцнювальних властивостей.

Межа міцності наближається до межі текучості і відповідає значенням, які одержують при плющенні з великими ступенями обжимання. При цьому розтягування залишається на досить високому рівні, що значно перевищує цей показник після *холодного плющення*.

Імпульсна обробка ефективна також і для зміцнення деяких кольорових металів, сплавів. Залишкова деформація при цьому виходить незначною (не перевищує 1%), а твердість зростає по всій товщині пластин на 40-46%, межа текучості – на 50%.

Є також досвід поліпшення властивостей деталей, виготовлених з інших металів і сплавів. Імпульсне зміцнення деталей космічних кораблів з вуглецевих і корозієстійких сталей, алюмінію і титану. Даним методом доведені властивості зварного шва до властивостей основного металу. Ця технологія зміцнення використовується для обробки великогабаритних зварних листів заготовок титанових оболонок, що використовуються в космічній техніці.

## 5 МЕТОДИ ДИНАМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ

### 5.1 Зміцнення за допомогою імпульсного навантаження

#### 5.1.1 Різновиди методів

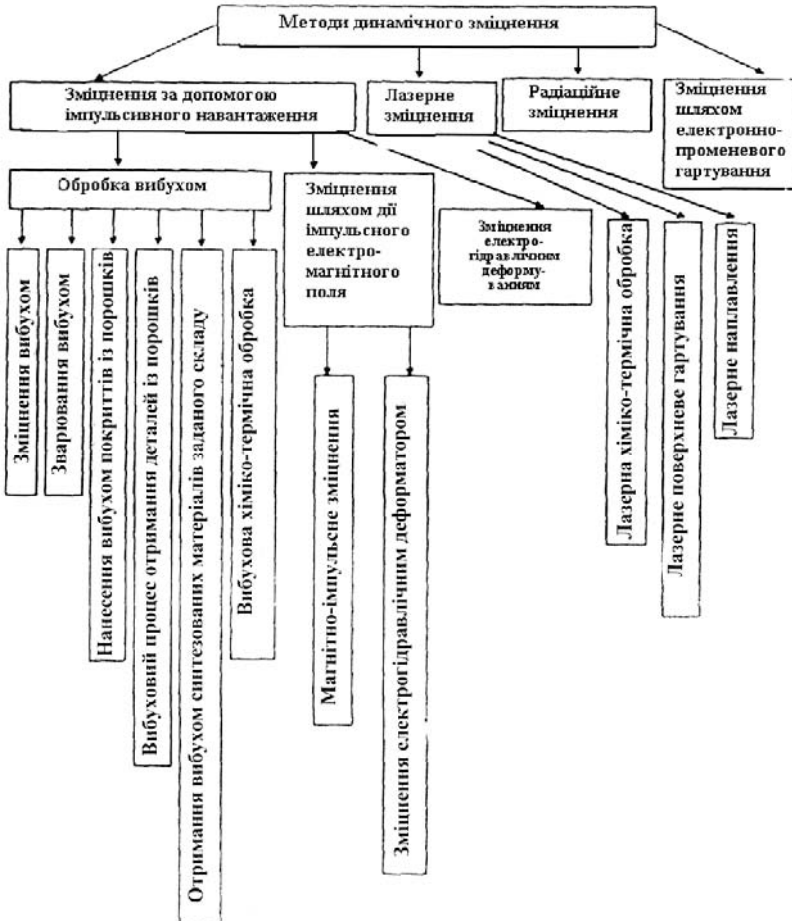
Особливість сучасних методів динамічного зміцнення металів - дія на матеріали могутніх концентрованих потоків енергії. До найперспективніших методів відносять зміцнення за допомогою **імпульсного навантаження, лазерне, радіаційне і шляхом електронно-променевого гартування**. Специфіка цих методів, обумовлена короткочасністю дії і високою концентрацією енергії, відкриває нові можливості зміцнення металевих матеріалів і дозволяє вирішити ряд складних технологічних задач, що практично неможливо або надзвичайно утруднено при використанні традиційних способів і засобів підвищення надійності матеріалів і конструкцій.

**Імпульсна дія** концентрованих потоків енергії в більшості випадків призводить до появи специфічних ефектів, що впливають на фізичні і механічні властивості металів, а отже, і на їх експлуатаційні якості. У зв'язку з цим при визначенні раціональних областей застосування різних методів динамічного зміцнення дуже важливо розглянути основні принципи імпульсного навантаження під час використання того чи іншого *джерела енергії з урахуванням* особливостей, які цей спосіб навантаження вносить у зміну механізму деформації, структури і властивостей оброблюваних матеріалів.

При застосуванні методів динамічного зміцнення металів важливий правильний вибір раціонального технологічного процесу, що забезпечує оптимальні механічні характеристики (зміцнення і підвищення конструкційної надійності) виробу.



Класифікація різних сучасних способів динамічного зміцнення при обробці матеріалів концентрованими потоками енергії наведена далі.



### 5.1.2 Зміцнення вибухом

Великий обсяг виробів обробляють за допомогою енергії вибуху (табл. 1), що визначається величезними технологічними можливостями цього методу.

Процес деформації характеризується такими параметрами, як тиск  $P$  (або імпульс), швидкість деформації  $V$  (або тривалість процесу) і температура  $T^0C$ . Саме ці фактори визначають структуру і властивості металів, що формуються в процесі деформації.

Таблиця 1 - Використання енергії вибуху для обробки металів

| Розміщення заряду         | Тиск, ГПа, не більше | Швидкість ударної хвилі, м/с | Час дії пікового навантаження, с, не менше | Технологічні операції  |
|---------------------------|----------------------|------------------------------|--|--|
| На відстані від заготовки | 5                    | До 300                       | 10-3                                       | Листове штампування, глибока витяжка, відбортовка, калібрування, зміцнення |
| У контакті із заготовкою  | 150                  | 1000-5000                    | 10-6                                       | Зварювання вибухом, плакування, пресування порошків, зміцнення             |

### 5.1.3 Нанесення вибухом покриттів з порошків

Зміна структури і властивостей матеріалів є одним із найцікавіших ефектів дії ударних хвиль на тверде тіло. Специфічний інтерес при цьому становить можливість здійснення, крім механічної і теплової дії ударних хвиль на структуру і властивості порошкоподібних покриттів або накладення пористого матеріалу.

Температура ударно-стислих пористих тіл може досягати декількох тисяч градусів. Такі температури з урахуванням охолодження і без нього достатні для отримання термічних ефектів у твердому тілі.

Утворювальний поверхневий шар виявляється легованим матеріалом пористого тіла або порошку.

Під час обробки пористих покриттів на сталі використовуються порошки С, W, W+C, В, Ni та ін., а під час обробки міді - Sn, Zn, W, Ni та ін.

*Легування сталі* проводиться ударом пластини під кутом 15-20° з дозвуковою швидкістю лінії контакту, *легування міді* здійснюється під кутом 25-30° з надзвуковою швидкістю лінії контакту.

У результаті дії ударної хвилі на поверхні пластини з порошком утворюється шар із специфічною мікроструктурою, який можна умовно розділити на шар *покриття зони рекристалізації* і механічного впливу.

Як приклад можна навести насичення поверхні заліза вуглецем та ін. елементами, коли ефект насичення досягався у результаті реакції порошкового матеріалу, нанесеного на поверхню, з матеріалом основи під час нагрівання в ударній хвилі.

При цьому відбувається синтез на поверхні металів різних з'єднань і твердих розчинів з хімічних елементів і насичення ними поверхні металу.

Після дії ударних хвиль на поверхні деталей, спочатку покритій порошком, виникає *суцільний шар* завтовшки декілька десятків часток міліметра, *що складається з фаз, синтезованих в ударній хвилі*. Так, наприклад, залежно від умов змішування порошків та ударного стиснення на поверхні маловуглецевої сталі, покритої сумішшю вуглецю і вольфраму, можна одержати покриття з карбідів вольфраму WC і W<sub>2</sub>C різної товщини і щільності.

Шар карбіду, що утворився, міцно зчеплений із сталеву основою. Шар є пористим, що вказує на інтенсивне виділення газоподібної фази.

При *обробці вибухом порошку міді, нанесеного на олов'яну основу*, покриття складається з твердих розчинів Cu, хімічних з'єднань Cu<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> і оксидів SnO<sub>2</sub>, CuO, а також Sn і Cu. Покриття цинком, алюмінієм, нікелем і сумі-

шами порошків алюмінію з нікелем і цинку з нікелем дає різні поєднання твердих розчинів і хімічних з'єднань, воно забезпечує антикорозійні властивості.

Можливе використання *органічних сполук як матеріал покриття*, наприклад, покриття фторопластом, при цьому виходить неметалічний шар покриття зі складною структурою.

*Насичення міді цинком* призводить до збільшення, а покриття нікелем до зменшення періоду кристалічних ґраток. Легування двома цими елементами приводить до взаємної компенсації цих двох ефектів, що важливо для створення шарів з мінімальним міжфазним спотворенням ґраток.

Дія ударних хвиль на поверхню металу, покриту порошком, дає можливість отримати більш термомеханічні ефекти і за рахунок комбінованої реакції між складовими порошку і матеріалом основи отримати шар, властивості якого відрізняються від властивостей всіх вихідних матеріалів.

Особливий інтерес при цьому становить можливість отримання з'єднань і покриттів, що виникають тільки при одночасній дії високих температур і тиску.

*Фізичні процеси* при обробці металу з порошкоподібним покриттям біжучою ударною хвилею, можна подати таким чином. При ударному стисненні порошку розвивається висока температура. Розрахункові дані показують, що у разі використання алюмінієвого порошку можна отримати температуру в декілька тисяч градусів. Відбувається плавлення матеріалу покриття і розчинення в ньому металу твердої пластини основи (з утворенням хімічних з'єднань і твердих розчинів). Короткочасність процесу і швидке охолодження за рахунок контакту з холодним металом не дозволяють відбутися дифузії з рідкого шару в твердий метал, завдяки чому в останньому не утворюються

перехідні структури, тобто відбуваються процеси, аналогічні процесам короткочасного паяння холодного металу рідким легкоплавким припоєм.

Таким чином, при утворенні покриттів з порошків різного складу при дії біжучої ударної хвилі, спостерігаються хімічні з'єднання і тверді розчини між матеріалом основи (мідної пластини) і металом порошку (оловом, цинком, алюмінієм, нікелем).

Нанесення порошкових покриттів (окисел Al) здійснюється стосовно деталей сільгоспмашин (алюмінієві шківни зернозбиральних і кукурудзозбиральних комбайнів й ін.).

*Вибуховий спосіб нанесення покриттів слід застосовувати* для плоских і криволінійних поверхонь необмежених площ, у тому числі й для внутрішніх поверхонь труб будь-яких діаметрів; з'єднання матеріалів з різко відмінними фізико-механічними властивостями, покриттів з різних неорганічних з'єднань і для створення нових композиційних покриттів з найрізноманітнішим поєднанням складових компонентів.

Можна створювати як тонкі високоміцні шари з литою структурою (область наплавлення), так і спечені або напресовані покриття великої товщини з міцністю зчеплення, що наближається до міцності моноліту (область напресовки), що особливо важливо під час роботи покриттів на знос і в корозійних середовищах.

*Найбільш ефективно застосування вибухового нанесення покриттів* на деталі типу тіл обертань. Так, на підшипники ковзання потрібно наносити суміш порошків заліза, міді і графіту, внаслідок чого на їх поверхні буде отримане зміцнювальне покриття, що забезпечує 2-3-кратне збільшення терміну їх експлуатації. На втулки ковзання потрібно наносити покриття із суміші порошків графіту і хрому, або графіту, хрому і нікелю, що забезпе-

чить отримання на їх поверхні антикорозійного і зносостійкого покриття карбідохромового типу, або (у другому випадку) типу корозійностійкої сталі. Це забезпечить збільшення терміну їх експлуатації в 3-4 рази.

На під'ятники потрібно наносити покриття з суміші порошків вуглецю, хрому і титана, внаслідок чого на їх поверхні буде отримане зміцнювальне карбідо-хромотитанове покриття, що забезпечить збільшення терміну їх служби в 2,5 + 3,5 рази.

#### **5.1.4 Радіаційне зміцнення**

Взаємодія високоенергетичних електронів з металами характеризується появою інтенсивного теплового і рентгєнівського випромінювання, виникненням вторинної електронної емісії, механічним тиском електронного потоку, створенням у обсязі радіаційних дефектів і т.д.

Це відображається на фізико-механічних властивостях матеріалу.

Під час опромінення чистих металів спостерігається, як правило, суттєве підвищення межі текучості, меншою мірою – твердості і пониження таких характеристик, як ударна в'язкість і відносне розтягування до руйнування.

Із збільшенням щільності потоку електронів і їх енергії, тобто за наявності терморадіаційних ефектів, зміни фізико-механічних властивостей матеріалів стають ще значнішими.

Таким чином, імпульсне опромінення відпаленої сталі при охолодженні сприяє інтенсивному гартуванню, а опромінення загартованих зразків викликає відпал, для реалізації якого у звичайних умовах вимагалось б часу в десятки разів більше.

Опромінення інтенсифікує різні фізико-хімічні поверхневі процеси: хімічну, адсорбційну, каталітичну активність поверхневих шарів. Усе це разом повинно впливати на трибологічні процеси, що проходять у контактах зв'язаних деталей машин.

За наявності різних покриттів імпульсний потік електронів з енергією більше  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж викликає прогрівання приповерхневих шарів матеріалів і прискорює дифузійні процеси на межі різнорідних середовищ.

Опромінення покриттів викликає **зниження коефіцієнта тертя** і стабілізацію його значень у часі. Фрикційні випробування матеріалів показали поліпшення трибологічних характеристик покриттів, **а зносостійкість підвищилася в 4-6 разів**.

У певних умовах опромінення деяких твердих мастильних матеріалів може привести до значного зменшення сил тертя.

При бомбардуванні прискореними атомами гелію поверхня дисульфиду молібдену інтенсивно очищається від вологи і стає структурно більш впорядкованою завдяки кращій орієнтації поверхонь кристалів.

Значний вплив опромінення на полімери. Під дією іонізуючих випромінювань в них утворюються різного роду активні проміжні частинки - вільні радикали, іон-радикали, молекулярні й осколкові іони: збуджені молекули і т.д., які викликають подальші хімічні перетворення внаслідок вторинних хімічних властивостей полімеру. Разом з хімічними відбуваються структурні перетворення.

Іонізуюче опромінення впливає на властивості **реологій** полімеру - зменшується внутрішнє тертя і тим самим підвищується надійність при циклічних навантаженнях.

Розроблений спосіб зниження тертя та адгезії гум, що полягає у радіаційно-хімічному нашаруванні на поверхню гуми тонкого шару (від моношарів до 50 мкм) антифрикційної речовини, наприклад політетрафторетилену.

Радіаційне зміцнення армко-заліза, міді та алюмінію більш значне у порівнянні зі зміцненням сплавів на їх основі, що дозволяє зробити висновок про стабілізуювальну роль атомів домішок при опроміненні матеріалів.

При виборі матеріалів для роботи в умовах нейтронного опромінення потрібно віддати перевагу парам з нормалізованих видів стали або чавуну у литому і відпаленому станах і мідним сплавам з малою окислюваністю.

При опроміненні матеріалів нейтронами проходять одночасно два процеси: зміцнення внаслідок утворення дефектів, що утрудняють рух дислокації при деформації металу, і знеміцнення, викликане зміною властивостей меж кристалів.

Зі збільшенням витримки під опроміненням число радіаційних дефектів у матеріалі зростає, що і призводить до переважання процесу зміцнення.

Нейтронне опромінення впливає на триботехнічні характеристики порошкових матеріалів: Бабіт БКА; БрОЦС-6-6-3; залізо пористе; залізо пористе, просочене сіркою; ЖГр-3; ЖЦс-4; ЖДс-7,5; ЖГр-2-Д-2.

У результаті нейтронного опромінення збільшуються твердість (на 20-30%) і зносостійкість матеріалів.

Найсильніший вплив надає нейтронне опромінення. Вплив опромінення  $\alpha$ -частинками, протонами, тим більше легкими  $\mu$ -частинками і  $\gamma$ -випромінюванням, менш сильний.

**Опромінення призводить** до утворення точкових дефектів і лінійних дефектів, мікропор і до структурних пошкоджень.

При опроміненні відбувається зсув атомів опромінюваного матеріалу в міжвузлі й утворення вакансій, тому **знижується тривала міцність**. Крім того, в деяких матеріалах відбуваються ядерні реакції з виділенням газоподібних продуктів. Опромінення органічних матеріалів може призвести до руйнування зв'язків у молекулах й **утворення нових матеріалів, нових молекул з істотно іншими властивостями**.

**Недоліки:** 1) опромінення нейтронним потоком потужністю більше  $2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$  призводить до накопичення (кри-



тичного) недосконалості (вакансій, пор та ін.) і зниження тривалої міцності, що викликане прискоренням дифузійних процесів; 2) відбувається зниження жароміцності зі збільшенням нейтронного потоку, зменшується жароміцність; 3) аустенітні хромонікелеві сталі й сплави та сплави на основі Ni, Mo, Ti, Zr, Be розбухають - збільшуються у розмірах.

Наприклад: а) берилій, опромінений при температурі 800-9000С нейтронним потоком  $\psi = 3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ , збільшує обсяг 3-5%; б) аустенітна сталь опромінена при 450<sup>0</sup>С потоком  $\phi = 10^{27} \text{ м}^{-2}$ , збільшує обсяг на 10%. Найбільше розбухання виявляється при температурах 350-650<sup>0</sup>С. Розбухання викликає зміну геометричних параметрів; в) у порах накопичується молекулярний водень або водневовмісні гази, що призводить до утворення тріщин; г) холодна пластична деформація – зменшує розбухання. Перлітові і феритні сталі менш схильні до розбухання; д) при опроміненні стійкість металів в умовах хімічної корозії знижується через руйнування поверхневих захисних плівок. Опромінення, викликаючи структурні пошкодження матеріалів знижує його електрохімічний потенціал; е) при опроміненні відбувається зміна складу електроліту внаслідок **радіолізу**: молекули води руйнуються й утворюються іони та атоми O<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>. Кисень окислює; водень наводнює Me і тим самим робить його більш крихким. Руйнуються Al-сплави, Zr-сплави Me і сплави схильні до корозійного розтріскування.

У конструкціях атомних станцій (оболонки уранових стержнів, корпуси і трубопроводи реакторів, корпуси синхрофазотронів виготовлені зі сталі перлітових і аустенітного класів високолегованих сталей на основі Zr, Be, Al, Mg, які слабо поглинають нейтрони.

## **6 ПЛАЗМОВО-ДЕТОНАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ІНСТРУМЕНТУ, ШТАМПІВ І ПРЕС-ФОРМ**

Інститутом електрозварювання ім. Є.О.Патона АН України розроблені технологія і технологічне обладнання для плазово-детонаційного зміцнення виробів машинобудування:

- деталей, що зношуються;
- металорізального інструменту;
- штампів гарячої і холодної деформації;
- деревообробного інструменту;
- вирубних штампів і пуансонів;
- поліграфічних ножів;
- ножів і пилок для різання металу, деревностружкових плит, фанери, асбоцементних плит і т.д.

Здійснюється зміцнення твердих сплавів чавуну, титанових і порошкових сплавів, у т.ч. внутрішніх поверхонь деталей машин (рис. 7).

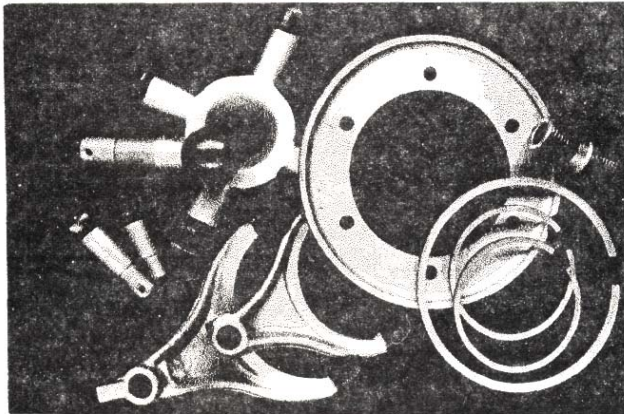


Рисунок 7 – Деталі автомобіля зі зміцненою внутрішньою поверхнею

Технологія зміцнення забезпечує на виробі із загартованої сталі формування твердого зносостійкого шару товщиною до 100 мкм і мікротвердістю до 18 ГПа. Можливе легування поверхні титаном, вольфрамом, молібденом, хромом та іншими елементами. Легуючі елементи подаються у вигляді прутка (дроту) діаметром 4-10 мм. При зміцненні виробів із твердого сплаву на основі карбідів вольфраму підвищуються твердість і міцність поверхні виробу.

Продуктивність зміцнення становить до одного погонного метра плоского ножа за хвилину або один зуб пили за секунду.

Технологія зміцнення виробів здійснюється імпульсним плазмотроном. Працездатність плазмотрона становить 800 год. Відновний ремонт плазмотрона здійснюється протягом 10 хв. Для технологічного переміщення зміцнюваного виробу або плазмотрона використовують як універсальне обладнання, так і спеціалізовані автоматичні системи переміщення з управлінням за допомогою комп'ютера.

Плазмово-детонаційна технологія здійснюється в атмосфері повітря без попередньої підготовки зміцнюваної поверхні.

Нова технологія – це низька трудомісткість, швидкість, економічність, а в результаті – висока надійність в експлуатації. Продуктивність зміцнення – до 100 мм<sup>2</sup>/с при витратах енергії 10 кВт/год. Працездатність інструменту підвищується в 2-3 рази.

Технологія зміцнення є фінішною операцією і здійснюється на готовому до використання інструменті. Зміцнення не збільшує шорсткості поверхні, що дозволяє здійснювати його у вигляді фінішної операції. Технологія дозволить продовжити терміни експлуатації деталей: компресорів, двигунів (рис. 8), текстильних, поліграфічних, папероробних, швейних машин, верстатів і засобів механізації, деталей автомобіля та ін.



Рисунок 8 – Деталі автомобіля

Технологія зміцнення найбільш ефективна при експлуатації в умовах граничного тертя без змащування або в умовах обмеженого змащування (рис. 9).

Промислові випробування показали, що працездатність виробів підвищується в 3-5 разів.

Залежність зносу від швидкості  $V$  і навантаження  $P$

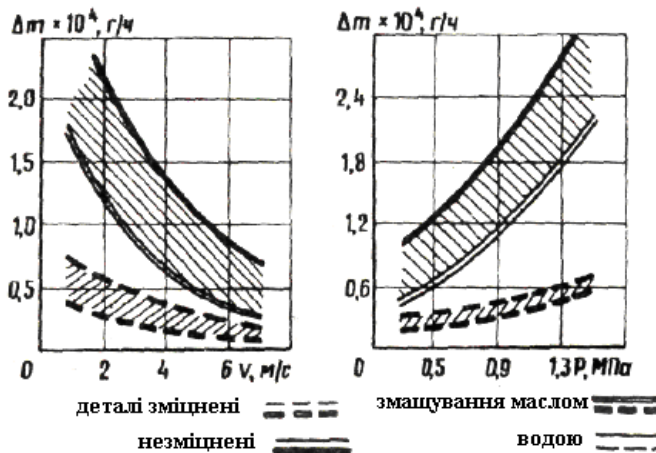


Рисунок 9 - Залежність інтенсивності зносу  $\Delta m$  від швидкості тертя  $V$  і навантаження  $P$

## 7 ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВЕ ГАРТУВАННЯ ( гартування в електроліті)

Застосовується для місцевого гартування конкретних місць, що зношуються, і поверхонь, а також для підвищення жорсткості і міцності виробів, що виготовляються із сталі і чавуну.

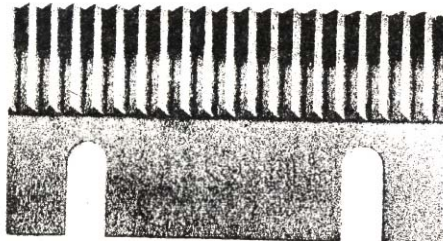
Ця технологія може бути використана під час виготовлення сільськогосподарських, гірничорудних, поліграфічних, текстильних та інших машин.

Електролітно-плазмове гартування необхідне для виробів, що піддаються абразивному зносу:

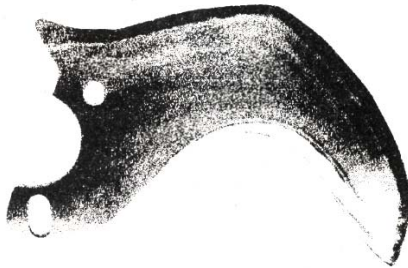
- пилок, контрбрусів, упорів деревообробної техніки;
- ножів, зірочок кормозбиральних комбайнів;
- плугів, сошників, плоскорізів, дисків ґрунтообробної техніки;
- сит, скребків, посадочних місць під підшипники вуглебагачувальних машин;
- різцетримачів, риштаків, скребків та інших деталей вугледобувних комплексів;
- секаторів для помелу поліграфічних машин.

Технологія електролітно-плазмового гартування (плазмоутворюючий газ – пари води) забезпечує гартування поверхні, що зношується, на глибину до 15 мм, твердість 50 HRC на сталі із вмістом С 0,3% і 60 HRC на сталі із вмістом С 0,45%. Швидкість нагрівання – до 1000 град/с.

Витрата електричної енергії – 10 А/см при напрузі 200 В. Витрата води – 1 л/год.



а



б

Рисунок 10 – Ніж подрібнення цукрового буряка (а);  
ніж м'ясорубки (б)

## **8 ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ЛАЗЕРНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ**

### **8.1 Властивості сплавів після лазерного гартування**

Основна мета лазерного гартування - підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах тертя. Зменшення зносу деталей після лазерного гартування обумовлене рядом факторів: високою твердістю поверхні, високою дисперсністю структури; збільшенням несучих властивостей поверхні, зменшенням коефіцієнта тертя та ін. Наприклад, в умовах тертя ковзання по твердому сплаву стали 45 коефіцієнт тертя після лазерного гартування безперервним лазером зменшується на 10% в порівнянні з но-

рмалізованим або поліпшеним станом (табл. 2). При цьому після лазерного гартування відмічене різке зменшення часу приробітку.

Помітно збільшується і зносостійкість чавунів в умовах тертя з ковзанням після обробки безперервним лазером. Підвищення зносостійкості чавунів після лазерної обробки обумовлене, крім вищезазначених факторів, поліпшенням умов тертя через графіт, що зберігся в ЗЛВ. Підвищується також і зносостійкість сталей та деяких інших сплавів під час тертя в лужному і кислотному середовищах.

При зміцненні деталей з використанням лазерного нагрівання поверхневі шари металу зазнають великих напружень. Формування напружень при охолодженні поверхні можна подати таким чином. Після припинення лазерної дії найшвидше охолodиться внутрішній шар металу, що лежить біля непрогрітого вихідного шару. Приповерхневий шар охолоджується і стискується в останню чергу.

Таблиця 2

| Вид обробки сталі  | Коефіцієнт тертя, $f_{тр}$ | Інтенсивність зношування $I$ , $мм^2/м$ | Відносний знос $I_{исх}/I_{лз}$ |
|--------------------|----------------------------|---|---------------------------------|
| Поліпшення         | 0,42                       | $3,1 \cdot 10^{-6}$                     | 6,5                             |
| Нормалізація       | 0,44                       | $2,4 \cdot 10^{-6}$                     | 5,4                             |
| Лазерне гартування | 0,39                       | $4,6 \cdot 10^{-7}$                     | 1                               |

З одного боку, в процесі стиснення він впливає на внутрішній шар, формуючи в ньому стискуючі напруги, тоді як на поверхні формуються розтягуючі. З другого боку, в поверхневому шарі сталей мартенситне перетворення йде в останню чергу. Оскільки мартенсит має більший питомий об'єм, то в приповерхневому шарі в цей час йде роз-

ширення і виникнення стискуючих напруг за рахунок фазових перетворень. У результаті величина і знак залишкових напруг  $\sigma_{ост}$  залежать від співвідношення термічних  $\sigma_{терм}$  і фазових  $\sigma_{фаз}$  напруг з урахуванням можливих пластичних ефектів. При  $\sigma_{терм} > \sigma_{фаз}$  на поверхні формуються розтягуючі напруги, а при  $\sigma_{терм} < \sigma_{фаз}$  - стискаючі.

Гартування майже завжди спрямоване на зміцнення виробу. Виникаючі при гартуванні напруження викликають деформації.

Зі збільшенням твердості сплавів у вихідному стані збільшується і деформація після лазерного гартування. Наприклад, після зміцнення довгомірних брусків із сірого чавуну збільшення твердості вихідного матеріалу від НВ 165-178 до НВ 195-225 призводило до збільшення прогинання центральної частини бруса в 2-8 разів.

Деформації, як правило, збільшуються при збільшенні ступеня перекриття плям або смуг зміцнення. Крім того, розмір деформації залежить від коефіцієнта перекриття і координатної послідовності обробки. Оптимальні режими з цієї точки зору - рівномірне і симетричне заповнення поверхні плямами або смугами зміцнення. Після лазерного гартування за оптимальними режимами при достатніх розмірах оброблюваних деталей і невеликих розмірах ЗЛВ поводки мінімальні, і цим процес вигідно відрізняється від термообробки за допомогою неконцентрованих джерел нагрівання.

**Опір втоми.** На опір втоми сплавів після лазерного гартування великий вплив чинять такі фактори, як величина і знак залишкових напруг, мікрогеометрія поверхні та наявність дефектів, а також особливості мікроструктури (розмір зерна і форма структурних складових). У зв'язку з неоднаковим впливом режимів лазерного гартування на ці фактори однозначну залежність опору втоми від режимів встановити неможливо. Межа витривалості таких сталей,



як 09Г2, 35, 45, 40Х, 75Г, підвищується від 200-300 МПа у вихідному стані до 280-520 МПа після лазерного гартування без оплавлення поверхні. Після лазерного гартування з оплавленням поверхні опір втоми сплавів у більшості випадків погіршується.

**Теплостійкість сплавів.** Теплостійкість загартованої структури в сплавах залежить від ступеня метастабільності структури і дифузійної рухливості атомів. Велика спотвореність кристалічних ґраток, збільшення густини дислокацій і вакансій у сплавах заліза з вуглецем, зміцнених лазером, в порівнянні з традиційними видами гартування призводять до інтенсивнішого процесу розпаду мартенситу гартування на феритоцементитну суміш. Тоді після лазерного гартування сталей інтенсивність зниження мікротвердості у процесі відпуску вища, ніж після звичайного гартування. При нагріванні до 200-300°C чавунів, високовуглецевих і легованих сталей можливе перетворення залишкового аустеніту в мартенсит, і у зв'язку з цим характер зміни твердості в процесі нагрівання може бути складним.

На рис. 11 подані криві зміни мікротвердості за Віккерсом у процесі нагрівання сталі ШХ15 після обробки безперервним CO<sub>2</sub>-лазером без оплавлення поверхні і після звичайного гартування. Видно, що нагрівання при температурі 200°C призводить до більшого зниження мікротвердості в сталі після звичайного гартування, ніж після лазерної. Це обумовлено великою кількістю залишкового аустеніту в зоні лазерної дії; до того ж він відрізняється великою дефектністю, яка призводить до інтенсивнішого переходу аустеніту в мартенсит відпуску, і твердість знижується менше.

Велика кількість залишкового аустеніту призводить до того, що в процесі нагрівання при температурі 300°C стадії розпаду загартованої структури ЗЛВ виражені чіткіше, ніж після звичайного гартування.

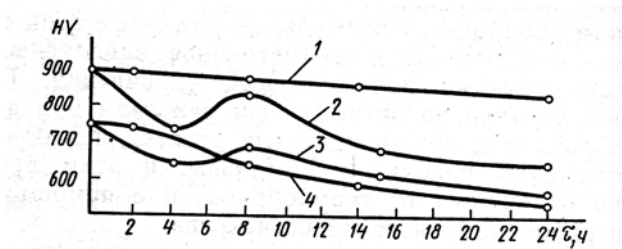


Рисунок 11 - Зміна мікротвердості у процесі нагрівання сталі ШХ15, зміцненої безперервним CO<sub>2</sub>-лазером без оплавлення (1 - 200°C, 2 - 300°C) і загартованої з 840°C звичайним гартуванням (3 - 300°C, 4 - 200°C)

Перенасиченість твердих розчинів після лазерного гартування особливо у зоні оплавлення може привести до виділення у процесі подальшого нагрівання великої кількості метастабільних сегрегації і проміжних фаз, що призводить до збільшення твердості.

Лазерну пляму на поверхні деталі за допомогою різних оптичних систем можна отримати у формі кола, кільця, прямокутника і т.д.

При зміцненні лазером великої площі необхідної конфігурації найбільш поширене послідовне накладення одиничних плям у формі кола, тобто обхід за заданим контуром з кроком  $S$ . Важливим параметром при цьому є коефіцієнт перекриття, що визначається за формулою  $K_p = S/d_n$ , де  $d_n$  – діаметр плями.

Як показано на рис. 12, при  $K_p < 1$  плями накладаються з перекриттям, а при  $K_p > 1$  плями накладаються на деякій відстані одна від одної, тобто між плямами є незміцнені ділянки.

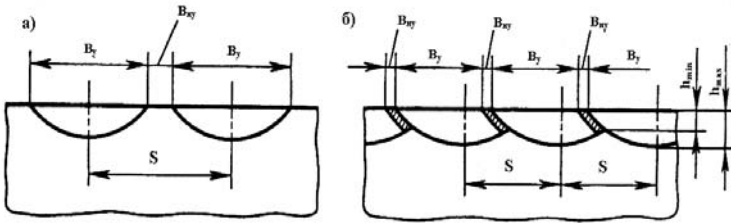


Рисунок 12 - Схеми накладення декількох плям при  $Kn > 1$  (а) і  $Kn < 1$  (б)

На рис. 13 подані схеми накладення декількох плям з обходом по контуру при  $Kn = 1$ .

Схема накладення плям при використанні циліндрової оптики подана на рис. 14.

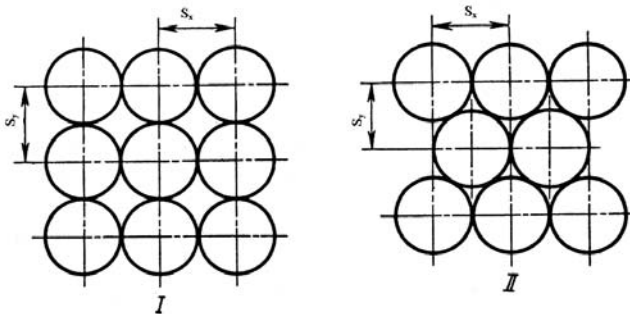


Рисунок 13 - Схеми накладення декількох плям з обходом по контуру при  $Kn = 1$

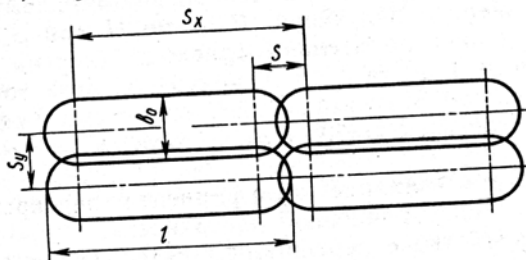


Рисунок 14 - Схема накладення плям при використанні циліндрової оптики

Як показано на рис. 15, обробку плоских поверхонь ведуть за двома схемами накладення смуг – лінійною (а) і клітинною (б). Після накладення кожної смуги деталь або промінь періодично зміщуються у поперечному напрямку на відстань, що дорівнює кроку  $S$ . Найбільш просто при клітинній схемі смуги накладають під прямим кутом одна до одної і з однаковим кроком по обох координатах, хоча великих складнощів для накладення смуг не під прямим кутом і для зміцнення з  $S_x \neq S_y$  немає.

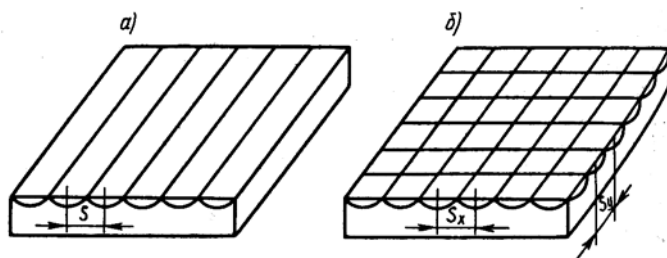


Рисунок 15 - Схеми накладення смуг на плоскій поверхні

Як показано на рис. 16, обробку циліндричних поверхонь ведуть за трьома схемами: накладення односпіральних смуг (а), накладення двоспіральних смуг назустріч одна одній (б) з постійною осьювою подачею  $S$ , а також накладення смуг вздовж осі по деталі з періодичним обертанням твірної для зміщення на крок  $S$  (в). За цими самими схемами ведуть зміцнення внутрішніх циліндричних поверхонь. Зміцнення внутрішніх поверхонь втулок та інших деталей здійснюється за допомогою відхиляючого дзеркала, що вводиться всередину деталі (рис. 17).

У ряді випадків внутрішні поверхні зміцнюють, спрямовуючи лазерний промінь під кутом до поверхні (рис. 18), без введення відхиляючого дзеркала всередину втулки. Втулка при цьому обертається в подовжньому напрямку.

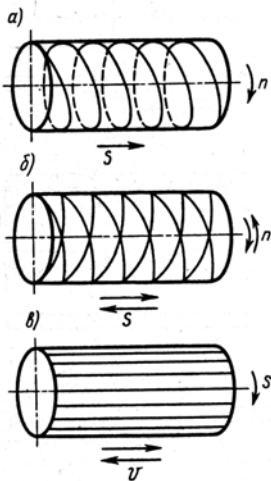


Рисунок 12 - Схема зміцнення внутрішньої циліндрової поверхні

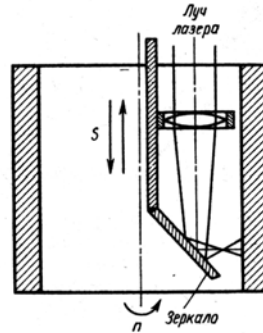


Рисунок 13 - Схема зміцнення внутрішньої циліндрової поверхні

При імпульсній обробці, при  $K_p < 1$  є зони повторного нагрівання і зони відпуску в раніше зміцненому об'ємі шириною до 400 мкм.

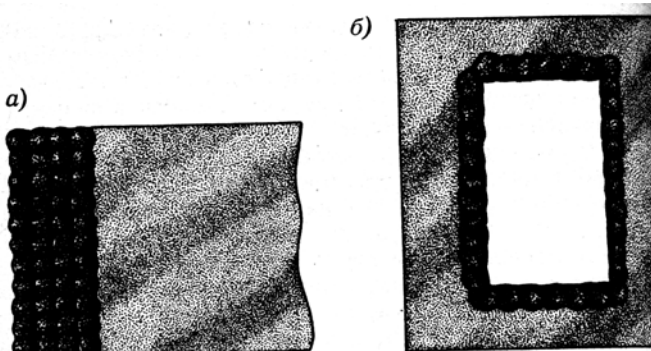


Рисунок 18 - Зміцнення робочих кромek вирубних пуансонів (а) і матриць (б) за допомогою імпульсних лазерів

## 8.2 Конкретні приклади застосування лазерного гартування у машинобудуванні

На сьогодні у промисловості працюють декілька сотень імпульсних лазерних установок, які виконують різні технологічні операції термообробки. Частіше за все цей процес застосовується для зміцнення робочих кромок інструменту. Зміцнення кромок вирубних пуансонів із сталей У8 і У10 ведеться на установці «Квант-16» при  $W = 20$  Дж,  $\tau_{\text{и}} = 7$  мс,  $d_{\text{л}} = 3.5$  мм дає глибина зміцнення 0,13 мм. При зміцненні пуансонів на бічну поверхню наноситься декілька рядів плям з перекриттям при  $K_{\text{п}} = 0,5$  (рис. 18 а). Така схема зміцнення дозволяє зберегти зміцнений шар після переточувань. Стійкість пуансонів збільшується в 2-5 разів. На відміну від пуансонів матриці в більшості випадків зміцнюють з лицьової поверхні (рис. 18 б), тому після їх переточування необхідне повторне зміцнення.

**Зміцнення різального інструменту** - свердел, протяжок, фрез, мітчиків, ножів для обробки дерева ведуть, по можливості, з накладенням плям на передню кромку (рис. 19). Це дозволяє зберегти зміцнений шар після переточування, забезпечує деяку самозагострюваність інструменту під час роботи і велику його стійкість. Пилки і відрізи фрези зміцнюють з нанесенням плям на бокові поверхні (рис. 20).

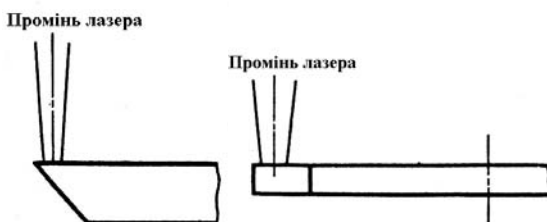


Рисунок 19 - Зміцнення різального інструменту за передньою кромкою

Промінь лазера

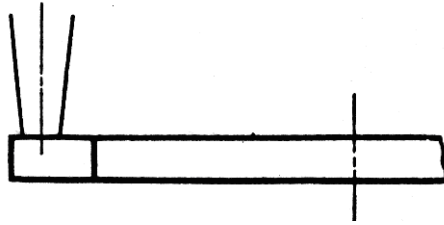


Рисунок 20 - Схема зміцнення відрізних фрез

Крім лазерного гартування інструменту імпульсні лазери застосовуються і для зміцнення поверхні деталей машин з метою підвищення їх зносостійкості. Зокрема, випробуване зміцнення цілого ряду сталевих деталей карбюратора.

Незважаючи на приклади успішного застосування процесу термозміцнення імпульсними лазерами, цей метод має ряд недоліків.

1 Низька продуктивність, обумовлена малою частотою проходження імпульсів сучасних лазерних установок і малими розмірами лазерної плями.

2 Мала глибина зміцнення через обмежену тривалість імпульсу.

3 Нерівномірність властивостей поверхні, обумовлена нерівномірною щільністю енергії в плямі, а також «лусковою» будовою поверхні, наявністю зон відпуску, що у ряді випадків не дозволяє набути хороші експлуатаційні властивості.

**Зміцнення картера рульового управління автомобіля** у відділенні фірми Джeneral Моторс (США) є процесом, упровадженим у промисловість. CO<sub>2</sub>-лазером потужністю 1 кВт за 18 с наноситься п'ять смужок шириною 1,5-2,5 мм і завдовжки 152 мм на внутрішній поверхні гільзи з феритоперлітного ковкого чавуну. Зміцнені без

оплавлення смуги з глибиною 0,25 мм мають твердість 58-62 HRC. У результаті зносостійкість поверхні збільшилася в 10 разів, а термін служби деталі - в 5 разів. Крім того, усунення деформацій і подальших операцій шліфування дозволило скоротити витрати на 80%, і процес лазерного гартування виявляється економічнішим, ніж азотизація, індукційне гартування, вставка з інших матеріалів та ін.

**Зміцнення інших деталей.** У Росії розроблений процес зміцнення опорного торця корпусу підшипника водяного насоса з чавуну СЧ 18-36 за допомогою CO<sub>2</sub>-лазера ЛТ1-2, що приводить до підвищення зносостійкості удвічі.

Розроблений процес лазерного гартування бокової поверхні шестерні на глибину 0,4-0,7 мм до твердості 60 HRC при деформації деталі не більш 0,02 мм, а також процес зміцнення шийки валу з середньовуглецевої сталі лазером потужністю 10 кВт при швидкості 12,7 мм/с.

Особлива увага надається лазерному гартування деталей двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), оскільки при цьому є можливість підвищення робочих характеристик ряду вузлів, а отже, і всього двигуна. Один з основних вузлів ДВЗ, що регламентують його роботу, - вузол гільза - поршень.

Гільзи великих розмірів зміцнюють накладенням спіральних смуг на внутрішні поверхні (див. рис. 17). Процес лазерного гартування гільзи циліндра турбокомпресорного двигуна локомотива ведуть накладенням спіральної смуги шириною 3-4 мм через 1-1,5 мм при потужності випромінювання 5 кВт протягом 15 хв. Глибина зони зміцнення досягає 1 мм, зносостійкість збільшується утричі.

Зміцнення гільз менших розмірів, наприклад тракторних і автомобільних двигунів, може вестися з накладенням окремих смуг, розміщених під кутом 45° до осі гільзи (рис. 21). Випробування, проведені в Росії, показали, що стій-



кість зміцненої лазером гільзи не поступається за стійкістю гільзи зі вставками з високолегованих сплавів.

**Зміцнення компресійних поршневих кілець** за допомогою лазерного випромінювання ведуть за двома схемами (рис. 22 а, б). Гартування по боковій циліндровій поверхні (рис. 22 а) забезпечує найбільші геометричні розміри зміцненого робочого шару, але призводить до збільшення пружності кілець через формування стискуючих напруг в ЗЛВ. Гартування по торцевих поверхнях (рис. 22 б) дозволяє зменшити пружність кільця і забезпечує мінімальну зміну розмірів у радіальному напрямку.

**Зміцнення канавок поршнів двигунів внутрішнього згорання.** На бокові поверхні канавок поршнів з чавуну або сталі промінь потрапляє під кутом (рис. 23 а). Обробка йде без оплавлення поверхні.

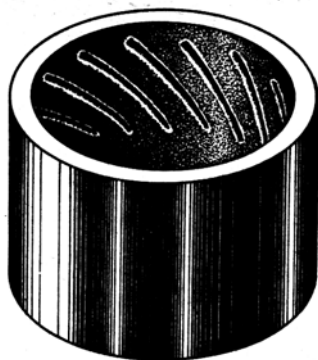


Рисунок 21 – Зміцнення внутрішньої поверхні гільз тракторного двигуна з нанесенням смуг під кутом 45° до осі

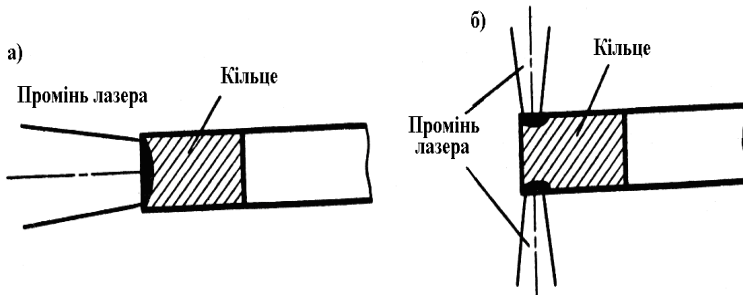


Рисунок 22 - Зміцнення поршневих кілець по боковій циліндровій поверхні (а) і по торцевих поверхнях (б)

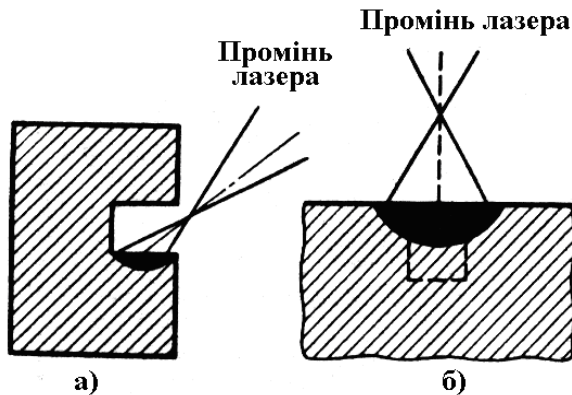


Рисунок 23 - Зміцнення поршневих канавок при напрямку лазерного променя під кутом до поверхні канавки (а) і при зміцненні заготовки перед нарізанням канавки (б)

**Зміцнення втулок клапанів** ведеться за двома варіантами: з використанням дзеркал, що вводяться всередину втулки (див. рис. 17), а також при напрямку лазерного променя на внутрішню поверхню під кутом (див. рис. 18).

**Зміцнення кулачків** і кулачкових розподільних валів з чавуну призводить до підвищення опору втоми і контактної витривалості. Процес ведуть лазером НРL-10 (10 кВт). Кулачок шириною 17 мм зміцнюється за один

прохід за час близько 7 с, глибина зміцнення – 1 мм, твердість – 50 HRC, подальшої механічної обробки не потребує.

**Зміцнення колінчастих валів двигунів.** Обробка галтелей колінчастого валу трактора ведеться при потужності 13 кВт; час обробки однієї галтели становить 4 с, глибина зміцнення – близько 1 мм. Раніше 60% вартості виготовлення всього валу витрачали на шліфування після термообробки, а після лазерного зміцнення подальше шліфування не потрібне. Відсутність деформацій приводить до здешевлення процесу лазерного гартування у порівнянні з індукційним гартуванням або обкаткою роликami. Крім того, показано, що межа витривалості зростає в 10 разів.

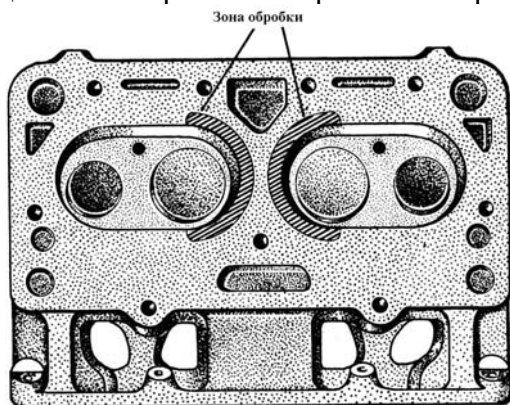


Рисунок 24 - Голівка блоків циліндрів автомобіля ЗІЛ-130 із зміцненими перемичками між камерами згорання

**Зміцнення голівки блоку циліндрів двигунів** внутрішнього згорання автомобіля ЗІЛ-130 показане на рис. 24. Зміцнення поверхні між камерами згорання голівки з алюмінієвого сплаву АЛ4 призводить до підвищення її стійкості в 2-2,5 раза.

## 9 ЛАЗЕРНЕ ОПЛАВЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ СПЛАВІВ

### 9.1 Лазерне оплавлення для поліпшення якості поверхні

Оплавлення поверхні за допомогою лазерного випромінювання здійснюється в тому самому інтервалі режимів, що й лазерне гартування з оплавленням. Отже, в процесі оплавлення в структурі мають місце ті самі фазові і структурні перетворення, що і при лазерному гартуванні. ЗЛВ складається з трьох шарів: зони оплавлення, зони гартування з твердої фази і перехідної зони.

При використанні лазерного оплавлення для модифікації мікрорельєфу поверхонь сталей і сплавів необхідно враховувати гідродинамічне перемішування розплаву під дією термокапілярних сил. У зоні оплавлення є високі градієнти температури, що призводить до високих градієнтів поверхневого натягнення й утворення циркуляційного руху в рідині: наприклад, швидкість руху в розплаві заліза може досягати 150 мм/с. Зміна тиску усередині розплаву вимагає компенсації, що і відбувається внаслідок викривлення поверхні рідкої ванни.

Напрямом оптимізації профілю зони оплавлення може бути введення в рідку ванну спеціальних добавок, що зменшують швидкість гідродинамічних потоків. Наприклад показано, що при нанесенні на поверхню сталі сірки напрямку руху розплаву протилежний тому, який був за наявності на поверхні сталі вуглецю. Очевидно, добавкою суміші сіри і вуглецю можна добитися створення дрібних завихрень в зоні оплавлення і поліпшення мікрорельєфу.

Застосування лазерного оплавлення для поліпшення якості поверхні деталей з порошкових матеріалів має в основному дві мети: поліпшення мікрорельєфу поверхні і збільшення щільності поверхневого шару.

## 9.2 Аморфізація поверхні

При забезпеченні надвисоких швидкостей охолодження у деяких сплавах в'язкість рідкого металу зростає настільки, що центри кристалізації вирости не встигають і весь метал твердне як склоутворювальна маса, в якій існує дещо приблизний порядок.

Наведемо характерні особливості та відмінні властивості склоутворювальних металів.

1 Плавна зміна властивостей під час затвердіння.

2 Виділення теплоти кристалізації при нагріванні (як правило, у районі 300°C); можливий і неповний перехід у кристалічний стан.

3 Розмиття рентгенограм та електроннограм.

Серед факторів, що визначають схильність сплавів до аморфізації, розрізняють зовнішні і внутрішні. До **зовнішніх** факторів відносять швидкість аморфізації, індивідуальну для кожного сплаву, і хімічний склад сплаву. До **внутрішніх** факторів відносять залежність в'язкості від температури, положення інтервалу кристалізації, швидкість зростання центрів кристалізації та ін. Схильність до аморфізації визначається сукупністю цих факторів, і не можна її пов'язувати тільки з одним із них.

Крихкі при розтягуванні, аморфні метали допускають значну деформацію при стисненні або вигині (до 50%). Такі метали легко прокочуються, оскільки деформаційне зміцнення у них надто мале. Зі зростанням температури міцність аморфних сплавів різко знижується, причому в деяких сплавах при температурі 150-200°C спостерігається значна крихкість.

На сьогоднішній день є аморфні сплави з різними магнітними властивостями. Феромагнітні аморфні сплави мають коерцитивну силу в 10 тис. разів меншу, ніж у кристалічному стані. З огляду на те, що електричний опір амор-

фних сплавів в 2-3 рази вищий, ніж у кристалічних, то є хороша перспектива використання їх як магніто-м'які матеріали.

Корозійна стійкість аморфних сплавів достатньо висока. Сплав  $Fe_{80}B_{20}$  має стійкість у  $HNO_3$  у  $10^5$  вище за стійкість сталі 12X18H10T. Якщо аморфні сплави не містять фосфору, то вони досить стійкі щодо радіаційного руйнування.

Таким чином, внаслідок унікальності властивостей аморфних станів отримання їх за допомогою лазерного випромінювання дуже перспективне.

Після лазерної аморфізації деяких сплавів спостерігається значне збільшення мікротвердості поверхні. Наприклад, мікротвердість сплавів системи Fe - B - Si підвищується від 3500-5800 МПа у вихідному стані до 7100-11700 МПа. Наявність на поверхні сплавів аморфного шару призводить до поліпшення корозійних характеристик.

Перспективи має лазерна аморфізація звичайних промислових сталей і чавунів з одночасним легуванням поверхні для збільшення схильності до аморфізації, оскільки технологія виготовлення модельних сплавів складна і виробни з них володіють низьким комплексом механічних властивостей. У цьому разі на поверхню чавуну або сталі наноситься порошок бору або кремнію, а потім поверхню оплавають лазером. Режими оплавлення підбирають так, щоб після охолодження склад сплаву відрізнявся найбільшою схильністю до аморфізації. За необхідності лазерне оплавлення здійснюють двічі.

Процеси лазерної аморфізації в майбутньому можуть знайти застосування для підвищення зносостійкості деталей приладів, зокрема елементів магнітних головок, для підвищення зносостійкості деталей приладів, що працюють в агресивних середовищах, і т.д.

## 10 ОТРИМАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ПОКРИТТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 10.1 Явища масоперенесення і перерозподіл легуючих елементів при лазерній дії

Розрахунок дифузійних процесів у твердій фазі при лазерній дії показує, що глибина дифузії невелика, приблизно 1 мкм при тривалості імпульсу 4 мс. Тому при лазерному опромінюванні без розплавлення поверхні провести процес легування за рахунок дифузійного насичення неможливо внаслідок короткочасності процесу. При лазерному оплавленні поверхні металів і сплавів виникаючі внаслідок великих градієнтів температури інтенсивні гідродинамічні потоки прискорюють процеси масоперенесення по всій зоні оплавлення. Ця обставина дозволяє практично здійснювати такий процес отримання поверхневих покриттів, як лазерне легування.

Таким чином, утворення легованих зон супроводжується двома процесами: масоперенесенням на відстані в декілька мікрометрів за рахунок конвективного перемішування і масоперенесенням на відстані в декілька мікрометрів за рахунок дифузії в рідкій і твердій фазах. При цьому хімічні реакції на поверхні, як правило, не надають вирішального значення і процес потрібно назвати не **лазерною хіміко-термічною обробкою, а лазерним легуванням.**

Зона лазерної дії має будову, аналогічну будові після лазерного гартування з оплавленням. Зона оплавлення в цьому випадку є леговою. Дифузія елементів із зони оплавлення у зону термічного впливу звичайно відбувається на відстані не більше 10 мкм. Однак у деяких випадках експериментально виявлено деякий перерозподіл легуючих елементів у твердій фазі під зоною оплавлення на глибині 200-300 мкм. Це може бути обумовлено утво-

ренням тонких каналів рідкої фази по межах зерен і блоків в твердому металі і масоперенесенням по цих каналах. **Процеси масоперенесення** в твердій фазі можуть бути пов'язані з переміщенням дислокації атомів у результаті швидких локальних деформацій.

При високих швидкостях кристалізації легованого розплавленого об'єму утворюється структура, яка може відрізнятися особливостями, переліченими раніше. Відмінність будови зон, легованих лазером, від будови дифузійних покриттів - **відсутність шаруватості**. Внаслідок конвективного перемішування розплаву у міру віддалення від поверхні немає переходу від фаз із більшою концентрацією легуючого елемента до фаз із меншою концентрацією. Всі фази в легованій зоні перемішані приблизно рівномірно по глибині.

Особливості процесів отримання поверхневих покриттів багато в чому залежать від вигляду і форми присадного матеріалу і від способу введення його в зону лазерної обробки.

Лазерне легування поверхні можна здійснювати при попередньому нанесенні компонентів на поверхню деталей або зразків у вигляді фольги, дроту, прутків, порошкових сумішей та ін., а також можна здійснювати подачу цих компонентів в зону лазерного оплавлення одночасно з дією випромінювання. Попереднє нанесення може здійснюватися газотермічним напиленням, гальванічним і хімічним осадженням, накатуванням, дифузійним методом, електроіскровим легуванням, нанесенням паст, насипанням і т.д.

Процеси отримання поверхневих покриттів - лазерне легування і наплавлення - виконуються аналогічно і відрізняються в основному лише глибиною проплавлення матеріалу підкладки. При наплавленні проплавлення підкладки незначне і хімічний склад покриття формується за рахунок присадки. При легуванні спостерігається значне проплав-



лення підкладки й основу в зоні легування складають елементи основного металу.

**Лазерне легування неметалічними компонентами.** Лазерне легування неметалічними компонентами - вуглецем, азотом і бором – найбільше поширення одержало при використанні способу з нанесенням на поверхню обмазок або паст і подальшим оплавленням поверхні імпульсним або безперервним лазером (рис. 25). У цьому випадку до технологічних режимів лазерного легування потрібно віднести параметри лазерної обробки і товщину шару паст.

Технологічною особливістю лазерного легування з оплавленням обмазок є те, що при цьому не вимагається

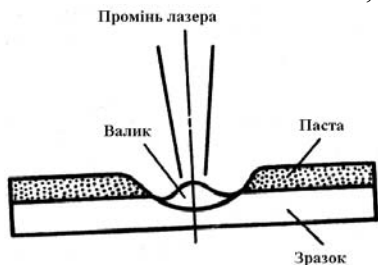


Рисунок 25 - Схема лазерного легування або наплавлення з нанесенням порошкової паст на поверхню

повніший перехід легуючого компонента в розплав за рахунок швидкого підплавлення вершин мікронерівностей.

Середня глибина легованих об'ємів, що утворюються, в більшості випадків становить 0,3-0,4 мм при імпульсній обробці і 0,3-1,0 мм - при безперервній. Розглянемо деякі методи лазерного легування.

**Цементация.** Як паста або обмазки при лазерній цементации сталей можуть застосовуватися розчини графіту або сажі в ацетоні, спирті та інших розчинниках. Оскільки такі обмазки обсипаються з поверхні, часто використовують розчини в різних лаках: у бакелітовому, пековому кам'яно-

нанесення поглинаючих покриттів, оскільки обмазки забезпечують, як правило, поглинання енергії лазерного випромінювання на рівні 60% і більше. Кращі результати одержані при лазерному легуванні не полірованою, а шорсткою поверхнею, оскільки це забезпечує кращу адгезію обмазки і

вугільному та ін. Крім того, до складу паст додають активуючі добавки, що збільшують ступінь засвоєння елемента металом за рахунок активації дифузії, як і при дифузійних методах отримання поверхневих покриттів: буру, хлорид амонію та ін.

Насичення вуглецем з газової фази можливе лише при великому тиску - близько ста атмосфер, оскільки при малому тиску дисоціація карбоновмісних газів йде слабо і помітного насичення розплаву не спостерігається. Інколи процес ведуть при щільності потужності випромінювання 106-107 Вт/см<sup>2</sup>. Тоді над поверхнею оброблюваної деталі утворюється плазмова хмара, що є сумішшю іонізованих частинок легуючого елемента і металу, що випарувався з поверхні деталі. Іонізація частинок легуючого елемента призводить до більш повного насичення розплавленого металу. Такий різновид легування з газової фази названий **лазерно-плазмовою обробкою**. Принципово можлива іонізація газової фази іншими методами, наприклад, за допомогою електроіскрового розряду, електричної дуги та ін. Для використання лазерної цементації з газової фази потрібні складні камери високого тиску, в які потрібно поміщати оброблювані деталі і вводити лазерний промінь.

Процес лазерної цементації з рідкої фази, або інакше **гідропроменева обробка**, в карбоновмісних розчинах технологічно здійснюється досить просто. Звичайно деталь поміщають у рідину, що містить вуглець, наприклад, у гексан, ацетилен, толуол, тетрахлорид вуглецю, мінеральне масло та ін. Як показано на рис. 26, при лазерній дії в рідині утворюється парогазовий канал, через який випромінювання потрапляє на поверхню виробу. Біля поверхні виробу канал розширюється, утворюючи куполоподібний простір, насичений парами вуглецю. Теплова дія лазерного променя посилюється тим, що частина відбитого від пове-

рхні випромінювання повторно фокусується у зону лазерної дії стінками рідини у куполоподібному просторі.

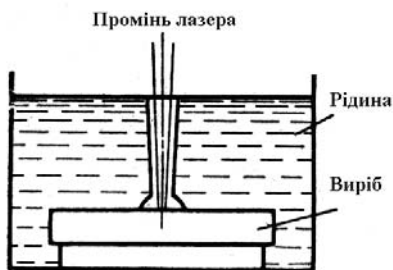


Рисунок 26 – Схема гідропроменевої обробки

Під час лазерної цементації низько- або середньовуглецевої сталі, структура складається з мартенситу і залишкового аустеніту. Мікротвердість у цьому випадку досить велика і досягає 9000 МПа внаслідок високої насиченості мартенситу. При введенні більшої кількості вуглецю в зону оплавлення кількість аустеніту може помітно збільшуватися і мікротвердість коливається у широкому інтервалі від 4500 до 9000 МПа. При подальшому підвищенні вмісту вуглецю у зоні оплавлення або при лазерній цементації високовуглецевих сталей у структурі легованих зон, крім мартенситу і аустеніту, з'являються карбіди. Мікротвердість із збільшенням кількості фази карбіду підвищується від 9000 до 14000 МПа.

Таким чином, лазерна цементація може бути застосована для підвищення твердості вуглецевих сталей.

**Азотизація.** При лазерній азотизації як пасти використовують аміачну сіль, карбамід  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . Азотизацію залізобуглецевих сплавів з газової фази проводять в азоті при високому тиску в спеціальній камері. Введення лазерного променя у таку камеру відрізняється значною складністю, і такий метод має обмежене застосування.

Значно простіше здійснюється газова азотизація в струмені аміаку, хоча і в цьому разі потрібна спеціа-

Залежно від кількості вуглецю, що вводиться, фазовий склад легованих зон і їх мікротвердість можуть бути різними.

При легуванні в режимах, що забезпечують введення невеликої кількості вуглецю у зону оп-

льна камера для запобігання викиду аміаку в навколишнє середовище. Збільшення тиску газової фази звичайно приводить до підвищення концентрації азоту в легованій зоні. Про це свідчить збільшення мікротвердості за Віккерсом сталі 38ХМЮА від 700 до 900 НV при збільшенні тиску аміаку від 0,1 до 0,4 МПа у процесі лазерної азотизації на установці «Квант-10» при щільності потужності  $0,3 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

Найпростіше здійснюється газова азотизація таких металів і їх сплавів, як титан, цирконій, гафній. Для насичення розплавленого металу в цьому випадку досить проведення лазерного оплавлення на повітрі або в струмені азоту. При азотизації титанових сплавів у зоні оплавлення формується шар, що містить нітриди титану; мікротвердість його зростає до 17000-20000 МПа.

Для здійснення азотизації сплавів з рідкої фази виріб поміщають у рідкий азот.

У структурі легованих зон сталей є азотний мартенсит, залишковий аустеніт і нітриди заліза.

Лазерна азотизація може застосовуватися для збільшення твердості, зносостійкості і підвищення теплостійкості, оскільки азотний мартенсит зберігається при нагріванні до високих температур. Стійкість сталі проти каплеударної ерозії після лазерної азотизації зростає утричі у порівнянні з лазерним гартуванням.

**Силіціювання.** Цей процес здійснюється або з нанесенням обмазок, що містять порошок кремнію, або з рідкої фази, наприклад з суспензії силікагелю  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ . При концентрації кремнію до 0,1% у легованій зоні сталей структура є  $\alpha$ -залізо очевидно мартенсит. При збільшенні концентрації кремнію, крім  $\alpha$ -Fe, у структурі зони утворюються силіциди  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{FeSi}$  і  $\text{FeSi}_2$ . Зі збільшенням вмісту кремнію у зоні легування заліза або низьковуглецевих сталей мікротвердість збільшується від 8000 до 14000-

15000 МПа. За наявності силіцидів  $\text{FeSi}$  і  $\text{FeSi}_2$  в зоні спостерігається утворення пор і тріщин. Відмінною рисою силіціювання є велика рівномірність мікротвердості по всьому об'єму зони легування.

Після лазерного силіціювання значно збільшуються теплостійкість, зносостійкість, корозійна стійкість сталей.

**Борування.** Найчастіше застосовується борування з нанесенням обмазок, які є сумішами порошків бору, карбиду бору  $\text{B}_4\text{C}$ , борного ангідриду  $\text{B}_2\text{O}_3$ , бури  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot x \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , феробору із зв'язувальною речовиною, наприклад з клеєм БФ-2. Використовуються також водні суспензії деяких з цих порошків. Іноді застосовується суміш борного ангідриду з графітом. Особливістю лазерного борування з нанесенням обмазок є утворення кратера на поверхні легуваного металу при обробці з підвищеною щільністю потужності випромінювання. Це обумовлено горінням бору, виділенням додаткової кількості теплоти, внаслідок чого можуть розвиватися процеси кипіння і випаровування металу.

Борування може здійснюватися при оплавленні поверхневих шарів, напилених плазмою, а також при оплавленні дифузійних покриттів.

У структурі борованих зон при невеликому вмісті бору є  $\alpha\text{-Fe}$  і боридна евтектика, мікротвердість у цьому випадку становить 6000-12000 МПа. Збільшення швидкості обробки, зменшення потужності або енергії в імпульсі, збільшення діаметра лазерної плями і товщини обмазки призводять до збільшення вмісту бору в зоні легування. Збільшення вмісту бору можна досягти при обробці в захисному середовищі або при багаторазовому нанесенні й оплавленні обмазки. При збільшенні концентрації бору в структурі з'являється велика кількість бориду, мікротвердість різко підвищується і становить 14000-21000 МПа. Серед бориду потрібно виділити  $\text{Fe}_3\text{B}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{FeB}$ . Відзначимо, що борид

Fe<sub>3</sub>V при дифузійному боруванні не утворюється. Максимальне значення мікротвердості фіксується за наявності в шарі бориду FeV.

Відмінністю структури борованих зон від азотованих і цементованих є відсутність залишкового аустеніту, що приводить до більшої твердості і зносостійкості. При збільшенні в легованому шарі кількості фази FeV поверхня добре працює при абразивному зношуванні, тоді як при ударній дії рекомендується одержувати в структурі борид Fe<sub>3</sub>V і Fe<sub>2</sub>V. У більшості випадків експериментально встановлено, що найбільша зносостійкість є не при повному перекритті плям або смуг, а при 60-90% заповненні зміцнюваної поверхні. Зменшення мікротвердості у легованій зоні не спостерігається після нагрівання до 600°C, якщо в структурі є борид Fe<sub>2</sub>V і FeV.

## **10.2 Лазерне легування металевими компонентами і різними з'єднаннями**

На сьогодні проведені експерименти з легування заліза і сталей багатьма чистими металами: C, Cr, Sn, Mn, Nb, Ni, Mo, W, Ta, Ti, V, а також сплавами Cr-Mo-W, Ni-Nb та ін. Процес з оплавленням заздалегідь нанесених компонентів на поверхню застосовується як при імпульсній, так і при безперервній обробці. Процес з подачею присадного матеріалу в зону обробки (в основному порошку) ведеться тільки з використанням безперервних лазерів, оскільки в цьому випадку можна забезпечити синхронізацію подачі і дії випромінювання.

Відмінною особливістю формування структури легованих зон є велика пересиченість твердого розчину, що значно перевершує розчинність у рівноважних умовах. У деяких випадках можливе утворення інтерметалідів. При легуванні залізовуглецевих сплавів тугоплавкими і карбі-

доутворювальними компонентами мікротвердість підвищується, при легуванні не карбідоутворювальними компонентами, наприклад нікелем, мікротвердість знижується.

Після лазерного легування чавуну і сталі хромом корозійна стійкість помітно зростає і досягає тих самих значень, що й у сплаву з таким самим вмістом хрому. Таке легування розробляється з метою підвищення ударної міцності і зносостійкості. Легування низьковуглецевої нікельмолібденової сталі хромом і вуглецем на  $\text{CO}_2$ -лазері дозволяє отримати легований шар завглибшки 1,25 мм і твердістю HRC 55. У цьому випадку значно збільшується теплостійкість.

Крім легування чорних металів, дуже перспективним є лазерне легування кольорових металів і сплавів, у першу чергу алюмінієвих і титанових. Алюмінієві сплави звичайно легують такими компонентами, як залізо, нікель, титан, ферованадій, і сплавами Ni - Cr - B - Si, C - Cu та ін. Структура легованої зони –  $\alpha$ -твердий розчин легуючого елемента в алюмінії й інтерметалідні фази  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{VAAl}_3$ ,  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{CoAl}$ ,  $\text{NAAl}_3$ .



Рисунок 27 – Мікроструктура сплаву  $\text{Al}_3\text{O}$  після легування його нікелем за допомогою безперервного  $\text{CO}_2$ -лазера

На рис. 27 наведена мікроструктура сплаву  $\text{Al}_3\text{O}$  після легування його поверхні нікелем. Видно, що після лазерного легування інтерметаліди мають форму, близьку до глобулярної. Це припускає отримання хороших експлуатаційних властивостей легованої поверхні. Порівняння мікроструктури алюмінієвих сплавів  $\text{Al}_4$ ,  $\text{Al}_3\text{O}$  при легуванні їх порошками заліза, нікелю, сплаву Ni – Cr - B - Si показав

ло, що при легуванні з інжекцією порошку в ЗЛВ структура менш голчаста і має менше пор, ніж при легуванні з обмазок. Мікротвердість легованих зон в алюмінієвих сплавах підвищується до 2000-3000 МПа, а в скупченнях інтерметалідів - до 8000-10000 МПа.

При лазерному легуванні титанових сплавів найбільша увага надається переплавленню газотермічних і гальванічних покриттів, зокрема хрому. Хром є  $\beta$ -стабілізатором для сплавів титану. У легованій зоні формується грубозерниста структура, що є  $\beta$ -фазою. Мікротвердість сплаву ОТ4 після такого легування збільшується від 2800 до 4800-6400 МПа. При цьому поліпшуються трибологічні характеристики поверхні.

**Лазерне легування карбідами тугоплавких металів TiC, NbC, VC, TaC, WC, їх субкарбідами Nb<sub>2</sub>C, Ta<sub>2</sub>C і сплавами на їх основі ВКЗ, ВК6, Т15К6 та ін. здійснюється такими методами: оплавленням обмазок або електроіскровим легуванням, а також з подачею порошку в зону лазерної дії за допомогою інертного газу. Як зв'язувальна речовина для приготування обмазок використовуються рідке скло, силікатний клей та ін.**

Практика показала можливість синтезу карбідів у легованій зоні при нанесенні на поверхню суміші порошку тугоплавкого металу і графіту. При цьому в легованих зонах на сталях мікротвердість підвищується до 10000 МПа. Незважаючи на велику кількість легуючих компонентів в легованій зоні, мікротвердість тут значно нижча за мікротвердість карбідів.

При лазерному легуванні сплавів з уведенням карбїду кремнію вдається отримати мікротвердість у легованій зоні до 17000 МПа при достатньо великих розмірах зони. Дуже перспективним може виявитися лазерне легування складними композиціями, наприклад, борованими порошками Ni, C, Fe, Cr для отримання спеціальних



властивостей поверхні. У зв'язку з цим становить також інтерес лазерне легування сталей У10, 45, ШХ15 і титанових сплавів сполукою  $\text{MoS}_2$ , у результаті якої зносостійкість може збільшуватися у 2-5 разів.

На цей час допотрібножені процеси лазерного наплавлення при оплавленні заздалегідь нанесених порошкових паст (шлікерних покриттів) або напилених газотермічних шарів, а також наплавлення з подачею присадного порошку в зону оплавлення.

## **11 ВПЛИВ УМОВ ОХОЛОДЖУВАННЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ НАГРІВАННЯ СВЧ**

При поверхневому гартуванні, як правило, застосовується швидке охолодження. Необхідність такого охолодження визначається, по-перше, деякими технологічними і тепловими факторами, по-друге, особливістю будови аустеніту, одержаного після швидкого високочастотного нагрівання.

При поверхневому нагріванні досягають певного розподілу температури по перетину шару, що нагрівається. Швидке охолодження запобігає вирівнюванню тепла по перетину виробу, дозволяє зберегти поверхневий характер нагрівання за винятком тих випадків, коли з технологічних міркувань задається невелика пауза між нагріванням і охолодженням. Крім того, швидке охолодження дає можливість зробити сумірними тривалість нагрівання і тривалість охолодження, що полегшує побудову графіка режиму термічної обробки, що закладається в автоматизовані пристрої.

Як наголошувалося вище, у результаті швидкого нагрівання аустеніт зберігає неоднорідність концентрації вуглецю і домішок інших елементів. У той же час стійкість аустеніту при охолодженні значною мірою залежить як від

вмісту вуглецю, так і від концентрації і рівномірності розподілу легуючих елементів і неминучих домішок. На рис. 28 схематично показано вплив однорідності аустеніту на положення кривих ізотермічного розпаду аустеніту. Із

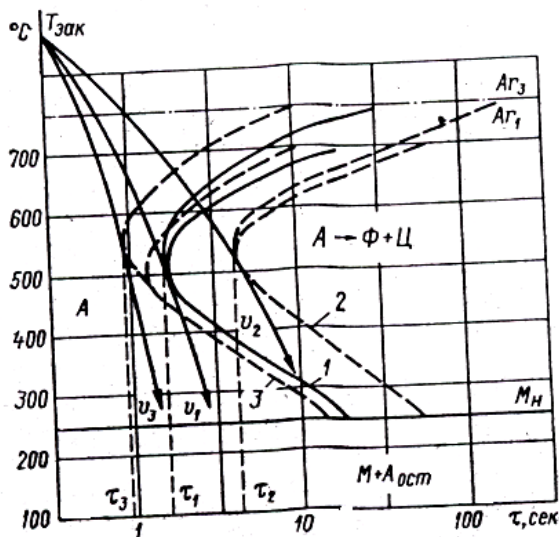


Рисунок 28 – Схематичні криві ізотермічного розпаду аустеніту вуглецевої сталі: 1 – після повільного нагрівання при аустенітизації; 2 – після швидкого нагрівання в зонах, що збагачені вуглецем; 3 – те саме в зонах, збіднених вуглецем;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  – тривалість інкубаційного періоду;  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  – критичні швидкості охолодження

співвідношення кривих видно, що якщо аустеніт одержаний при повільному нагріванні середньовуглецевої доевтектоїдної сталі і після закінчення нагрівання він однорідний, то розпад його з утворенням ферито-цементитної суміші в інтервалі температур мінімальної стійкості починається через період часу  $\tau_1$  (крива 1). Якщо аустеніт одержаний при швидкому нагріванні, то в ньому зберігається неоднорідність складу. Ділянки аустеніту, що були раніше перлітом, можуть до кінця нагрівання мати концентрацію вуглецю, близьку до евтектоїдної, і період стійкості в цих

ділянках  $\tau_2$  буде відповідно більший (крива 2). Ділянки аустеніту, що були у вихідній структурі феритом, збережуть знижену концентрацію вуглецю, і період стійкості його  $\tau_3$  виявиться меншим (крива 3).

Таким чином, якщо застосувати для середньовуглецевої сталі, нагрітої швидко, той самий режим охолодження, що і для сталі, нагрітої повільно ( $v_{\text{охл}} = v_2$ ), то в областях, що збагатять вуглецем, застосована швидкість охолодження буде явно більше  $v_1$ , необхідної для отримання мартенситної структури, а на ділянках, збіднених вуглецем, швидкість охолодження буде недостатня ( $v_3 > v_{\text{охл}}$ ), і перетворення аустеніту в них відбудеться у верхньому інтервалі температур. Отже, для отримання мартенситу у всьому обсязі гартованого металу швидкість охолодження повинна бути більше  $v_3$ , тобто значно більше, ніж в умовах звичайної термічної обробки. Така особливість поведінки аустеніту виявляється найпомітніше в маловуглецевих сталях і сталях, легованих карбідоутворювальними елементами, в яких отримання однорідного за складом аустеніту зазнає утруднення. При недостатній швидкості охолодження структура після гартування може містити мартенсит і троостит, причому останній матиме вигляд сітки навколо мартенситних обсягів на відміну від того, коли однорідний аустеніт охолоджується з помірною швидкістю і виділений у верхньому інтервалі температур троостит розміщується у вигляді оточених кубел на загальному фоні мартенситу.

Необхідність швидкого безперервного охолодження в інтервалі температур мінімальної стійкості аустеніту неминуче призводить до прискорення охолодження в області мартенситного перетворення. При охолодженні душем у області 300-250°C, тобто в період утворення мартенситу, швидкість охолодження дуже велика і може досягати 10-20 тис. град/сек. Це відображається на структурі загартованої сталі.

У вуглецевій сталі основна маса аустеніту перетворюється на мартенсит поблизу температури початку перетво-

рення,  $M_n$ , тобто в області температур 250-350°C, залежній від концентрації вуглецю в аустеніті. Однак цей рівень температур відповідає температурі відпуску мартенситу. Отже, в процесі охолодження мартенсит піддаватиметься відпуску – концентрація вуглецю в твердому розчині, що переохолоджує, зменшується. Ступінь відпуску залежить як від температури, при якій іде процес, так і від часу перебування сталі в області температур відпуску. На рис. 29 на діаграму перетворення аустеніту при безперервному охолодженні нанесені дві криві охолодження з різною швидкістю –  $v_1$  і  $v_3$ . Обидва режими охолодження забезпечують отримання структури мартенситу. Однак режими охолодження розрізняються тривалістю перебування структури гартування в зоні відпуску:  $\Delta t_3 \ll \Delta t_1$ . Отже, ступінь відпуску буде різним. Це ілюструється даними дослідження концентрації вуглецю в мартенситі при різних режимах термічної обробки. За допомогою рентгеноструктурного аналізу визначена концентрація вуглецю в мартенситі сталі трьох марок: із вмістом вуглецю 0,45, 0,62 і 0,79%. Зразки завтовшки 5 мм нагрівалися у печі й охолоджувалися зануренням у воду або інтенсивним душем. У обох випадках відбувався помітний відпуск мартенситу (рис. 30), оскільки концентрація вуглецю у мартенситі ні в одному випадку не досягає визначеної хімічним аналізом. У той же час мартенсит, одержаний при охолодженні душем, зберігає вуглецю в 1,5-2 рази більше, ніж при охолодженні зануренням у воду. Це відображається на твердості загартованих зразків (рис. 31). За рахунок охолодження на вміст збільшення швидкості охолодження твердість підвищилася на 2-3 од. HRC. Крива 3 на рис. 31 показує рівень твердості, одержаної при охолодженні душем після індукційного нагрівання із швидкістю 10-100 град/сек. Додаткові 1,522 од. HRC одержані за рахунок подрібнення блокової структури.

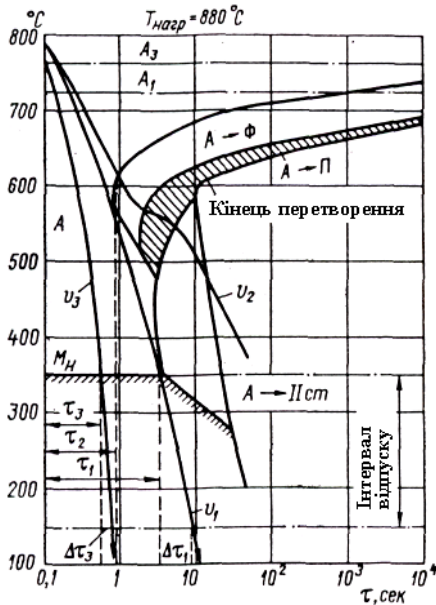


Рисунок 29 – Діаграма розпаду аустеніту сталі 45 при безперервному охолодженні:  $v_3 > v_1 > v_2$  – криві охолодження;  $\tau_3 < \tau_2 < \tau_1$  – період охолодження до початку перетворення аустеніту;  $\Delta\tau_3 < \Delta\tau_1$  – тривалість перебування загартованої сталі в інтервалі температур відпуску

Таким чином, як умови нагрівання, так і умови охолодження виконують суттєву роль у визначенні структури і властивостей поверхнево загартованої сталі. Швидке нагрівання й інтенсивне душеве охолодження можуть бути джерелами підвищення якості загартованого виробу. На деталях машинобудування ці умови досягаються при поверхневому гартуванні. Однак на виробах малого перетину вони можуть бути створені і при кризному нагріванні. Тому вивчення кінетики фазових перетворень при нагріванні і охолодженні часто виробляють, використовуючи електронагрівання контактним методом зразків тонкого перетину, на яких можна створити умови швидкого охолодження. Одержані дані на зразках при контактному електро-

нагріванні з успіхом можуть бути використані і при нагріванні індукційним методом.

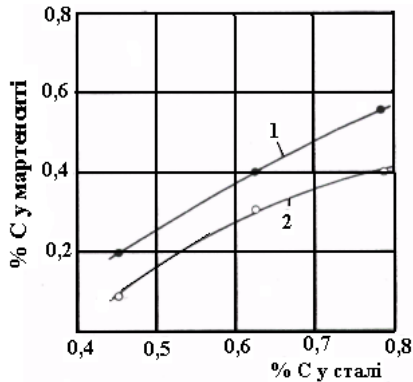


Рисунок 30 – Вплив інтенсивності охолодження на вміст вуглецю у мартеніті вуглецевої сталі: 1 – охолодження водяним душем з витратою води  $70 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$  ( $\alpha_{\text{екв}} = 100000 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot\text{град.}$ ; 2 – занурення у воду ( $\alpha_{\text{екв}} = 40000 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot\text{град.}$ )

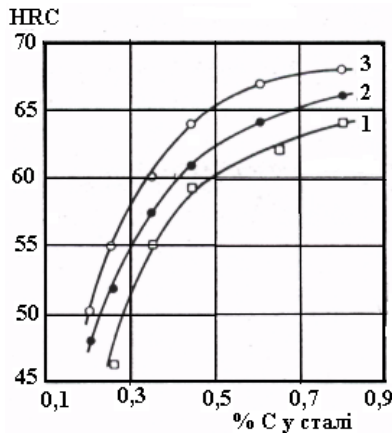


Рисунок 31 – Твердість мартеніту, залежно від вмісту вуглецю у сталі: 1 – нагрівання у печі,  $v = 1 \text{ град./с}$ , охолодження зануренням у воду ( $\alpha_{\text{екв}} = 4000 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot\text{град.}$ ); 2 – нагрівання таке саме, охолодження водяним душем ( $\alpha_{\text{екв}} \approx 100000 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot\text{град.}$ ); 3 – нагрівання індукційне  $v = 10-100 \text{ град./с}$ , охолодження інтенсивним водяним душем ( $\alpha_{\text{екв}} \approx 100000 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{год}\cdot\text{град.}$ )

## **12 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З КУРСУ**

Лабораторна робота 1  
«Зміцнення деталей машин пластичною  
деформацією»  
(тривалість роботи - 6 год.)

### **I МЕТА РОБОТИ**

1.1 Ознайомитися з методом зміцнення поверхневою пластичною деформацією деталей машин циліндрової форми (ППД).

1.2 Вивчити короткі теоретичні положення і відповіді на запитання контролю знань.

1.3 Провести експеримент згідно із завданням - зміцнення валу кулькою при різних режимах різання.

1.4 Зробити висновки за результатами експерименту.

### **2 ОБЛАДНАННЯ І ПРИЛАДИ**

2.1 Токарно-гвинторізний верстат.

2.2 Кульковий обкатник.

2.3 Заготовки.

2.4 Мікрометр.

2.5 Твердомір ТК-2.

2.6 Масло індустріальне.

## **3 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ**

### **3.1 Зміцнення металевих матеріалів методом поверхневої пластичної деформації (ППД)**

#### **3.1.1 Загальні положення**

Надійність і ресурс деталей машин в основному визначаються якісним станом їх поверхневого шару, що є носієм конструктивних, технологічних і експлуатаційних концентраторів напруг, величина і характер яких визначають втомне руйнування конструкції в експлуатації.

Суттєвішими з погляду експлуатації властивостями поверхневого шару деталей є шорсткість, твердість і рівень залишкових напруг.

Необхідні параметри якості поверхні і практично всі найважливіші експлуатаційні властивості деталей машин можуть бути забезпечені процесами зміцнення їх методом поверхневої пластичної деформації. Зміцнення методом ППД приводить до підвищення поверхневої твердості, утворення в поверхневих шарах деталей залишкових напруг стиснення і сприятливої зміни мікрогеометрії поверхонь. У результаті залежно від функціонального призначення та умов експлуатації деталей підвищуються їх втомна і контактна міцність, зносостійкість і опір корозії, гідрощільності і маслоутримувальної здатності.

Ефективність способів зміцнення ППД у поєднанні з високою продуктивністю й економічністю робить їх перспективними у всіх галузях промисловості - від приладобудування до важкого машинобудування.

Номенклатура деталей у машинобудуванні, що підлягають зміцненню методами ППД, дуже значна, причому переважна більшість деталей припадає на частку автотракторного, авіаційного, сільськогосподарського і важкого машинобудування.



Аналіз використання ППД для зміцнення деталей машин у вітчизняній і зарубіжній практиці показав різноманітність вживаних способів зміцнення, підтверджує особливу ефективність використання ППД для зміцнення деталей з концентраторами напруг, що піддаються знакозмінним, циклічним навантаженням і дає можливість визначити основні напрями розвитку і розширення області впровадження ППД у вітчизняній промисловості, включаючи:

**1 Створення науково обґрунтованої теоретичної бази** для поглибленого дослідження механізму ППД і його впливу на напружено-деформований стан матеріалу деталі в осередку деформації з метою інтенсифікації процесів пластичної деформації: оптимізації режимів зміцнення, підвищення продуктивності й ефективності процесів зміцнення.

**2 Розроблення нових способів** зміцнення деталей методами ППД, зокрема комбінованих, що передбачають поєднання зміцнювальної дії з ефектами меча, лазера, електронного променя, хіміко-термічної обробки, електрохімічного нанесення композиційних покриттів та ін.

**3 Створення нових конструкцій** високоефективного деформуючого інструменту і пристроїв (розкочування, дорни), де величина зусилля деформації може регулюватися, замість жорстких інструментів, де величина і стабільність зусиль деформації забезпечуються за рахунок жорстких вимог до точності обробки зміцнюваних поверхонь.

У даних методичних вказівках розглядаються практично всі способи зміцнення методами ППД, вживані в промисловості, показані високоефективні способи зміцнення ППД у поєднанні з термічною, хімічною та іншими видами обробки, що розширює реальну можливість застосування високоміцних сталей з мартенситною структурою для виготовлення деталей з конструктивними і технологічними концентраторами напруг, до яких ставляться підвищені

вимоги щодо статичної міцності та опору втомним руйнуванням, зносо- і корозійної стійкості, в'язкості. Показано, що висока живучість деталей, зміцнюваних методом ППД, досягається при комплексному підході до вибору тих або інших способів, які забезпечать якнайкращі втомні характеристики з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів, рівня і характеру розподілу спадкових залишкових напруг 1-го роду, конструктивних особливостей деталей, наявності концентраторів напруг.

### **3.2.2 Систематизація способів зміцнення методом ППД**

Усі наявні й перспективні (що розробляються або підлягають розробленню) способи зміцнення із застосуванням ППД залежно від форми і розмірів деталі, їх міцності і жорсткості, технологічного процесу і кінематичної схеми обробки, вимог до точності та якості оброблюваних поверхонь, виду деформуючих елементів, характеру їх контакту з оброблюваною поверхнею, характеру виробництва під-розділяються, з певним ступенем умовності, на 3 укрупнені класи - **статичні, динамічні і комбіновані**.

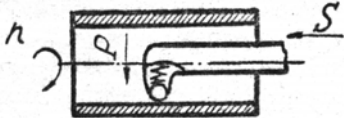
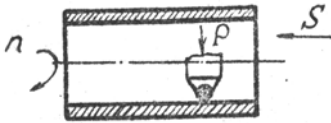

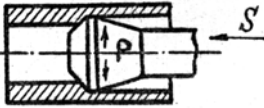
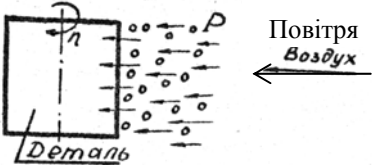
У табл. 1 подані деякі основні методи ППД.

**До статичних** відносять процеси зміцнення локальних робочих (що сполучаються) поверхонь деталей машини, методом ППД, виконувані способами обкатки, розкочування, дорнування із застосуванням мірного або регульованого зміцнювального інструменту, деформуючими елементами якого є кульки або ролики, що забезпечують безперервну дію на оброблювану поверхню і постійність зусилля деформації.

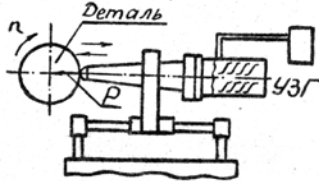
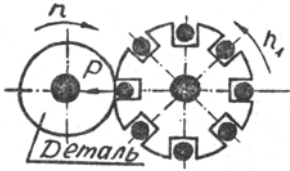
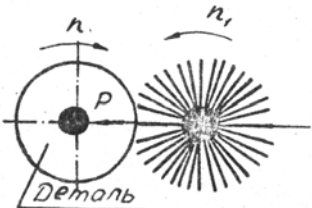
**До динамічних** відносять процеси, що зміцнюють методом ППД "обробка довкруги" або більшості поверхонь деталей і вузлів, зокрема великогабаритних, наприклад, силові деталі планера літаків типу панелей, ланжеронів, шпангоутів, нефтюр; лопатей силових гребних і повітря-

них гвинтів, що працюють в умовах знакозмінних навантажень, виконувани "ударними" способами із застосуванням деформуючих елементів у вигляді сипкого робочого тіла (дріб сталевий, дріб скляний, абразив) і спеціалізованого зміцнювального обладнання.

Таблиця 1 – Основні методи ППД

| Ескіз   | Сутність методу   |
|---|---|
| Статичні методи   |   |
|    | <p>Зміцнювальне розкочування: кочення інструменту (куля, ролик) по обкочуваний поверхні, для плоских і опуклих поверхонь - обкочування, для внутрішніх - розкочування</p>             |
|    | <p>Вигладжування: ковзання інструменту по локально контактуючій з ним поверхні</p>  |
|    | <p>Вібраційне накопчення: накопчення або вигладжування при вібрації інструменту (куля, що вигладжує наконечник) по дотичній до поверхні металу, що деформується</p>                   |
|    | <p>Поверхнєве дорнування: поступальне ковзання дорна по поверхні, що обхвачує його.</p>   |
| Ударні методи   |   |
| <p style="text-align: center;">Ударне місце</p>  | <p>Дробоструминна, дробометна обробка: удари дробу по металу, що деформується. Залежно від джерела енергії (струмінь газу, рідина) обробка називається гідропневмодробоструминною</p> |

Продовження табл. 1

|   |   |
|---|---|
|  | <p>Ультразвукова обробка: до постійної сили додається сила ударів ультразвукових коливань</p>       |
|  | <p>Відцентрова обробка: удари інструменту по оброблюваній поверхні під тиском відцентрової сили</p> |
|  | <p>Обробка металевою щіткою: удари кінцями дроту щітки, що обертається</p>                          |

До комбінованих відносять комплексні процеси зміцнення, об'єднуючі різні методи зміцнювальної технології, також як хіміко-термічні, термомеханічні, гальванічні та ін. в поєднанні із статичними або динамічними способами зміцнення металів методами ППД.

### 3.2.3 Статичні способи зміцнення методом ППД

До статичних відносять способи зміцнення внутрішніх, зовнішніх і плоских поверхонь тіл обертання циліндрової, конічної, сферичної та іншої складної форми, що забезпечують безперервну деформуючу дію на оброблювану поверхню і постійність зусилля деформації через кулькові і роликіві деформуючі елементи, вбудованих в спеціальний зміцнювальний інструмент. До них відносять способи розкочування внутрішніх, обкочування зовнішніх і плоских торцевих поверхонь деталей або тіл обертання, дорнування, вигладжування, зокрема алмазного. Останнім часом

склад статичних способів зміцнення значно поповнився в кількісних і якісних відношеннях за рахунок створення нових високоефективних способів зміцнення, зокрема з використанням ефекту накладення низькочастотних коливань на деформуючі елементи в процесі розкочування, обкочування, дорнування та ін., що створює передумови управління якістю і надійністю виробів залежно від їх функціонального призначення.

### **3.2.3.1 Обкочування і розкочування кульковим і роликівим інструментом**

**Сутність процесу.** Значне місце займають способи обкочування роликівим і кульковим інструментом у серійному і масовому виробництвах.

Сутність способів обкочування полягає у тому, що по оброблюваній поверхні під певним тиском котяться кулі або ролики і згладжують мікронерівності попередньої обробки. Кулі (ролики) знімають і осаджують виступи і заповнюють ними западини профілю. При цьому висота мікронерівностей істотно зменшується й утворюється мікропрофіль, відмінний плавністю форм нерівностей і їх однорідністю, освічений рельєф з великими радіусами виступів і западин сприяє утриманню змащування між поверхнями.

Накоченню піддаються деталі з різного матеріалу, що пластично деформується у холодному стані (сталі, чавуну, кольорових металів і сплавів).

У табл. 2 подані результати зміцнення ППД ступінчастих валів.

Обробно-зміцнювальне обкочування загартованих деталей доцільне проводити кулями діаметром 4,0-10 мм, з подачею 0,06-0,10 мм/об і швидкістю 50-80-0,017 мм/с, рекомендований оптимальний тиск у контакті наведений у табл. 3.

Обкочування з рекомендованими режимами забезпечує створення зміцненого шару завглибшки 0,6-1,2 мм. Визначення нормальної сили виробляється залежно від вибраного тиску і розмірів інструменту.

Таблиця 2 – Ефективність зміцнення ступінчастих валів обкочування роликми (кульками)

| Розміри валів, мм                    |                  |                        | Розміри ролика, мм |                | Сила обкочування, рН | Межа витривалості валів, МПа |          | Збільшення за рахунок обкочування, % |
|--------------------------------------|------------------|------------------------|--------------------|----------------|----------------------|------------------------------|----------|--------------------------------------|
| діаметр щілин ступені D <sub>д</sub> | радіус галтелі R | діаметр D <sub>д</sub> | R D <sub>д</sub>   | радіус профілю |                      | незміцнені                   | обкочені |                                      |
| 17                                   | 1                | 0,06                   | 50,8               | 1              | 7000                 | 208                          | 352      | 68                                   |
| 15                                   | 2                | 0,133                  | 50,8               | 2              | 3500                 | 280                          | 364      | 30                                   |
| 133                                  | 7,15             | 0,053                  | 87                 | 4,4            | 6800                 | 130                          | 168      | 30                                   |
| 18                                   | 0,76             | 0,042                  | 50,8               | 0,76           | 2500                 | 149                          | 234      | 57                                   |
| 12                                   | 0,85             | 0,071                  | 20                 | 0,85           | 500                  | 195                          | 235      | 20                                   |
| 14                                   | 0,8              | 0,057                  | 18                 | 0,75           | 5000                 | 180                          | 210      | 17                                   |
|                                      |                  |                        |                    |                | 2500                 | 180                          | 290      | 61                                   |
| 12                                   | 0,8              | 0,066                  | 1,6                | 0,8            | 150                  | 180                          | 190      | 5                                    |
| (кулька)                             |                  |                        |                    |                | 450                  | 180                          | 240      | 33                                   |
| 30                                   | 2                | 0,066                  | 4                  | 2              | 1500                 | 140                          | 180      | 29                                   |
| (кулька)                             |                  |                        |                    |                | 2500                 | 140                          | 210      | 50                                   |
| (кулька)                             |                  |                        |                    |                | 4500                 | 140                          | 260      | 86                                   |
| 45                                   | 2                | 0,045                  | 3,94               | 1,97           | 4000                 | 120                          | 210      | 75                                   |
| 180                                  | 8                | 0,045                  | 15,86              | 7,93           | 65000                | 130                          | 185      | 42                                   |

Таблиця 3 - Середній контактний тиск для обкочування загартованих деталей

| Марка сталей  | Твердість, HRC | Середній тиск у контакті, МПа |
|---|----------------|-------------------------------|
| ШХ15, ЭИ347Ш, P18, P9к5, У8, У10  | 63 і вище      | 2800-3000                     |
| 111Х15, 14Х2НЗМА, ЭИ736Ш, P18, P9К5<br>55СМА: 40ХВА, 29ХНЗА, У8, У10, 60Г | 59-63          | 2700-3900                     |
| 40Х, 50Г2, 142Х23МА, 55СМА, 20ННЗА,<br>40ХНВА, 60Г                        | 53-59          | 2500-2800                     |
| 40ХНВА, 60Г, 40Х, 45, 50Г2, 1ПХ15, У8                                     | 46-53          | 2300-2500                     |
| 40Х, 45, 50Г2, ШХ15, У8, 60Г  | нижче 45       | 2100-2400                     |

### 3.2.3.2 Динамічні способи зміцнення методом ППД

Динамічні процеси зміцнення набули найширше поширення у машинобудуванні внаслідок великої їх різноманітності, порівняної простоти в освоєнні і впровадженні зміцнювальної технології і обладнання, високої ефективності й універсальності їх технологічних можливостей. Особливо широку галузь застосування знайшли **дрободарні й абразивні способи**, деформуючи елементами яких є сипке робоче середовище у вигляді абразивних гранул, дробу сталевого, скляного та ін., що забезпечують обробку наймасовішої номенклатури деталей машин практично будь-яких габаритів (зокрема великогабаритних з  $L \times B \times H = 3000 \times 2500 \times 200$  мм), матеріалів і складності форм. Універсальність динамічних способів і висока їх ефективність виявляються у плані можливого поєднання в одному процесі зачисних і зміцнювальних операцій (гідро-віброабразивна обробка).

Для підвищення втомної міцності і зносостійкості деталей з листового матеріалу, працюючих при знакозмінних навантаженнях, широко застосовуються дробоструминні

способи зміцнення, суть яких полягає у тому, що потік дробу прямує на оброблювану деталь із швидкістю зіткнення, що досягає до 100 м/с, внаслідок чого відбувається пластична деформація її поверхні за заданою програмою.

Головною перевагою зазначеного способу є його **висока технологічність і універсальність**, що забезпечує можливість обробки будь-яких складнофасонних поверхонь деталей, різального, штампового і т.п. інструменту без точного базування і застосування дорогого обладнання. У табл. 4 подані результати впливу поверхневого наклепу на межу витривалості вуглецевої сталі 45 у морській воді.

У деталях, що мають глибокі надрізи і закриті тріщини, обробка дробом мало ефективна. **Обробка дробом порівняно з іншими видами поверхневого зміцнення має ряд технологічних і економічних переваг.**

Таблиця 4 - Вплив поверхневого наклепу на межу витривалості вуглецевої сталі 45 в морській воді

| Стан поверхні зразків | Межа витривалості при базі випробувань у 107 циклів |  |            |   |
|-----------------------|---|--|------------|---|
|                       | на повітрі, МПа                                     | у 3-процентному розчині хлористого натрію, МПа | у %        |   |
|                       |   |  | на повітрі | у 3-процентному розчині хлористого натрію |
| Шліфовані             | 255   | 100  | 100        | 39  |
| Наклепані дробом      | 297   | 202  | 116        | 79  |
| Обкочені роликками    | 282   | 252  | 111        | 99  |

У даний час дробом обробляють такі деталі: клапанні пружини, ресори автомобілів, шестерні коробок передач і заднього моста (конічні і циліндрові), пружини підвіски, різні вали, піввісь, штанги, шатуни, поршневі пальці, коромисла клапанів, пальці, поворотні кулаки, хрестовини кардана, ланки ланцюгів, поршні, картери, блоки цилінд-



рів, гільзи, зварні з'єднання, болти, шпильки, втулки, підшипники, різальний інструмент, штампи і т.д.

Найбільш ефективна дробоструминна обробка деталей після цементації, ціанування або після гартування з нагріванням струмами високої частоти. Таке поєднання обробки, як правило, називають **комплекс-зміцненням**.

Ефективне застосування дробоструминної обробки і для зміцнення зубів зубчастих коліс, що нагріваються для гартування струмами високої частоти у петльовому індукторі. При такому гартуванні біля основи зуба виникають залишкові напруження розтягування. Дробоструминна обробка сприяє усуненню цього недоліку.

Дробоструминна обробка, як та інші способи зміцнення наклепом, знаходить широке застосування для підвищення надійності зварних вузлів різних машин, що особливо працюють в умовах вібрації. Відомо, що відпуск після зварювання низьковуглецевої сталі знижує межу витривалості зварних з'єднань з поперечним швом, а подальший дробоструминний наклеп шва і пришовної зони значно підвищує надійність зварних з'єднань.

Зміцнення дробоструминним наклепом дозволяє збільшити термін служби зварних швів на 310%, колінчастих валів двигунів - на 900%, спіральних пружин - на 137%, ресор - на 500%, великомодульних зубчастих коліс - на 1400%. Застосування дробоструминного наклепу дозволяє підвищити межу витривалості при симетричному згині у деталей без концентраторів напружень на 20-30%, а у деталей з концентраторами - на 40-60%.

Вище були розглянуті процеси зміцнення *сухим дробом*, здійснювані на дробоструминних і дробометальних установках.

Поряд із перевагами обробка сухим дробом має **суттєві недоліки** як експлуатаційні, так і пов'язані з фізичними умовами проходження процесу зміцнення. До недоліків належать:

- 1) високі локальні температури (до 600-650°C);
- 2) відносно висока шорсткість обробленої поверхні;
- 3) активне перенесення матеріалу дробу на оброблювану поверхню, особливо небезпечно з погляду корозійної стійкості для деяких кольорових сплавів;
- 4) нестабільність режиму зміцнення через інтенсивний знос сухого дробу.

Обробка проводиться на спеціальних гідродробоструминних установках ежекторного типу (ГДЕУ).

Ефективне також використання обробки скляними кульками різноманітних деталей в авіаційній, автомобільній, енергетичній промисловості, а також в інструментальному виробництві.

Так, наприклад, обробка скляними кульками діаметром 87 мкм пуансона із твердого сплаву підвищила його стійкість у 10 разів.

У ряді галузей промисловості знайшла поширення **вібраційна обробка у середовищі сталевих кульок**. Оброблювані деталі укладаються в спеціальні контейнери і пересипаються кульками різного розміру. Контейнери поміщаються на вібростендах, де їм подаються низькочастотні коливання певної частоти (16-30 Гц) і амплітуди (2-4 мм), обробка відбувається при зіткненні за рахунок різниці прискорень руху деталей і оброблюваної сталі.

Номенклатура деталей, що піддаються цьому виду ППД, охоплює багато галузей машинобудування. Обробка дробом підвищує надійність, наприклад, пружин більш ніж у 6 разів.

Віброударною обробкою зміцнюють зокрема лопатки компресора. Лопатки компресора виготовляють із корозієстійкої сталі ЭИ964 (1Х12Н2ВМФ). Для зміцнення пер робочої частини лопаток із успіхом застосовують процес віброударної обробки сталевими кульками. Для здійснення цього процесу створені спеціальні установки, що дозволяють забезпечити коливання робочого столу в трьох взаєм-

но перпендикулярних напрямках. Лопатки, як правило, зміцнюються в спеціальному пристосуванні, яке встановлюється на робочому вібростолі. Для віброударної обробки застосовують як робочі тіла - сталеві кульки діаметром 2-3,5 мм.

## **2 Гідродробоструминне і пневмодинамічне зміцнення**

Різновидом дробоструминної обробки є гідродробоструминне зміцнення. Робочим середовищем служить трансформаторне масло в суміші із підшипниковими кульками. Спосіб широко застосовується для зміцнення витих циліндрових пружин, надійність яких підвищується в результаті обробки в 7-8 разів. Стійкість релаксації пружин зростає при цьому в 2-3 рази.

При зміцненні в цьому режимі ступінь наклепу для сталі Р6М5 становить 36,3%, для сталі Х12МВ - 40,2%, але відмітним є те, що висота нерівностей на виробі збільшилася у сталі Р6М5 від 0,24 до 0,28 мкм, у сталі Х12МВ - від 0,19 до 0,25 мкм.

Результати промислових випробувань у пресовому виробництві штампового інструменту, зміцненого у зазначених режимах, показують:

1 Стійкість пуансонів на операції відбортовки кришки картера рульового управління 2101-3401047 збільшилася від 500 до 15000 ударів.

2 На операції пробивки кожуха зчеплення 2101-1601125 стійкість пуансонів збільшилася від 3000 до 70000 ударів.

3 На операції карбування, формування, обрубки і відрізки сухаря клапана 21-1-1007028 стійкість матриць збільшилася від 30-50 тис. до 110-200 тис. ударів.

**Найбільший** вплив на твердість деталей після зміцнення чинить вихідна твердість, **найменший** - величина нормальної сили деформації, а решта факторів несуттєва. Отже, і розкид значень вихідної твердості впливає найбі-

льшою мірою на формування твердості деталей після зміцнення.

### **Ультразвукова обробка (УЗО)**

Ультразвукове віброобточування є прогресивним процесом зміцнення деталей машин ППД. Сутність процесу полягає в дії на оброблювану поверхню сталеві або твердосплавної кулі, притиснутої до неї зі сталою силою і віброуючою із частотою

$$f = 2 \cdot 10^4 \text{ Гц.}$$

У результаті ультразвукової дії на притиснутий із постійним тиском інструмент у контакті можуть розвиватися високі локальні напруги.

Змінне магнітне поле ультразвукової частоти створюється у магнітострикційному перетворювачі генератором. Воно періодично намагнічує магнітострикційний пакет, внаслідок чого змінюється його довжина. Укріплений на пакеті акустичний концентратор служить для збільшення амплітуди коливань інструменту.

Після ультразвукового зміцнення загартованих сталей ШХ15, У10А, Х12 поліпшується шорсткість поверхні, поверхнева мікротвердість зростає на 30-40%, глибина наклепу становить від 0,65 до 0,3 мм.

УЗО - єдиний із способів ППД, який забезпечує зміцнення поверхневого шару деталей, малу шорсткість поверхні ( $R_z = 0,8-0,4$  мкм при вихідній  $R_z = 20-6,3$  мкм) і великі залишкові напруження стиснення (до 1100-1200 МН/м<sup>2</sup>).

Факторами, що визначають відносно високу якість поверхневого шару деталей, сформованого УЗО, є: особливий напружено-деформаційний і температурний його стан, багатократність деформації і велика швидкість деформації. Поверхневий шар при цьому характеризується рівномірністю важливих фізико-механічних, геометричних і експлуатаційних властивостей і текстури деформації.

УЗО в порівнянні із статичними способами ППД (обкочування кулею та ін.) особливо ефективна після таких видів обробки:

1 Сталевих, термічно- або хіміко-термічно оброблених, а потім шліфованих деталей.

2 Деталей, термічно оброблених променем лазера або низькотемпературною плазмою, що є новим і дуже перспективним напрямом розвитку комбінованої зміцнювально-чистої технології.

3 Різальних інструментів і деталей із швидкорізальних сталей і твердих сплавів.

4 Деталей із малою жорсткістю.

5 Поверхонь складної форми.

6 Деталей із покриттями різними металами і сплавами.

У порівнянні з багатьма чистовими методами обробки різанням і ППД довговічність деталей після УЗО збільшується в 2-5 разів. Спосіб УЗО освоєний на багатьох заводах нашої країни і за рубежом.

У процесі ультразвукового зміцнення на поверхні виробу виникають стискуючі залишкові напруги.

Випробування на зносостійкість під час тертя кочення показали, що величина зносу деталей, оброблених ультразвуковим зміцненням, у 2-5 разів менше, ніж у шліфованих деталей.

Процес УЗО найбільш ефективний при обробці деталей із високовуглецевих сталей У10А, У8А, загартованих і відпущених на різні структури: мартенситну, трооститну, сорбітну. У результаті УЗО у деталей з мартенситною структурою поверхнева твердість зростає на 34%. Цей ефект - наслідок зміцнення, спричиненого пластичною деформацією, часткового перетворення залишкового аустеніту в мартенсит (вміст аустеніту зменшується у 2-3 рази) і дисперсійного твердіння мартенситу, тобто наслідок механічного і фазового наклепу одночасно.

Контактна витривалість кілець підшипників після ультразвукового зміцнення збільшується в 2-2,5 рази в порівнянні зі шліфованими і в 1,3-1,4 рази в порівнянні з кільцями після суперфінішування.

**Зміцнювальне карбування.** Сутність методу полягає у тому, що за допомогою спеціального пристосування по зміцнюваній поверхні завдають удару. При цьому досягається підвищення вихідної твердості на 30-50%, а глибина наклепу становить від 3 до 35 мм. Шорсткість поверхні зменшується. Інструмент складається з ударника з бойком, причому пристосування можуть бути пневматичного, електричного і механічного типів. Звичайно застосовуються бойки у вигляді ролика з профільним радіусом 3-5 мм.

Цей спосіб поверхневої пластичної деформації поверхневих шарів деталей забезпечує підвищення їх межі витривалості, дозволяє у ряді випадків замінити сталь 25ХНВА сталями 40ХНМА або 35ХГСА, які майже удвічі дешевші. Карбування може бути використане для зміцнення складних за формою і важкодоступних концентраторів напруг. Експлуатаційна надійність деталей твердістю HRC 35 підвищується у результаті карбування, на 380%, твердістю HRC<sub>3</sub>, 40 на 500%, а твердістю HRC<sub>3</sub>, 45-50 відповідно на 1000 і на 1300%.

Для цілого ряду практичних випадків цей метод виявляється найефективнішим і економічно вигіднішим. Це має місце, наприклад, при обробці зварних швів, галтелей, западин великомодульних зубчастих коліс та ін. Рационально після зміцнення карбуванням для зменшення висоти нерівностей поверхні проводити механічну обробку із зняттям шару до 0,5 мкм. Карбування ефективне для великих галтелей, тому що дозволяє одержувати на зміцнюваній поверхні значну глибину наклепаного шару, без великих статичних зусиль з використанням простих пристосувань.

Карбування підвищує опір втомним руйнуванням деталей за рахунок створення в надрізі сприятливих залишкових стискуючих напруг, які є головним фактором, що визначає ефективність зміцнення.

Велике значення має карбування на деталях, що піддаються цементації, азотизації та іншим процесам, що створюють твердий поверхневий шар, який насилу піддається чеканці після термічної обробки.

**Обробка механічними щітками.** Один із методів ППД, що забезпечує підвищення працездатності деталей машин і зварних конструкцій, є обробка поверхні механічними щітками. Обробка здійснюється з частковим видаленням поверхневого шару металу, що супроводжується пластичною деформацією поверхні. Для зміцнення щітками звичайно використовують універсальні металорізальні верстати. Як деформуючі елементи застосовується дротяний ворс, процес характеризується параметрами ворсу: матеріалом, вільним вильотом ворсу, діаметром дроту і силовим режимом - натягом, окружною швидкістю щітки, частотою обертання деталі. Оброблювані матеріали - сталі і сплави кольорових металів. Поверхнева твердість підвищується на 80-150%, глибина зміцненого шару досягає 50-100 мкм.

При уявній простоті процес обробки щітками є складним і значною мірою залежить від конструктивних особливостей інструменту і властивостей оброблюваного матеріалу.

**Відцентрова обробка** (ротаційна обробка інструментом ударної дії). Останнім часом у нашій країні і за рубежом набули поширення конструкції ротаційного інструменту ударної дії.

Особливістю роботи інструменту відцентрово-ударної дії є повна відсутність звичайного обкочування: ролики або кульки інструменту завдають удару по оброблюваній

поверхні, відразу відскакуючи від неї. Для створення необхідної енергії удару використовується відцентрова сила.

Конструктивно інструмент дуже простий і складається з диска з насадженим на нього сепаратором, в радіальних глухих пазах якого розміщені кульки. Найважливіша деталь інструменту - сепаратор. Він повинен бути виготовлений так, щоб кульки виступали з радіальних пазів на однакову висоту. Розміщення деформуючих елементів-кульок (роликів) буває однорядне, багаторядне, можливе гвинтове і шахове.

Під дією відцентрових сил, що виникають при обертанні інструменту, кульки, відтиснені відцентровою силою до периферії сепаратора, торкаються поверхні виробу.

Кульки на великій швидкості стикаються з оброблюваною поверхнею, здійснюючи динамічний наклеп і згладжування мікронерівностей.

Роторні дробоструминні установки широко використовуються у машинобудуванні, застосовуються для великої номенклатури виробів і володіють деякими перевагами перед іншими видами дробоударних установок.

### **3.3 Область раціонального застосування методів ППД, інструменти і робочі тіла**

І Обробляють ППД найбільш важконавантажені деталі машин і механізмів. Основні деталі можна згрупувати таким чином:

- деталі, що працюють в умовах знакозмінних навантажень (колінчасті вали, лопатки, шатуни, шестерні, пружини, піввісі, диски);

- деталі, що працюють в умовах високих швидкостей відносного переміщення і великого тиску (поршні, золотники, шпинделі);



- деталі, що працюють в умовах контактної-втомних напруг (бігові доріжки підшипників, хрестовини, опорні шийки).

- методами ППД ефективно зміцнюють деталі, що піддаються корозійно-втомній дії, кавітаційній дії та іншим видам і умовам навантаження.

2 Для усіх видів ППД матеріали для інструментів і робочих тіл повинні мати вищі фізико-механічні властивості, ніж матеріали оброблюваних деталей. Кулі і ролики, використовувані для ППД, виготовляють з підшипникових сталей ШХ15, ШХ15СГ, 18ХГТ, 20Х2Н4ВА. Для ударних інструментів застосовують сталі У10, У10А, Р6АМ5, Р6М5К5.

Інструмент для поверхневого дорнування виготовляють із твердих сплавів ВК6, ВК8, ВК15, ВК25. Для виготовлення вигладжувачів використовують природні й синтетичні алмази. Для обробки дробом і вібраційної ударної обробки використовують сталеві і скляні кулі, дріб різної granulacji, виготовлений з вибіленого чавуну.

#### **4 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ І ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

Для проведення лабораторної роботи використовуються токарний верстат моделі 1М62 і однокульовий пристрій обкату прямої дії з пружним підтисканням кулі, що деформується (рис.2).

4.1 Лабораторна робота проводиться групами по 5-6 осіб.

Завдання на проведення лабораторної роботи видає викладач, повідомляючи студентам марку сталі, оброблюваної заготовки та умови попередньої її термообробки.

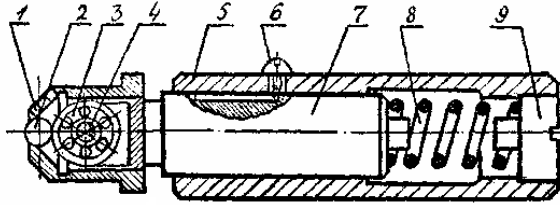


Рисунок 2 – однокульовий пристрій обкату: 1 – сепаратор; 2 – куля; 3 – шарикопідшипник; 4 – вісь; 5 – корпус; 6 – упор; 7 – шток; 8 – пружина; 9 – гвинт

4.1.1 **Перша група** проводить роботу за таким режимом:

$$S - \text{const} = 0,5 \text{ мм/об}$$

$$P - \text{const} = 2 \text{ кг/мм}^2$$

$$V_{1,2,3} = 710; 560; 224 \text{ об/хв.}$$

4.1.2 **Друга група** проводить лабораторну роботу за таким режимом:

$$S - \text{const} = 0,5 \text{ мм/об}$$

$$V - \text{const} = 224 \text{ об/хв}$$

$$P_{1,2,3} = 2; 4; 6 \text{ кг/мм}^2.$$

4.1.3 **Третя група** проводить лабораторну роботу за таким режимом:

$$S_{1,2,3} = 0,1; 0,5; 1,0 \text{ мм/об.}$$

## 4.2 Результати експерименту занести до таблиці

| Марка сталі  | Режими обробки |   |   | Твердість HRB |               | Різниця значень твердості |
|--------------|----------------|---|---|---------------|---------------|---------------------------|
|              | S              | P | V | до обробки    | після обробки |                           |
| 1 До обробки |                |   |   |               |               |                           |
| 2 Після ППД  |                |   |   |               |               |                           |

4.3 За результатами експерименту побудувати графіки таких залежностей:

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| HRB | HRB | HRB |
|     | 98  |     |

4.4 Оформити короткий письмовий звіт з лабораторної роботи і пройти тестовий контроль.

### 5 ПИТАННЯ ДЛЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ

1 У чому полягає сутність процесу поверхневої пластичної деформації?

2 У чому полягає ефект зміцнення поверхневою пластичною деформацією?

3 ППД підвищує поверхневу твердість виробу і сприяє...

4 Будь-яке спотворення кристалічних ґраток веде до ...

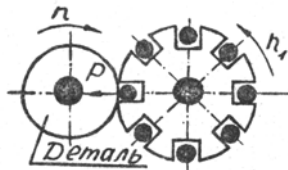
5 У кристалічних ґратках деформованого металу кількість недосконалості кристалічної будови  $\sim$  ...

6 Структура поверхнево-деформованого шару на металі називається...

7 Як обчислити ступінь пластичної деформації за стандартною формулою?

8 Які інструменти використовуються для поверхневої пластичної деформації?

9 Що за процес ППД зображений на схемі?



10 При ППД величина шорсткості поверхні зменшується  $\sim$  у... разів.

11 Довговічність деталей після пластичної деформації підвищується  $\sim u \dots$  разів.

12 Зносостійкість деталей підвищується  $\sim u \dots$  разів.

13 Які деталі можна піддавати поверхневому пластичному зміцненню?

14 Які матеріали використовуються для виготовлення інструментів ППД: роликів, куль, розкатників?

15 Які матеріали використовуються для виготовлення інструментів ППД ударної дії?

16 Які матеріали використовуються для виготовлення дробу?

17 Які матеріали, застосовуються для виготовлення дорна?

18 Чи використовують для виготовлення інструментів ППД алмази?

19 При яких питомих навантаженнях на оброблювану деталь найінтенсивніше зменшується шорсткість?

20 За яких умов експерименту вийшло максимальне зміцнення поверхні?

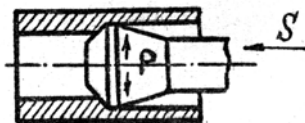
21 Як обчислити за формулою товщину наклепаного шару?

22 На яку глибину при ППД зміцнюється мікроструктура?

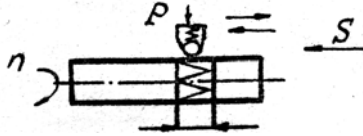
23 Вкажіть мікроструктуру деформованого зміцненого металу.

24 Які перелічені процеси дозволяють інтенсифікувати зміцнення?

25 Що за процес ППД зображений на схемі?



26 Що за процес ППД зображений на схемі?



27 Відповідно до ГОСТ 18296-72 методи пластичного поверхневого зміцнення і деформації підрозділяються на ...

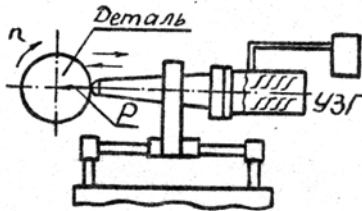
28 При яких режимах зміцнення при експерименті в лабораторії одержано мінімальне зміцнення?

29 Яка максимальна твердість поверхні одержана при експерименті в лабораторії ППД?

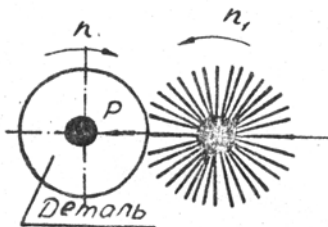
30 Назвіть комбіновані способи зміцнення ППД поверхні деталей машин.

31 Назвіть можливу недосконалість кристалічної будови, що виникають в поверхневих пластично деформованих шарах при ППД.

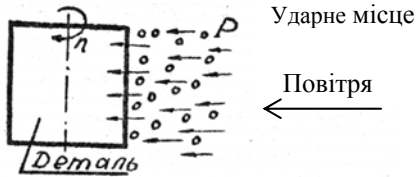
32 Що за процес ППУ зображений на схемі?



33 Що за процес ППУ зображений на схемі?



34 Що за процес ППУ зображений на схемі?



35 Скільки часу триває зміцнення розкочуванням деталей з внутрішнім діаметром  $\sim 40$  мм, завдовжки 200 мм?

36 При збільшенні тиску на інструмент при ППД шорсткість ...

37 Як впливає величина тертя на процес ППД?

38 Чим більше текстурована мікроструктура оброблюваної деталі, тим більше ...

39 При поверхневому пластичному зміцненні серцевина деталі стає...

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поляк И.С. Технология упрочнения. –М.: Машиностроение, 1995. Т.2. -685 с.

2. Термическая обработка в машиностроении: Справочник. //Лахтин Ю.М., Рахштадт А.Г. –М.: Машиностроение, 1980. -784 с.

3. Пчелинцев В.А., Капуста В.А., Лисин В.М. Методические указания к лабораторной работе «Отделка деталей поверхностей пластическим деформированием. –Сумы, Изд-во СумГУ, 1989.

Лабораторна робота 2

«Гартування деталей з нагріванням струмами  
високої частоти»  
(тривалість роботи - 6 год.)

## **1 МЕТА РОБОТИ**

1.1 Навчити студентів вибирати обладнання і пристосування для проведення гартування різних деталей відповідно до технічних вимог креслення як після об'ємного, так і після локального нагрівання.

1.2 Навчити вибирати режими і практично здійснювати гартування деталей загального призначення з нагріванням струмами високої частоти.

## **2 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, ПРИСТОСУВАННЯ, ІНСТРУМЕНТ**

- 2.1 Ламповий або машинний генератори.
- 2.2 Гартівні баки.
- 2.3 Індуктори, індуктори-спреєри.
- 2.4 Виробничі деталі і зразки для допотрібноження.
- 2.5 Заточувальний верстат для приготування макрошліфів.
- 2.6 Твердоміри: ТК, ПМТЗ, ТП.
- 2.7 Шліфувально-полірувальні верстати для виготовлення мікрошліфів.
- 2.8. Спиртні розчини протравлювачів загартованого шару.
- 2.9 Гігроскопічна вата і фільтрувальний папір.

## **3 ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ**

При поверхневому гартуванні нагріваються й охолоджуються тільки поверхневі шари деталі, змінюється структура цих шарів, а структура серцевини залишається без змін. У результаті такої термообробки ми одержуємо деталь, у якої поверхневі шари дуже тверді, а серцевина - пластична і в'язка. Це основна перевага поверхневого гартування у порівнянні з гартуванням при крізному нагріванні (завдяки пластичній серцевині зменшується крихкість деталі). Необхідно відзначити й інші переваги. При цьому способі гартування поверхні деталі майже не окислюється, оскільки процес йде дуже швидко і значно знижується деформація деталі, нагріваються й охолоджуються тільки зовнішні шари.

Нагрівання при поверхневому гартуванні може проводитися різними способами: струмами високої і промислової частоти, газовим полум'ям (як правило, ацетиленокисневим), в електроді й контактним електронагріванням.

Застосування нагрівання струмами високої частоти (СВЧ) для термічної обробки деталей - це один із найпрогресивніших методів нагрівання і в даний час широко впроваджується при масовому виробництві виробів.

На деяких передових промислових підприємствах до 60% всіх поверхнево зміцнюваних деталей піддаються високочастотному гартуванню.

Високочастотне нагрівання засноване на такому: якщо через соленоїд пропустити електричний струм, то усередині нього утворюється змінне електромагнітне поле; якщо у це електромагнітне поле помістити металевий предмет, то на його поверхні індуються вихрові струми (струми Фуко), що викликають нагрівання деталі. Це подано на рис.1.



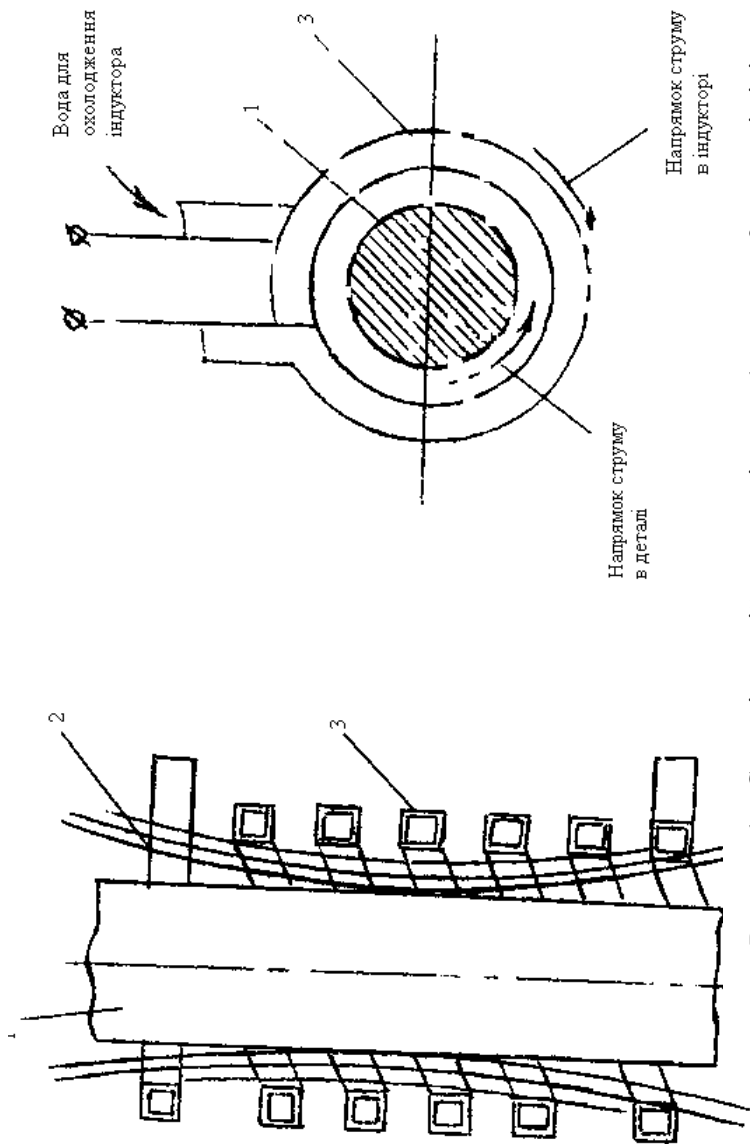


Рисунок 1 – Схема індукційного нагрівання: 1 – деталь; 2 – силові лінії електромагнітного поля; 3 – індуктор

Характерним є розподіл струмів по перетину провідника (деталі). Щільність протікаючого змінного струму значно більша біля поверхні, ніж у внутрішніх шарах провідника (рис. 2). Такий нерівномірний розподіл змінного струму у провіднику називається поверхневим ефектом (скін-ефектом).

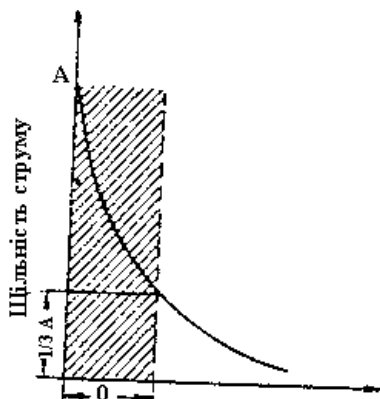


Рисунок 2 - Графік розподілу щільності змінного струму по провіднику

Завдяки цьому ефекту нагрівання деталі відбувається з поверхні на певну глибину.

Щільністю струму в глибоко розміщених шарах деталі нехтують; вважають, що ця частина провідника ніби вільна від струму. Це обмеження стосується до тих шарів провідника, в яких щільність струму знижується приблизно втричі в порівнянні з щільністю струму на поверхні провідника. Для практичних цілей умовно вважається, що змінний струм йде не з нерівномірною, а з однаковою щільністю по шару провідника певної глибини. Цей шар називається глибиною проникнення струму  $\delta$ . Такий умовний розподіл щільності струму доцільний для практичних цілей у зв'язку з тим, що на умовній глибині проникнення струму виділяється близько 90% усього тепла, що виділяється вихровими струмами.

Соленоїд у цьому випадку називають **індуктором**.

Глибина проникнення струму в деталь, що нагрівається, залежить від частоти струму в індукторі і виражається такою формулою:

$$P = 5,03 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ мм,}$$

для середньовуглецевої і малолегованої сталі при  $20^0$

$$P_{Fe\alpha} = \frac{17}{\sqrt{f}} \text{ мм,}$$

де  $P$  - глибина проникнення струму в деталь, що нагрівається, мм;  $f$  - частота струму в індукторі, Гц;  $\rho$  - питомий електроопір металу, що нагрівається, Ом · мм<sup>2</sup>/м;  $\mu$  - магнітна його проникність, гс/е.

Отже, глибина проникнення струму в деталь залежить ще і від хімічного складу сталі, з якої вона виготовлена.

Чим вище частота струму, тим менше його проникнення у глибину деталі (рис.3).

Різка різниця в глибині проникнення струму спостерігається в сталі при нагріванні до температури, коли вона втрачає магнітні властивості ( $\mu$  різко падає). Такою температурою є температура  $768^0\text{C}$  (точка  $A_2$ ).

У таблиці 1 наведені дані по глибині проникнення струму в метал, що нагрівається, залежно від частоти струму в індукторі. У таблиці 2 наведений вибір частоти струму для отримання необхідної глибини проникнення.

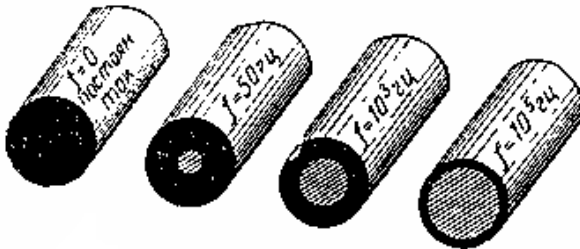


Рисунок 3 – Схема зміни глибини проникнення струму в провідник залежно від частоти струму

Таблиця 1 - Глибина проникнення у метал, що нагрівається

| Частота струму, Гц | Глибина проникнення р, мм |      |              |
|--------------------|---------------------------|------|--------------|
|                    | Сталь 45                  |      | Червона Мідь |
|                    | 20°                       | 850° | 20°          |
| 50                 | 3,2                       | 90   | 10           |
| 2000               | 0,5                       | 14   | 1,6          |
| 10000              | 0,2                       | 6,5  | 0,7          |
| 200000             | 0,05                      | 1,4  | 0,16         |
| 1000000            | 0,02                      | 0,6  | 0,08         |

Таблиця 2 - Вибір частоти струму

| Частота струму, Гц | Глибина гартування, мм | Найменший економічно вигідний діаметр виробу, мм |
|--------------------|------------------------|--|
| 1000               | 3,5-20                 | 44   |
| 2000               | 2,3-15                 | 32   |
| 8000               | 1,2-8                  | 16   |
| 200000             | 0,3-1,5                | 3  |

При виборі частоти струму, крім глибини шару, що нагрівається, необхідно враховувати форму і розміри деталі, що нагрівається, і прагнути до отримання найбільшого електричного к.к.д. індуктора і зниження питомих втрат у ньому, а отже, і до підвищення к.к.д. всієї установки. Тільки правильний вибір частоти в певних межах забезпечує рентабельність і високу якість поверхневого гартування. Застосування високих частот для гартування товстих шарів і, навпаки, невисоких частот для гартування дуже тонких шарів знижує якість деталей і рентабельність процесу нагрівання. Чим вище частота, тим менше глибина прогрівання і менше діаметр деталі, економічно вигідний для гартування.

### 3.1 Мікроструктура і властивості сталей після гартування з нагріванням СВЧ

Забезпечення високих механічних властивостей, поєднання високої твердості, міцності і пластичності деталі залежить від глибини загартованого і перехідного шарів. Для деталей невеликого розміру (діаметром 10-20 мм) рекомендується, щоб глибина загартованого шару дорівнювала

~20% від радіуса, для товстих деталей ~10% від радіуса. Перехідний шар бажано мати розміром 25-30% від глибини загартованого шару. Чим більша деталь, тим більша повинна бути глибина загартованого шару.

Швидкість нагрівання при високочастотному гартуванні дуже велика, а час нагрівання – дуже малий (декілька хвилин). Тому для завершення перетворень у сталі деталі потрібно нагрівати до вищих температур, ніж нормальна температура гартування при нагріванні в печах. Чим більше у сталі вуглецю, тобто чим менший надлишковий ферит, тим менший вплив швидкості нагрівання на температуру гартування.

Температура високочастотного гартування залежить не лише від хімічного складу сталі, але й від вихідної структури і швидкості нагрівання. Вихідна структура сталі може бути різною: вона залежить від того, якій попередній термічній обробці піддавалася сталь - відпалу, нормалізації або поліпшенню. На рис. 5 наведені інтервали оптимальних температур високочастотного гартування сталі 50 залежно від швидкості нагрівання і вихідної структури. Найвужчий інтервал оптимальних температур високочастотного гартування – для відпаленої сталі; найширший – для поліпшеної. Розширюється цей інтервал головним чином за рахунок пониження його нижньої межі. Це пояснюється тим, що у відпаленій сталі зерно більше, ніж у нормалізованих, а у поліпшеній сталі зерно дрібніше. Чим більше зерно, тим вища температура – необхідна для утворення структури аустеніту. Тому деталі з середньовуглецевих конструкційних сталей перед гартуванням струмами високої частоти повинні заздалегідь піддаватися нормалізації або поліпшенню.

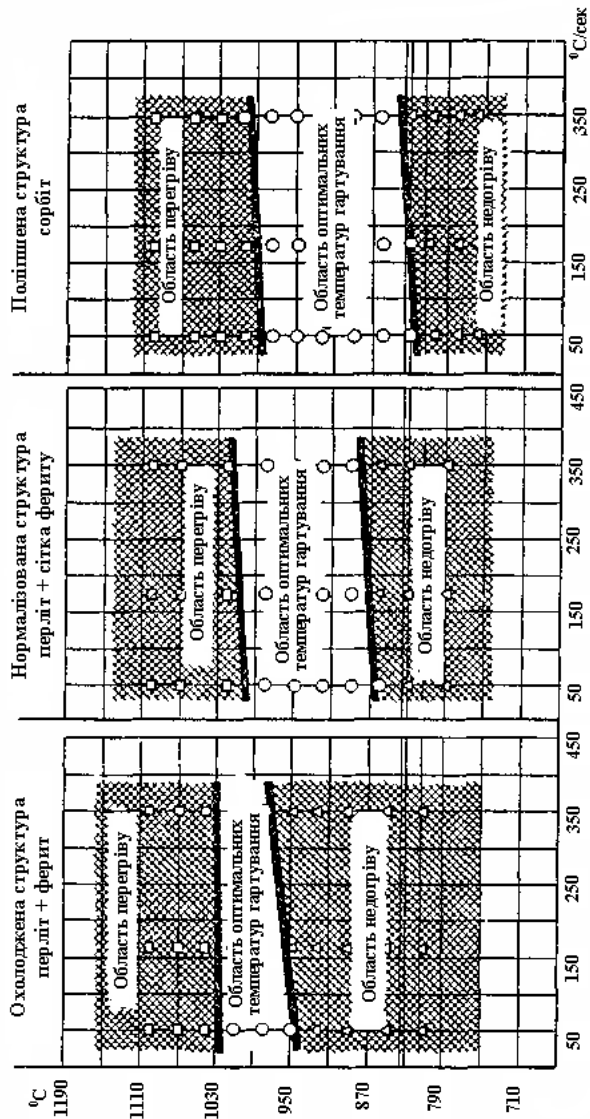


Рисунок 5 - Інтервали оптимальних температур високочастотного гартування сталі 50 залежно від швидкості нагрівання і вихідної структури

Порівняно зі звичайним гартуванням гартування струмами високої частоти додає сталі вищу твердість (на 2-3 одиниці HRC) і міцність при відносно меншому пониженні в'язкості вища за межу втоми.

Ці переваги обумовлені такими причинами:

1 Подрібненням зерен аустеніту. Зі збільшенням швидкості нагрівання (з підвищенням ступеня перенагрівання) різко зростає число центрів перліто-аустенітного перетворення. Так, при перенагріванні у  $17^{\circ}\text{C}$  чисел центрів  $2300 \frac{1}{\text{мм}^3\text{с}}$ , а при перенагріванні у  $77^{\circ}\text{C}$  чисел центрів  $6000000 \frac{1}{\text{мм}^3\text{с}}$ . Тому утворюється дуже дрібне початкове зерно аустеніту (у зв'язку з відсутністю витримки при температурі гартування зростання зерна не відбувається).

2 Концентраційною неоднорідністю аустеніту, а після охолодження – мартенситу. Навіть при нагріванні до дуже високих температур аустеніт не виходить однорідним за концентрацією. Це пояснюється тим, що при швидкому нагріванні обмежуються дифузійні процеси, необхідні для отримання однорідного аустеніту. Наприклад, при нагріванні сталі 20 із швидкістю  $130^{\circ}\text{ мм/с}$  до температури  $300^{\circ}\text{C}$  аустенітів колишніх перлітових ділянок містить 0,45% С, а аустеніт колишніх феритних ділянок – 0,1% С.

Підвищення межі втоми сталі після високочастотного гартування пов'язане з розподілом залишкових напруг (рис. 6). У загартованому шарі є залишкові напруги стиснення, а за межами загартованого шару – напруги розтягування. Причиною втомних руйнувань є тільки розтягуючі напруги. Під час роботи деталі напруги стиснення послаблять розтягуючі (руйнуючі) напруги, що виникають у результаті дії зовнішніх сил. Тому після високочастотного гартування втомна міцність підвищується.

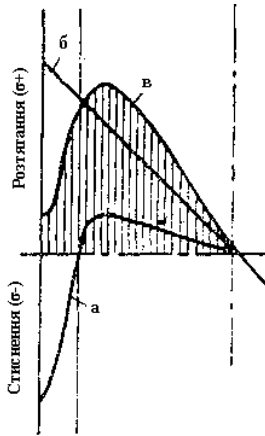


Рисунок 6 – Схема зміни напруженого стану зовнішнього шару при високочастотному гартуванні: а - розподіл залишкових напруг після поверхневого гартування; б – розподіл напруг, спричинених згинаючим моментом; в – результуюча епіюра напруг

Мікроструктура доєвтектоїдної сталі після високочастотного гартування характеризується таким розподілом структурних складових (від периферії до центра): мартенсит (загартований шар), мартенсит і ферит (перехідний шар), ферит і перліт (початкова структура) (рис. 7). Наявність у перехідному шарі фериту вказує на нижчу температуру в цій зоні, при якій частина надмірного фериту не перетворилася на аустеніт.

Структура перехідного шару заєвтектоїдної сталі - мартенсит і перліт.

Мартенсит у сталі після високочастотного гартування має безгольчасту або дуже дрібногольчасту будову.

При нагріванні струмами високої частоти утворюється неоднорідний аустеніт. Процес його розпаду при охолодженні відрізняється від процесу розпаду однорідного аустеніту, що утворюється при повільному нагріванні. Розглянемо цей процес.



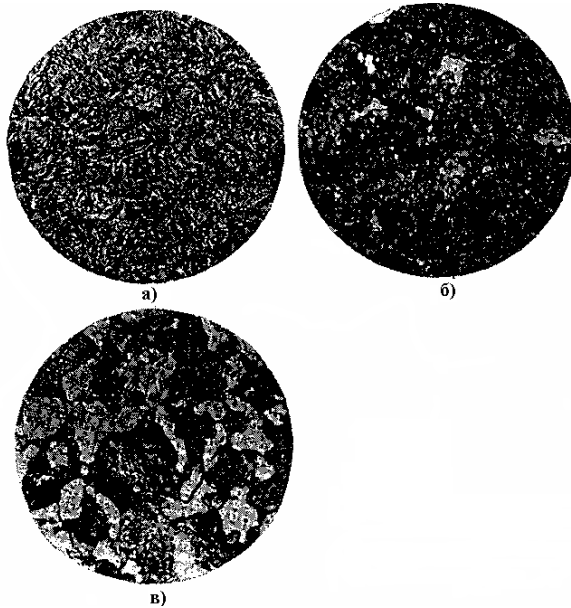


Рисунок 7 - Мікроструктура доевтектоїдної сталі, загартованої при нагріванні струмами високої частоти: а - загартований шар – мартенсит; б – перехідний шар – мартенсит і ферит; в – серцевина – ферит і перліт X500

При охолоджуванні неоднорідного аустеніту мікрооб'єми, що мають різну концентрацію вуглецю, перетворюватимуться на мартенсит при різних температурах відповідно до температури мартенситного перетворення (точка  $M_n$ ) для даної концентрації вуглецю. Мікрооб'єми з меншою концентрацією вуглецю перетворюватимуться на мартенсит при вищій температурі, а мікрооб'єми з більшою концентрацією вуглецю – при нижчій температурі. Мартенсит, що утворився з мікрооб'ємів аустеніту з пониженим вмістом вуглецю, при подальшому охолоджуванні розпадатиметься з утворенням дрібнодисперсної ферито-цементитної суміші. Таким чином, у результаті високочастотного гартування виходить змішана структура мартенситу і дрібнодисперсної ферито-цементитної суміші.

Для того щоб при нагріванні струмами високої частоти одержати структуру аустеніту в шарі невеликої товщини (1-2 мм) і щоб в решті перетину деталі температура була нижче критичної, нагрівання необхідно вести дуже швидко, протягом 1-2 с. При такому короткочасному нагріванні, наприклад, в нормалізованій сталі 45 не вдається одержати аустеніт без фериту: після гартування в загартованому шарі – структура мартенсит + ферит. Щоб здійснити повне гартування шару малої глибини, деталі заздалегідь піддають поліпшенню для отримання дрібнодисперсної феритоцементитної суміші (сорбіту), при нагріванні найшвидше перетворюється на аустеніт. Необхідність поліпшення для таких деталей – це недолік.

Крім цього, недоліком є також і те, що необхідна велика питома потужність (до 1,5-2,0 кВт/см<sup>2</sup>) поверхні, що нагрівається, для чого потрібні генератори великої потужності.

Цих вад можна уникнути, застосовуючи спеціальні сталі із зниженою прогартовуваністю. Зниження прогартовуваності в цих сталях досягається зменшенням вмісту в них марганцю (менше 0,2%), кремнію (менше 0,3%), хрому (менше 0,15%).

Як приклад можна навести сталь 55ПП.

Коли застосовують такого типу сталі, то проводять кризне нагрівання до температури гартування всієї ділянки при невеликій питомій потужності (0,1-0,5 кВт/см<sup>2</sup>) і за порівняно тривалий час (20-50 хв), забезпечують утворення аустеніту навіть у сталі, що не піддавалася попередньому поліпшенню.

Після нагрівання під гартування охолодження проводиться водою. Завдяки низькій прогартовуваності цієї сталі шар високої твердості (HRC 60-62) має невелику глибину (1-2 мм), а в серцевині твердість становить HRC 30-40.

Міцність виробів зі сталі зі зниженою прогартовуваністю після поверхневого гартування при глибинному нагріванні виходить рівною.

Після високочастотного гартування деталі піддаються низькотемпературному відпуску з нагріванням у печі. Як було зазначено вище, у результаті високочастотного гартування утворюється структура мартенситу і дрібнодисперсної ферито-цементитної суміші, тобто структура ближча до відпущеного стану в порівнянні зі структурою сталі після звичайного гартування. Тому відпуск після високочастотного гартування потрібно проводити при нижчій температурі і при меншій витримці. Крім відпуску в печі, з успіхом можна проводити самовідпуск. При високочастотному гартуванні з самовідпуском охолодження після нагрівання проводиться не повністю, а переривається з таким розрахунком, щоб за рахунок тепла, що збереглося, відбувся відпуск загартованого шару. Необхідно враховувати, що температура самовідпуску, порівняно з температурою звичайного відпуску, повинна бути вищою (на 75-85°C при температурах відпуску до 300°C і на 100-125°C при вищих температурах).

Якість індукторів при нагріванні струмами високої частоти більшою мірою залежить від конструкції індуктора, правильної його установки і від відстані між індуктором і деталлю, що нагрівається.

### **Індуктори і пристосування**

Індуктори звичайно виготовляються з мідних трубок, по яких з метою охолодження циркулює вода. Виготовляються також індуктори, в яких частина, що нагрівається комбінується з охолоджувальним (душовим) пристроєм (спреєром). Внутрішня поверхня таких індукторів має отвори, через які на нагріту деталь надходить охолоджувальна рідина.

Для рівномірного нагрівання необхідно, щоб відстань від індуктора до деталі була в усіх точках однаковою. Як

правило зазор між індуктором і деталлю, що нагрівається, становить 1,5-3 мм.

Циліндрові деталі, наприклад, рівномірно нагріваються завдяки обертанню в індукторі.

Для кожного типу деталі виготовляється окремий індуктор, конфігурація якого відповідає формі гартованої деталі.

У одному і тому самому індукторі не можна гартувати різні не тільки за формою, але і за розміром деталі.

Найпоширеніші конструкції одно- і багатовиткових індукторів показані на рис. 8.

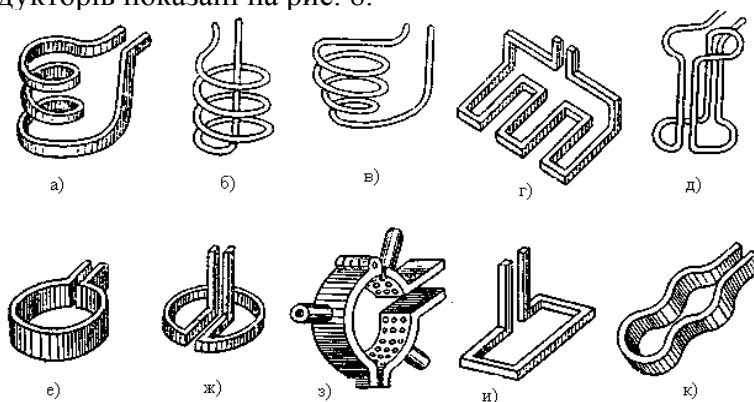


Рисунок 8 – Індуктори для нагрівання: а – зовнішніх поверхонь циліндрових виробів; б – внутрішніх поверхонь циліндрових виробів; в – зовнішніх поверхонь конічних виробів; г – плит і площин методом переміщення; д – одночасно бокових поверхонь і торців циліндрових виробів при обертанні їх навколо вертикальної осі; е – зовнішніх поверхонь циліндрових виробів; ж – внутрішніх поверхонь циліндрових виробів; з – шийок колінчастих валів; і – скоб складної форми і плит методом переміщення; д – одного зуба зубчастого колеса при послідовному гартуванні - «зуб за зубом»

Для гартування валів інколи застосовують роз'ємні індуктори (рис. 9). Для гартування внутрішніх поверхонь – індуктори з магнітопроводом (рис. 10).

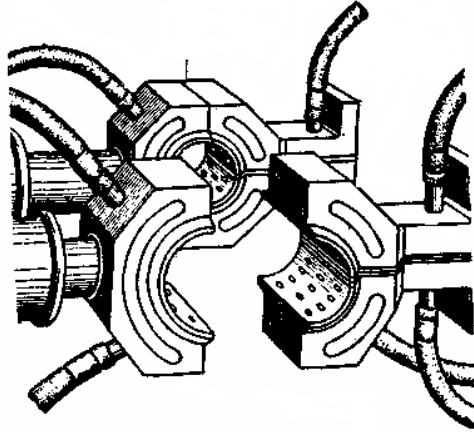


Рисунок 9 - Роз'ємні гартівні індуктори для гартування шийок колінчастого валу

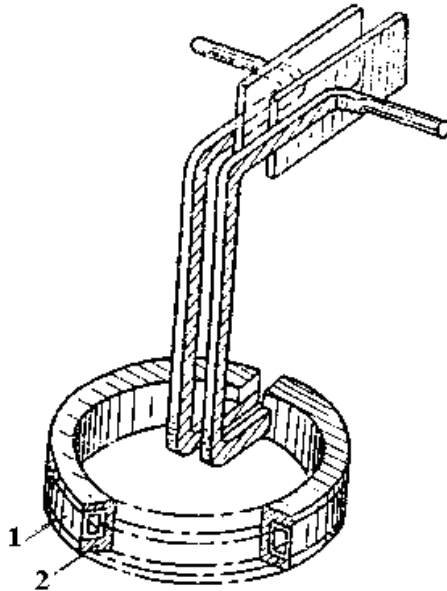


Рисунок 10 - Схема конструкції індуктора з магнітопроводом з магнітодіелектрика для гартування внутрішніх циліндричних поверхонь: 1 – активна частина індуктора; 2 – магнітопровід

Звичайні індуктори мають низький к. к. д. (70-80%) внаслідок розсіяння електромагнітного поля. Зменшення потоку розсіяння і концентрація електромагнітного поля в потрібному напрямі досягаються застосуванням індукторів з магнітопроводом.

За наявності магнітопроводу (рис. 10), з трьох боків, що охоплюють активну частину індуктора 2, відбувається концентрація магнітного поля між індуктором і поверхнею, що нагрівається, щільність струму зміщується у бік отвору паза магнітопроводу, що за своєю дією еквівалентно наближенню активної частини індуктора до поверхні, що нагрівається. При цьому різко зростає к. к. д. індуктора. Магнітопроводи у вигляді пакета, набраного з тонких (0,2 мм), ізолюваних один від одного листів трансформаторної сталі, придатні для індукторів, що працюють при частотах до 10000 Гц. Під час роботи на великих частотах такий магнітопровід не придатний, тому що швидко нагрівається. Щоб у процесі нагрівання на великих частотах магнітопровід мало нагрівався, його виготовляють з матеріалів, що мають при таких частотах малі втрати на гістерезис і вихрові струми.

Такими матеріалами є магнітодіелектрики і нові матеріали – оксифери (ферити).

Магнітодіелектриками є порошок магнітно-м'якого матеріалу, змішаний і спресований з ізолювальною речовиною (діелектриком), наприклад, бакелітом, нітролаком, полістиролом та ін.

Як матеріал для магнітодіелектриків застосовуються:

- карбонільне залізо невідновлене;
- карбонільне залізо відновлене, наприклад відпалене в атмосфері водню;
- альсифери – залізо-кремній-алюмінієві сплави;
- оксифери (ферити) – порошок оксидів металів, змішаний, спресований і спечений при 1100-1400°C.

У виробничих умовах якнайкращі результати виходять при використуванні магнітопроводів, виготовлених з карбонільного заліза (відновленого) і з оксиферів.

Як приклад на рис. 11 а наведена конструкція типового індуктора з магнітопроводом із магнітодіелектриків для гартування зовнішніх циліндрих поверхонь.

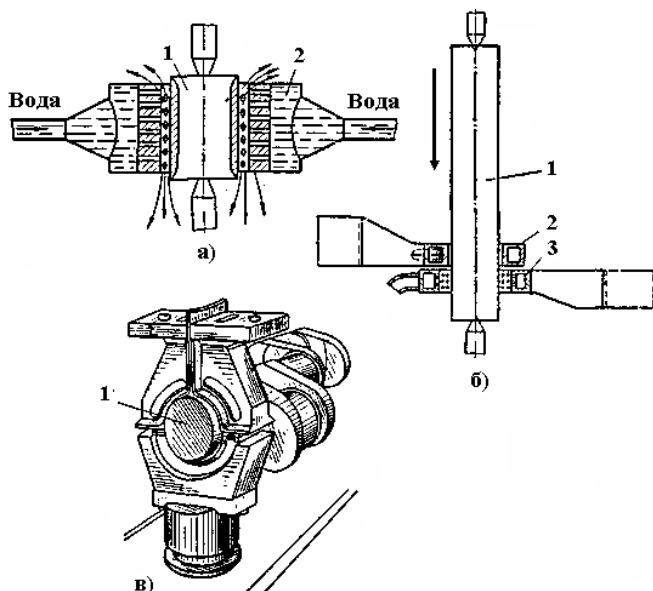


Рисунок 11 Схеми способів високочастотного гартування:  
а – одночасний; б – безперервно-потрібноувний; в – потрібноувний

### 3.2 Способи високочастотного гартування

**Високочастотне гартування проводиться різними способами залежно від розміру і форми деталі та вимог, що ставляться до неї.**

При гартуванні невеликих деталей застосовується нагрівання і вслід за цим охолодження всієї поверхні. Деталь (рис. 11 а) поміщається в індуктор 2 і відразу нагріва-

ється, а потім охолоджується вся поверхня, що підлягає обробці. Найбільше поширення має душеве охолодження. Для цього на внутрішній поверхні індуктора є численні отвори, через які після закінчення нагрівання на нагріту поверхню надходить вода або емульсія.

Гартування деталей значної довжини проводиться безперервно-послідовним способом. Деталь (рис. 11 б) встановлюється в центрах і для рівномірності нагрівання безперервно обертається з певною швидкістю. Гартування проходить при вертикальному переміщенні деталі 1 зверху вниз (звичайне з швидкістю від 0,3 до 3 см/с). При такому переміщенні в магнітне поле індуктора 2 послідовно надходять одна ділянка деталі за іншою і нагріваються до температури гартування. Під індуктором розміщений охолоджувальний пристрій 3, що є зігнутою кільцем трубкою з численними отворами на внутрішній поверхні, через які на нагріті ділянки деталі надходить вода у вигляді душу. Таким чином, безперервно-послідовно нагрівається й охолоджується вся поверхня деталі.

Якщо необхідно загартувати окремі частини деталі, то доцільно застосовувати спосіб послідовного гартування, при якому оброблювана поверхня нагрівається й охолоджується по частинах, наприклад послідовне гартування кожної шийки колінчастого валу 1 (рис. 11 в), кожного кулачка розподільного валу, кожного зуба багатомодульного зубчастого колеса і т.п.

Для точної установки деталі в індукторі і забезпечення визначеного й однакового нагрівання та охолодження кожної деталі, що нагрівається, від чого залежить якість високо- частотного гартування, застосовуються спеціальні пристосування, установки, верстати-автомати і напівавтомати різних конструкцій.



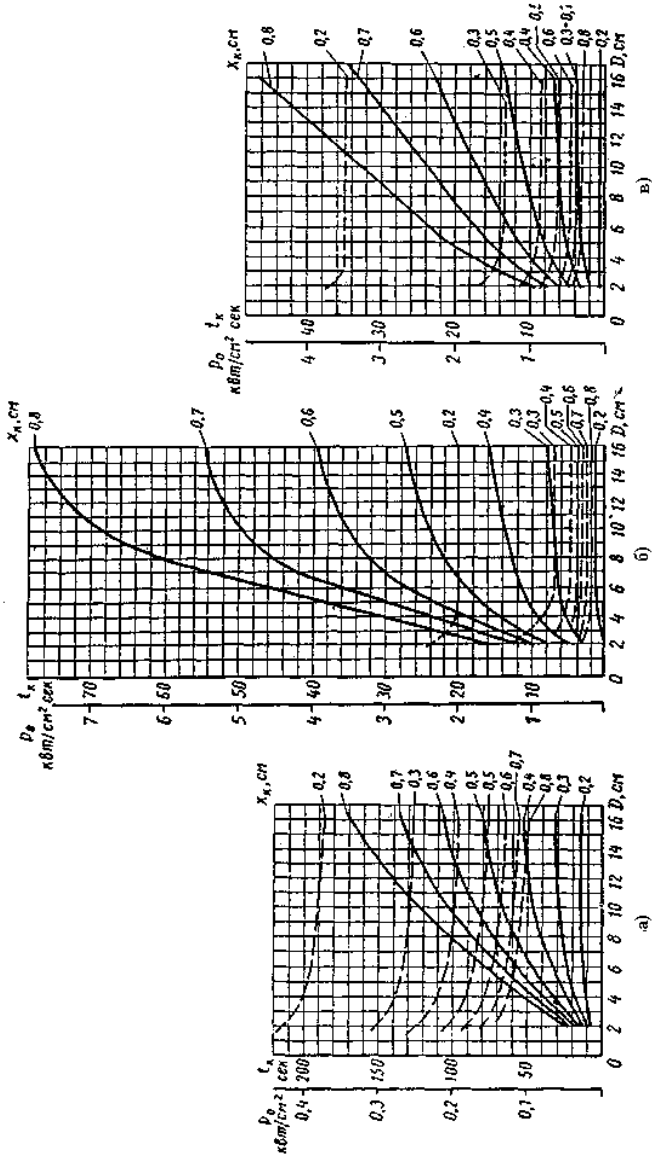


Рисунок 12 – Графіки залежності часу нагрівання  $t_k$  (суцільні лінії) та сполучної деталі питомої потужності  $P_0$  (пунктирні лінії) від діаметра  $D$  циліндра, що нагрівається для різних глибин загартованого шару  $X_k$  при різних частотах: а – 250000 Гц; б – 8000 Гц; в – 2500 Гц

Режим високочастотного нагрівання визначається частотою струму, питомою потужністю, що повідомляється виробу і часом нагрівання.

Для визначення режимів нагрівання при поверхневому гартуванні можна користуватися графіками, наведеними на рис. 12, що відображають залежність часу нагрівання і сполученої деталі питомої потужності  $P_0$  від діаметра деталі, що нагрівається для різних глибин загартованого шару при частотах струму 250000, 8000 і 2500 Гц.

За графіком знаходимо, що для отримання загартованого шару 0,4 см на валу діаметром 6 см необхідне нагрівання протягом 5,5-6,0 хв при питомій потужності, що передається на виріб,  $P_0 = 0,9$  кВт/см<sup>2</sup>.

Одержувані дані лише орієнтовні, за ними проводиться гартування декількох дослідних деталей, після аналізу яких режим нагрівання може бути установлений більш точно.

### **3.3 Поверхнєве гартування при нагріванні струмами промислової частоти**

**Струм промислової частоти (50 Гц) застосовується для крізного нагрівання виробів діаметром більше 150 мм. Перевагами установок для нагрівання струмами промислової частоти (с. п. ч.) є простота пристрою, надійність в експлуатації, високий к. к. д. (до 90%). Недоліки – велике розсіювання магнітного потоку і малий коефіцієнт потужності.**

Для підвищення коефіцієнта потужності при нагріванні порожнистих виробів потрібно всередину виробів ввести залізний сердечник. Тому найбільш доцільно нагрівати с.п.ч. труби і кільця.

На рис. 13 наведена схема установки для нагрівання труб с. п. ч. Труба 1 поміщається між середнім сердечни-

ком 2 і нагрівальною котушкою 3. Після нагрівання яромо 4, утримуване клямкою 5, відкидається (показано пунктиром), і труба падає в гартівний бак. Для завантаження нової труби установка повертається (у підшипниках 6).

Ця установка (із сердечником) не дозволяє здійснювати потоковий рух труб (або кілець) через індуктор. Це звужує область застосування таких установок.

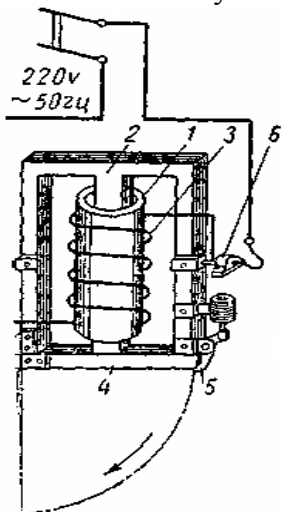


Рисунок 13 - Схема пристрою для індукційного нагрівання труб

Нагрівання виробів с. п. ч. доцільно поєднувати з нагріванням у печі. Спочатку вироби (наприклад, кільця) нагріваються в індукційній установці струмами промислової частоти, а потім витримуються в електропечі опору. При такому нагріванні в порівнянні з нагріванням лише в електропечі опору питома витрата електроенергії скорочується. У цьому випадку нагрівання с.п.ч. проводиться без застосування залізного сердечника, що дозволяє здійснити потоковий рух кілець через індуктор і повністю автоматизувати технологічний процес термічної обробки виробів.

### **3.4 Техніка безпеки під час роботи на високочастотних установках**

Високочастотні установки повинні бути забезпечені конструктивними огорожами з механічним або електричним блокуванням, що забезпечує неможливість дотику до частин установок, що знаходяться під напругою.

У приміщеннях з діючими високочастотними установками повинна бути передбачена штучна вентиляція, а також нормальні метеорологічні й гігієнічні умови для роботи обслуговуючого персоналу, відповідні санітарним нормам.

Розміри робочих місць визначаються умовами технологічного процесу і розмірами оброблюваних виробів. При цьому ширина робочих місць у щитів управління повинна бути не менше 1,2 м, а у нагрівальних пристроїв – не менше 0,8 м.

Високочастотні установки повинні обслуговуватися черговими електромонтерами, що здійснюють їх налаштування і спостереження за їх станом та режимом роботи, і термістами, що виконують безпосередньо технологічні операції.

Оперативні дії терміста зводяться до вмикання і вимикання установки. Проводити які-небудь інші дії з експлуатації установки термісту не дозволяється.

При нагріванні деталей вагою більше 10 кг у гартівної установки повинне бути передбачене підйомне пристосування або спеціальний завантажувально-розвантажувальний пристрій у індуктора для установки і зняття деталей. При нагріванні дрібних деталей необхідно передбачити пристосування для їх зручної установки і зняття.

Зміну індуктора і регулювання подачі оброблюваних виробів гідропідйомником потрібно проводити при знятому напруженні.

До початку роботи на установці необхідно перевіряти стан всіх її заземлюючих проводів і блокування.

Обслуговуючий персонал високочастотної установки зобов'язаний негайно вимкнути її у випадках, передбачених місцевою інструкцією, а також при нещасному випадку, виявленні несправностей, пожежі і стихійних бідах.

Працювати потрібно у захисних окулярах і гумових рукавичках, стоячи на гумовому килимку.

Інструмент, вживаний термістом для утримання деталей, що нагріваються, повинен мати рукоятки, ізольовані по довжині захоплення. Кліщі та інші пристосування для перенесення нагрітих виробів повинні відповідати розміру і профілю утримуваних виробів. Рукоятки інструменту, вживаного для ручного завантаження виробів у піч, вивантаження їх з печі, повинні бути такої довжини, щоб руки робітників не піддавалися дії високої температури.

### **3.5 Практичне застосування високочастотного гартування**

Гартування з нагріванням СВЧ в основному використовується для деталей, що працюють на знос або зазнають знакозмінних навантажень. Наприклад: опорні шийки валів, шийки колінчастих валів, гільзи циліндрів, чавунні напрямні верстатів, різні колонки, пальці гусениць тракторів, торці штовхачів, гальмові куркульки, вилки перемикачів, зуби шестерень, металорізальний і деревообробний інструмент та ін.

Дуже часто нагрівання СВЧ використовується при локальній обробці тих частин деталей, що іншими методами нагрівання неможливо.

Для високочастотного гартування широко застосовуються вуглецеві або низьколеговані сталі із вмістом до 0,42% вуглецю: сталь 45, 40Х, 40ХН, 42Г2, 40Г, 40ХНМ,

або сталі зниженої прогартовуваності типу 55ПП, які використовують замість високолегованих сталей. З успіхом піддаються гартуванню з нагріванням СВЧ чавуну сірих, ковкий, високоміцний з перлітовою металевою основою.

Вибір найбільш відповідної температури нагрівання при високочастотному гартуванні, при відповідній швидкості нагрівання для даної сталі, як правило, проводиться досвідченим шляхом. У зв'язку з високою швидкістю нагрівання і особливістю фазових перетворень у сталі при цьому вони не встигають пройти при нагріванні деталей для гартування до звичних стандартних температур. **Тому температура гартування при нагріванні СВЧ повинна бути вищою критичної на 100-1500.** Наприклад, точка  $A_1$  для сталі У8 7270, отже, температура гартування з нагріванням СВЧ для цієї сталі  $727+(^{100-150})$ , тобто  $\sim 830-880^0$ . **Час нагрівання і витримки** обчислюється секундами і так само підбирається експериментально. У результаті високочастотного гартування виходить надзвичайно дрібнозернистий мартенсит з малопомітною голчастою, який іноді називають приховано-кристалічним, або безгольчастим, безструктурним мартенситом. Гартівними середовищами є стандартні охолоджувачі: вода, масло, емульсії. При гартуванні спреєрами – вода або емульсія.

Мартенсит сталей, що містять вуглецю 0,4-0,5%, при високочастотному гартуванні отримує твердість HRC 54-60, що на 3-5 HRC вищий, ніж при звичайному гартуванні.

Оптимальною глибиною гартування з урахуванням припусків під шліфування вважають 4-5 мм за контуром деталі. Без урахування подальшої операції шліфування - 2-3 мм.

Після гартування для зняття внутрішніх напруг деталі піддають низькому відпуску при температурах 150-2000. Крім звичайного відпуску можна застосовувати саме відпуск за рахунок залишкового тепла деталі, тобто охоло-

джування деталі в гартівному середовищі переривається з таким розрахунком, щоб тепло, що залишилося у виробі, виробило необхідний відпуск.

Деякі приклади промислового використання локального зміцнення деталей подані на рис. 14, 15, 16, 17.

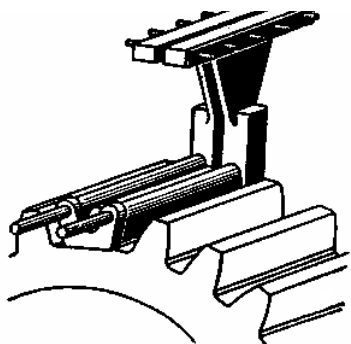


Рисунок 14 – Струмонесячий провід індуктора, зігнутий за формою зуба шестерні

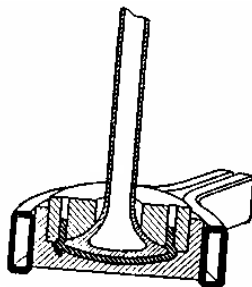


Рисунок 15 – Наплавлення жаростійкого металу на головку клапана двигуна внутрішнього згоряння

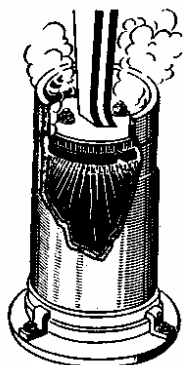


Рисунок 16 – Гартування внутрішньої поверхні гільзи циліндра індуктором із залізним ланцюгом

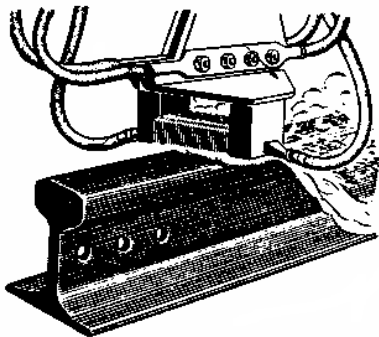


Рисунок 17 – Гартування поверхні головки рейки безперечно-послідовним методом

### **3.6 Переваги високочастотного гартування**

Індукційне нагрівання сталевих деталей для подальшого їх гартування в порівнянні зі звичайним нагріванням у печі має багато переваг.

1 Висока продуктивність.

2 Вищі механічні властивості, ніж при звичайному гартуванні, особливо підвищуються межа текучості, витривалості при згині і крученні та опір удару.

3 Відсутність знеуглецювання під час нагрівання і вигорання інших елементів. Відсутність окалини, що виключає операції додаткового очищення поверхні деталі.

4 Мінімальне викривлення або його відсутність.

5 Глибина загартованого шару може точно регулюватися.

6 Упровадження високочастотного поверхневого гартування дозволяє застосовувати замість дорогих легованих сталей прості вуглецеві, не знижуючи якості деталей.

7 Можливість заміни тривалих за часом і дорогих процесів хіміко-термічної обробки.

8 Індукційне нагрівання значно покращує умови праці робітників.

9 Економія електроенергії в порівнянні з нагріванням в електричних печах.

10 Можливість механізації та автоматизації вантажопотоків у цеху.

## **4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

4.1 Вивчити основні теоретичні положення.

4.2 Отримати у викладача зразки різних марок сталей для гартування з нагріванням СВЧ.



4.3 Підібрати індуктори, режим і швидкість нагрівання струмами високої частоти. Зразки загартувати і відпустити.

4.4 По можливості провести гартування і відпуск деталей з виробничої партії на філії кафедри з дозволу майстра цеху, використовуючи індуктори та інші пристосування згідно з розробленим цеховим технологічним процесом.

4.5 Навчитися регулювати силу струму на аноді (IA) і напругу виходу ( $V_{вих}$ ) для підбору режимів нагрівання деталі.

4.6 Виготовити мікрошліфи зразків і дослідити глибину загартованої зони вимірюванням твердості на ТП або ПМТЗ.

4.7 Зробити відповідні висновки, результати досліджень, занести до табл.2. Скласти звіт.

Таблиця 2

| Марка сталі | Хім. склад за маркою сталі, % | Нагрівання СВЧ |           |       | Охолоджувальне середовище | Глибина гартівного шару, мм | HV поверхні |
|-------------|-------------------------------|----------------|-----------|-------|---------------------------|-----------------------------|-------------|
|             |                               | $I_A$          | $V_{вих}$ | T, °C |                           |                             |             |
|             |                               |                |           |       |                           |                             |             |
|             |                               |                |           |       |                           |                             |             |
|             |                               |                |           |       |                           |                             |             |
|             |                               |                |           |       |                           |                             |             |

## 5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1 Для яких цілей застосовують гартування з нагріванням СВЧ?

2 Які генератори застосовуються для нагрівання під гартування деталей?

3 Що таке індуктор? З яких матеріалів він виготовляється і чому?

4 Що таке індуктор-спеєр? Для чого він використовується?

5 Як підібрати температуру гартування при нагріванні СВЧ?

6 Яка температура відпуску для деталей, загартованих нагріванням СВЧ?

7 Що таке самовідпуск?

8 Як називають мартенсит, отриманий при гартуванні з нагрівом СВЧ?

9 Чому твердість мартенситу високочастотного гартування вища, ніж при звичайній, однієї і тієї самої марки сталі?

10 Чому температура гартування при високочастотному нагріванні вища на 100-1500<sup>0</sup>, ніж при пічному нагріванні?

11 Яка оптимальна глибина загартованої зони при високочастотному гартуванні?

12 Які переваги високочастотного гартування перед гартуванням з пічним нагріванням?

13 Які види високочастотного гартування Ви знаєте?

14 У чому полягає безперервно-послідовний спосіб високочастотного гартування?

15 Від чого залежить глибина проникнення струму в деталь при нагріванні СВЧ?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Болховитинов Н.Ф. Металловедение и термическая обработка. -М.: Машиностроение, 1958. -432 с.

2. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. -М.: Машгиз, 1960.

3. Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. -Металлоиздат, 1980.

4. Головнин Г.Ф., Замятин М.М. Высокочастотная термическая обработка. -Машгиз, 1959.

Лабораторна робота 3  
«Нанесення зносостійких покриттів  
методом конденсації з іонним бомбардуванням  
на установці «Булат»

## 1 МЕТА РОБОТИ

1.1 Ознайомитися з технологією нанесення покриттів вакуумно-плазмовим методом на інструмент із швидкорізької сталі і твердого сплаву конденсацією з іонним бомбардуванням (КІБ).

1.2 Вивчити методику оцінки якості покриттів на інструменті зі сталі Р6М5 і пластинках твердого сплаву.

## 2 ОБЛАДНАННЯ, ІНСТРУМЕНТ І ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ

2.1 Установка «Булат» конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ) титановим катодом.

2.2 Зразки сталей, тверді сплави.

2.3 Балон з аміаком.

2.4 Спирт або бензин «Калоша».

2.5 Твердоміри ТП і ПМТЗ.

2.6 Шліфувальні верстати для виготовлення мікрошліфів.

2.7 Металографічний мікроскоп.

2.8 Спиртний протравлювач, гігроскопічна вата.

2.9 Витяжна шафа.

### **3 ВИВЧЕННЯ МЕТОДИКИ ОТРИМАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ**

Для підвищення довговічності інструментів зі швидко-різальних сталей і твердих сплавів на їх робочі поверхні наносять зносостійкі покриття конденсацією з іонним бомбардуванням (КІБ). Найбільше поширення як таке покриття набули нітрид і карбід титану (TiN, TiC). Можна нанести будь-які інші нітриди або карбіди чи їх комплекси. Покриття наносять на спеціальних установках, що мають різну конструкцію, але однаковий принцип роботи, заснований на випаровуванні твердих речовин, для реалізації якого установки забезпечені спеціальними генераторами з холодним катодом. Випарник призначений для створення потоку плазми з матеріалу катода.

Такою установкою є «Булат-3Т», схема якої наведена на рис.1. Основними вузлами тут є: камера-анод 4, підкладка 5, запалювальний електрод 3, система для напуску легуючого газу (на схемі не показана). Камера відкачується вакуумною системою, що містить форвакуумний 7 і високовакуумний 9 насоси, водяну 10 та азотну 11 пастки, нагрівач 8, манометричні датчики 6. Установка забезпечена системою водяного охолодження. «Булат-3Т» має три катоди, причому подовжні осі двох з них у горизонтальній площині установки, а вісь третього - вертикально (на схемі показано два катоди – вертикальний і горизонтальний 2).

Згідно з технологічним процесом роботу установки можна розділити на три режими: а) прогрівання виробів; б) очищення; в) напилення.

**На першій стадії** йде прогрівання виробу і камери до робочої температури. Режим прогрівання призначений для запобігання конденсації і видалення пари води з поверхні стінок камери, а також їх очищення у процесі відкачування.

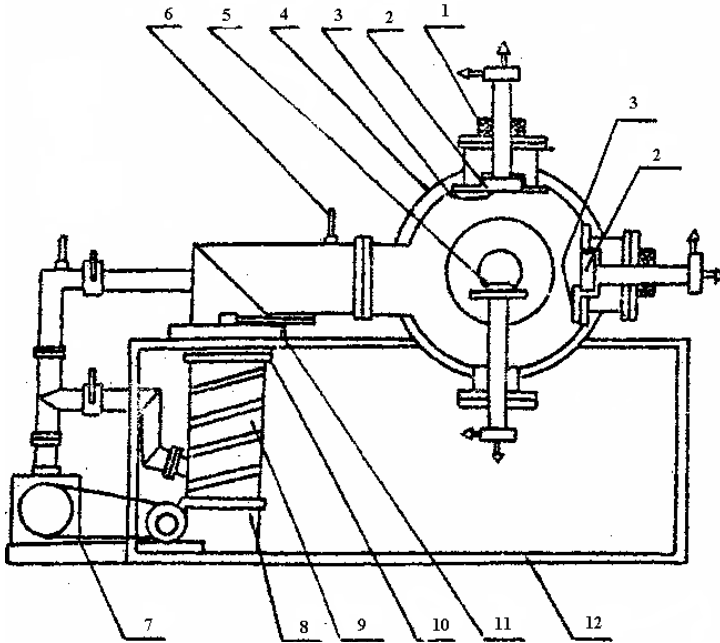


Рисунок 1 - Схема вакуумно-плазмової установки «Булат-3Т»

Прогрівання здійснюється гарячою водою, циркулюючою по трубах, приварених до стінок камери. Вода нагрівається індукційним нагрівачем, що є трансформатором, короткозамкнена вторинна обмотка якого виконана з трубки з неіржавіючої сталі. Вода, проходячи по витках короткозамкненої обмотки, нагрівається до температури  $80^{\circ}\text{C}$  і надходить до системи прогрівання камери.

**На другій стадії** здійснюють іонне травлення поверхні (режим очищення), що підлягає покриттю. Для цього її бомбардують іонами катодів, що розпилюються, прискореними до енергії 1-2 кеВ. Реалізується це таким чином: до підкладки прикладають високий негативний потенціал, а за допомогою запалювального електрода між катодом і камерою збуджують дугу. Іони матеріалу катода, що утворюються при дуговому розряді, прискорюють високим нега-

тивним потенціалом у напрямі підкладки, бомбардують її і таким чином очищають поверхню від забруднень, окисних плівок і частково розпилюють її. Процес регулюється як за енергією підлітаючих частинок (змінюючи величини прискорювального потенціалу), так і за інтенсивністю бомбардуючого пучка (струмом дуги).

У режимі іонного травлення (бомбардування) електрична схема установки забезпечує збудження і стабільне горіння дуги, стабілізацію катодної плями на робочій поверхні катода, подачу високого негативного потенціалу на підкладку.

У процесі очищення необхідно повертати вироби для забезпечення рівномірного очищення всієї поверхні. Після закінчення процесу вимикається високовольтний випрямляч.

Технологічний процес очищення виробу проводиться при тиску у робочому обсязі  $3 \cdot 10^{-5}$  –  $5 \cdot 10^{-3}$  мм. рт. ст.

**Третя стадія** – це режим напилення - процес конденсації покриття. Відрізняється він від першої стадії тим, що на підкладку подається низький негативний потенціал (до 200 В). Прискорювальні іони набувають тепер дуже помірної кінетичної енергії, якої не вистачає для руйнування поверхні мішені-підкладки, але виявляється достатньо для збудження атомних зв'язків поверхні, що забезпечує хорошу адгезію прилеглих до неї частинок. На третій стадії процесу в робочу камеру установки з певною швидкістю натікання подається реакційний газ (отримання нітридних покриттів – азот або газ карбіду зі вмістом вуглеводнів та ін.), який іонізується і вступає в плазмохімічну реакцію з металевими іонами електрода, утворюючи на поверхні підкладки (деталі) тугоплавке покриття, основні фізико-механічні властивості якого визначаються хімічним складом катода і реакційного газу, температурою підкладки і меншою мірою – енергією і щільністю іонного потоку.

Для забезпечення надійного адгезійного зв'язку між покриттям і підкладкою (зміцнюваною деталлю або ін-

струментом) остання перед установкою у робочу камеру повинна бути ретельно знежирена, для чого, окрім механічного очищення, використовують промивання поpotрібно-овно в авіаційному бензині, хімічному ацетоні та етиловому спирті. Крім того, при нанесенні покриття необхідно підтримувати строго певний температурний режим підкладки, який контролюється за допомогою інфрачервоного пірометра. Установлено, що при нанесенні покриттів на інструмент, наприклад, із швидкорізальних сталей оптимальна температура підкладки знаходиться в інтервалі 450-500°C, а при нанесенні покриттів на інструмент із твердих сплавів – в інтервалі 600-800°C. Оптимальна товщина покриттів (на інструментах із швидкорізальних сталей – 3-5 мкм, а на твердосплавному інструменті - 5-8 мкм) задається часом осадження, яке становить від 20 до 60 хв. Твердість покриття на основі TiC HV – до 3400-2800.

У режимі напилення схема повинна забезпечити збудження і стабільне горіння електричної дуги між катодом і анодом; забезпечити рівномірність покриття по всій поверхні; високі фізико-механічні властивості покриття.

Вакуум в установці повинен підтримуватися під час всього технологічного процесу  $1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$  мм. рт. ст.

Матеріалом катода може служити будь-який карбідоутворювальний або нітридоутворювальний елемент: вольфрам, ванадій, цирконій, хром, молібден і т.д.

Склад іонізованого простору робочої камери залежить від матеріалів катода і легуючого (реакційного) газу.

На сьогодні накопичений багатий досвід промислового використання вакуумно-плазмових покриттів у інструментальному виробництві. Наприклад, завдяки покриттям TiN, забезпечується підвищення стійкості різальних інструментів різного призначення від 2 до 5 разів, при цьому є можливість підвищити продуктивність механічної обробки за рахунок збільшення швидкості різання й товщини зрізу.

Після покриття робочих поверхонь інструменту перед випробуванням зносостійкості контролюється ряд параметрів, що характеризують якість шару.

Для забезпечення працездатності інструменту з покриттям необхідно, щоб нанесений шар TiN мав максимальну адгезійну активність з оброблюваним матеріалом.

Для оцінки адгезії покриття з матеріалом інструменту використовується методика, суть якої полягає у визначенні площі відколу покриття біля відбитків, одержаних при вимірі твердості на приладі типу ТП або ПМТ-3. Визначивши на мікроскопі МБС-9 площу відколу покриття, оцінюють якість адгезії за формулою

$$4RC = \frac{S_{ck}}{S_{omn}},$$

де  $S_{ck}$  - площа відколу покриття навколо відбитку індентора;

$S_{отп}$  - площа відбитку в площині.

Експериментально було встановлено, що мінімальну адгезійну активність має покриття, склад якого відповідає стехіометричному співвідношенню TiN. З'єднання, які кристалізуються з надміром азоту, мають незадовільні властивості. Оскільки залежно від складу фази TiN змінюється колір покриття, можна для встановлення відповідності вимогам скористатися набором еталонів для зіставлення їх кольору з одержаними покриттями. Покриття TiN має красивий золотистий колір.

Важливою характеристикою покриття є товщина нанесеного шару, яку можна визначити на спеціально підготовлених мікрошліфах або використавши прилад інтерферометр.

Якість покриття залежить також від наявності у ньому точкової фази, яка виникає внаслідок перегрівання і розбризкування електрода-катода з Ti або іншого елемента. Чим більше цієї точкової фази, тим більша шорсткість покриття і тим нижча його працездатність. Для визначення



кількості цієї фази можна скористатися мікроструктурними допотрібностями.

Характерною особливістю матеріалу з покриттям є його підвищена твердість, що може бути встановлено при порівнянні даних вимірювання мікротвердості з покриттям і без нього.

Було встановлено, що при вартісних випробуваннях різального інструменту з покриттям TiN змінюється довжина контакту стружки з передньою поверхнею в порівнянні з інструментом без покриття.

Для встановлення цієї відмінності можна скористатися вимірюваннями на мікроскопі МСБ-9 довжини контакту стружки після короткочасного точіння сталі 45 при  $V = 60$  м/хв,  $S = 0,25$  м/хв і  $t = 0,5$  хв.

#### **4 ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА УСТАНОВЦІ «БУЛАТ-3Т» НА РІЗЦІ**

1 Заточені і доведені різці згідно з вимогами підготувати до покриття:

а) провести промивання різців у бензині «Галоша» не менше 3 разів за допомогою пензлика;

б) після кожного промивання протирати бязевою серветкою;

в) завершальна операція промивання у чистому етиловому спирті з протиранням бязевою серветкою.

2 Укласти різці у спеціальні касети і завантажити у камеру.

3 Відкачати повітря з камери установки.

4 Увімкнути установку на розігрівання.

5 Увімкнути водоохолоджувальну систему.

6 Розігрівання та іонне очищення камери і виробів 10-15 хв при напрузі 800-1000 В.

7 Пуск реакційного газу.

8 Покриття виробів методом конденсації іонним бомбардуванням – 12-15 хв на товщину покриття 3-4 мкм при напрузі до 200 В при вакуумі у камері 1·10<sup>-4</sup>–5·10<sup>-3</sup> мм.рт.ст.

9 Контролювання температури різців проводити оптичним пірометром «СМОТРИЧ» і побічно зорово по початку слабкого свічення деталей через оглядове вікно.

Температура виробів зі швидкорізальної сталі 600-650<sup>0</sup>С.

Примітка. Хімічний склад електрода-випарника вибирається залежно від вимог креслення до фазового складу поверхневого шару покриття.

10 Після закінчення витримки вимкнути установку. Вимкнути подачу реакційного газу.

11 Вимкнути по потреби вакуумну систему.

12 Відкрити камеру, вивантажити деталі.

13 Контроль якості виробів:

а) зовнішній огляд відшаровувань дифузійного шару;

б) підготувати мікрошліф;

в) виміряти мікротвердість дифузійного шару;

г) виміряти товщину дифузійного шару.

## **5 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

5.1 Ознайомитися з пристроєм установки «Булат-ЗТ», замалювати її схему.

5.2 Ознайомитися з порядком підготовки установки до роботи з нанесення покриттів на інструмент або зразки.

5.3 Підготувати інструмент для нанесення покриття.

5.4 Записати параметри роботи установки при нанесенні покриття з оптимальними властивостями, а також зазначити необхідні час і тиск у камері.

5.5 На трьох зразках з покриттям визначити HV і оцінити якість адгезії покриття з матеріалом. Перевести значення твердості на HRC.

5.6 Зіставити з еталонами зразки з покриттям TiN. На підставі цього зіставлення зробити висновок про адгезійну активність покриття по відношенню до оброблюваного матеріалу (висока, низька, середня).

5.7 Визначити товщину покриття на спеціальному мікрошліфі.

5.8 Провести вимірювання мікротвердості на зразку з покриттям і без покриття (зразки з термообробленої сталі Р6М5).

5.9 Провести дослідження мікроструктури покриття і оцінити кількість точкової фази (x70 і x440) .

Результати проведених вимірювань записати до табл. I і 2.

Таблиця 1 - Фізичний стан нанесеного покриття

| Характеристика покриття              |      |     | II                           |                     | III                   | IV  |
|--------------------------------------|------|-----|------------------------------|---------------------|-----------------------|---|
| Якість адгезії покриття з матеріалом |      |     | Оцінка адгезійної активності |                     | Товщина покриття, мкм | Структура покриття, кількість точкової фази** |
| ScK                                  | Sopt | HRC | порівняння з еталонами       | ступінь активності* |                       |   |
| 1                                    |      |     |                              |                     |                       |   |
| 2                                    |      |     |                              |                     |                       |   |
| 3                                    |      |     |                              |                     |                       |   |
| * Висока, середня, низька.           |      |     |                              |                     |                       |   |
| **Зобразити схему структури покриття |      |     |                              |                     |                       |   |

Таблиця 2 - Мікротвердість матеріалу інструменту і довжина контакту стружки

| Характеристика покриття    | V                   |   |   |         |
|----------------------------|---------------------|---|---|---------|
|                            | Мікротвердість, МПа |   |   |         |
| Стан матеріалу інструменту | 1                   | 2 | 3 | середня |
| 1 Р6М5 (з покриттям)       |                     |   |   |         |
| 2 Р6М5 (без покриття)      |                     |   |   |         |

5.11 Зробити висновки про якість покриттів допотрібножуваних зразків. Оцінити ефективність використання інструменту з покриттям.

## **6 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ**

6.1 Для якої мети служить покриття конденсації з іонним бомбардуванням?

6.2 Як одержати покриття КІБ?

6.3 Принцип роботи установки «Булат-3Т».

6.4 У чому полягає сутність методики оцінки адгезії покриття?

6.5 Від яких факторів залежить якість покриття?

6.6 Чи можна проводити покриття КІБ на алюмінії, нікелі, міді?

6.7 Який робочий тиск у камері установки?

6.8 Чи можна захистити частину деталі від покриття? Як?

6.9 Що є анодом в установці «Булат-3Т»?

6.10 Що є катодом?

6.11 Яка температура деталі з твердого сплаву при покритті нітридом титану?

6.12 Яка температура деталі з вуглецевої сталі при покритті нітридом титана?

6.13 Яка твердість нітриду титану, карбіду титану?

6.14 Яка оптимальна товщина покриття КІБ?

6.15 Від чого залежить міцність зчеплення покриття з основним металом?

6.16 Як впливає покриття нітридом титану на зносостійкість швидкорізальних сталей?

6.17 У чому полягають очищення поверхні виробу тліючим розрядом, іонне очищення?

6.18 Скільки часу йде процес так званого процесу «булатування»?

- 6.19 Навіщо необхідне ретельне очищення виробу перед КІБ?
- 6.20 Що таке реакційний газ і навіщо він потрібен при КІБ?
- 6.21 Яка температура деталі зі швидкорізальної сталі при іонно-плазмовому покритті КІБ?
- 6.22 Скільки електродів в установці «Булат-3Т»?
- 6.23 Які недоліки у мікроструктурі при отриманні зміцнювальних покриттів на установці «Булат-3Т»?
- 6.24 Які вакуумні насоси забезпечують робочий вакуум в установці?
- 6.25 Який розмір робочої камери установки?
- 6.26 Розшифруйте аббревіатуру «КІБ».
- 6.27 Що таке точкова фаза в установці «Булат-3Т»?
- 6.28 При отриманні покриття з карбіду титану який реакційний газ використовується?
- 6.29 При отриманні покриття з карбіду титану які електроди використовуються?
- 6.30 Назвіть три періоди роботи установки.
- 6.31 Які компоненти використовуються для знежирення й очищення виробів перед завантаженням в установку?
- 6.32 Якщо у режимі напilenня не буде забезпечене стабільне горіння електричної дуги, на що це вплине при роботі установки?
- 6.33 Якого кольору покриття з нітриду титану?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коровкин А.В., Усачев Г.А., Кравченко С.С. Прогрессивная технология нанесения износостойких покрытий на инструмент и его эксплуатация //Тр.филиала НИПИ авиапрома. –Тольятти, 1985. -77 с.
2. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов. –К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. -52 с.

Лабораторна робота 4  
«Термічна і хіміко-термічна обробка  
деталей в електроліті»  
(тривалість роботи - 4 год)

## **1 МЕТА РОБОТИ**

- 1 Вивчити короткі теоретичні положення.
- 2 Навчитися проводити термічну і хіміко-термічну обробку деталей машин із нагрівом в електроліті.
- 3 Допотрібножувати мікроструктуру і властивості зразків після термічної і хіміко-термічної обробки в електроліті.

## **2 ОБЛАДНАННЯ, ІНСТРУМЕНТ І ДОПОМІЖНІ МАТЕРІАЛИ**

- 2.1 Установка типу «УХТО» - 1 шт.
- 2.2 Розчини азотнокислих солей.
- 2.3 Зразки сталей для термічної і хіміко-термічної обробки в електроліті.
- 2.4 Кліщі, підвіски і пристосування.
- 2.5 Металографічний мікроскоп МІМ-7, ММУ-3.
- 2.6 Мікротвердомір ПМТ-3.
- 2.7 Шліфувально-полірувальні верстати для виготовлення мікрошліфів.

## **3 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Сутність методу поверхневого гартування при нагріванні в електроліті полягає у тому, що виріб, який підлягає гартуванню (або частину виробу), занурюють в електроліт. Наприклад, 5% водяний розчин солі, через який пропускають постійний струм напругою 220-280 В (рис. 1).

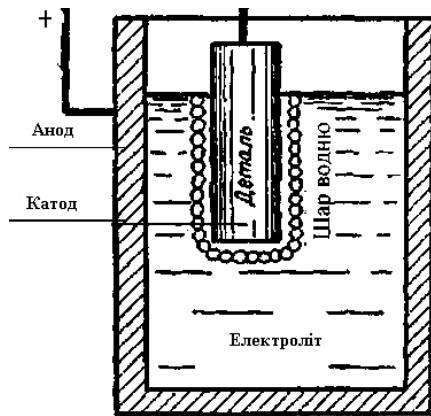


Рисунок 1 – Схема нагрівання виробів у електроліті

У даному випадку деталь служить катодом; анодом - ванна.

При пропусканні електричного струму через сольовий розчин навколо катоду утворюється щільна воднева оболонка, яка ізолює виріб (катод) від решти маси електроліту. Щільний шар водню має дуже високий електричний опір. Так, проходячи через цей опір, швидко нагрівають його до температури близько  $2000^{\circ}\text{C}$  і протягом декількох секунд нагрівають поверхневий шар виробу до температури вище за точку  $A_3$ .

Нагріту деталь охолоджують у тому самому електроліті, вимикаючи струм або ж переробляючи деталь у гартівний бак.

Метод гартування в електроліті простий щодо виконання, дозволяє механізувати процес і забезпечує дуже високу продуктивність.

Наприклад, при гартуванні цим методом кінців клапанів двигунів внутрішнього згорання продуктивність приблизно у 8-10 разів вища, ніж при інших методах гартування.

Метод поверхневого гартування в електроліті поки не набув широкого поширення на практиці через труднощі регулювання температури і неможливості рівномірного нагрівання під гартування або хіміко-термічну обробку виробів складної форми.

Зовнішній вигляд установки показаний на рис. 2.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд установки УХТО

Для нагрівання під гартування раціонально використовувати 5-10% водні розчини солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  або  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$ .

Для проведення процесів цементації, нітроцементації або азотизації рекомендується використовувати водний розчин азотно- або азотистоюкислі солі  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KNO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Залежно від необхідних дифузійних властивостей поверхні виробів можна підібрати електроліт із сумішей солей.

Відпрацьованого технологічного процесу гартування або хіміко-термічної обробки сталей і сплавів у літературі немає.



Швидкість нагрівання під гартування в електроліті обчислюється секундами; вона близька до швидкості нагрівання при використанні струмів високої частоти 100000-200000 Гц.

Така висока швидкість нагрівання до оптимальних температур не дозволяє пройти фазовим перетворенням при нагріванні в секундний час. Для того щоб пройшли повністю перетворення початкових фаз в аустеніт у секундному часі нагрівання в електроліті необхідно так само, як і при нагріванні струмами високої частоти, виріб перегрівати на 150-200<sup>0</sup>С. Мікроструктура після такого гартування – безструктурний або дрібногольчастий мартенсит.

При такому гартуванні мартенсит має твердість на 3-5 HRC вище, ніж при звичайному гартуванні, а із цього виходить, що і зносостійкість деталей вища за значення втимої міцності.

Товщина загартованого шару – від 0,1-0,4 мм.

При хіміко-термічній обробці також виходять дифузійні шари до 0,2-0,3 мм. Тому хіміко-термічній обробці піддають остаточно готові деталі; після такої термічної обробки деталі не шліфують.

Для того щоб деталі мали в серцевині хороші експлуатаційні властивості, перед термічною або хіміко-термічною обробкою їх у заготовках піддають термополіпшенню.

Обробка виробів із нагріванням в електроліті є бездеформаційною обробкою.

## **4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

4.1 Підготувати склад електролізної ванни:

- а) для термічної обробки;
- б) для хіміко-термічної обробки.

4.2 Відпрацювати режими нагрівання для гартування.

4.3 Відпрацювати режими нагрівання для проведення цементації.

4.4 Відпрацювати режими нагрівання для проведення цементації.

4.5 Підготувати мікрошліфи зразків після гартування. Заміряти твердість від поверхні по глибині всередину зразка, побудувати графік зміни твердості.

4.6 Підготувати мікрошліфи зразків після цементації та нітроцементації і визначити товщину дифузійних шарів. Описати мікроструктуру.

## **5 ПИТАННЯ ДЛЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ**

1 Пояснити фізичну сутність нагрівання деталей в електроді.

2 Що є катодом при нагріванні в електроді?

3 Що є анодом при нагріванні в електроді?

4 Які солі можуть бути використані для електроду при гартуванні?

5 Яку роль виконує воднева плівка при нагріванні деталей в електроді?

6 Яка оптимальна глибина загартованого шару при нагріванні в електроді?

7 Що є гартівним середовищем при гартуванні із нагріванням в електроді?

8 Чому при гартуванні в електроді температура нагрівання виробу повинна бути на 15-200<sup>0</sup>С вище оптимальної гартівної?

9 Електрод якого хімічного складу можна використовувати при хіміко-термічній обробці?

10 Які деталі у машинобудуванні рекомендується зміцнювати, використовуючи гартування із нагріванням в електроді?

11 Які недоліки процесу зміцнення з використанням нагрівання деталей в електроді?

12 Яка напруга струму при нагріванні деталей в електроді?

13 Які переваги процесу зміцнення деталей з використанням їх нагрівання в електроді?

14 До якої температури розігрівається воднева оболонка на катоді під час пропускання електричного струму через електроліт?

15 У скільки разів підвищується продуктивність праці при нагріванні деталей під гартування в електроліті?

16 Які процеси хіміко-термічної обробки можна проводити при нагріванні деталей в електроліті?

17 Чому не рекомендується проводити нагрівання деталей складної форми під гартування в електроліті?

18 Чи можна проводити гартування сталевих виробів діаметром 30 мм і отримати крізну прогартовуваність?

19 Чи можна при гартуванні отримати безструктурний мартенсит при нагріванні деталей в електроліті?

20 Чи можна при гартуванні із нагріванням в електроліті отримати велике зерно мартенситу?

21 Яка мікроструктура в серцевині деталей, загартованих з нагріванням в електроліті?

22 Яку твердість можна отримати при гартуванні деталей, виготовлених із сталі 45?

23 Яка мікроструктура буде на зразках із сталі 45, нагрітих під гартування в електроліті до температури  $A_3^{+30^{\circ}C}$  ?

24 Чи можна при гартуванні із нагріванням в електроліті сталі У8 зразка Ø 30 мм отримати глибину сталі У8 Ø 40 мм після гартування з нагріванням в електроліті?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Натапов Б.С. Термическая обработка металлов. – Киев: Вища школа, 1980, - 298 с.

2. Вязников Н.Ф. Термическая обработка стали. –М.: Гос. научно-технич. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. -350 с.

Лабораторна робота 5  
«Електроіскрове легування  
металевих поверхонь»

## **1 МЕТА РОБОТИ**

1.1 Навчити студентів самостійно працювати на установках електроіскрового легування (ЕІЛ) середньої потужності розряду (типу ЕІЛВ-8А, Елітрон-22А та ін.), вибирати необхідний режим легування залежно від необхідних характеристик формованих зміцнених шарів.

1.2 Навчити визначати масоперенесення на заданому режимі легування залежно від тривалості ЕІЛ.

## **2 ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

2.1 Установка ЕІЛ моделі «ЕІЛВ-8А».

2.2 Ваги аналітичні моделі типу ВЛА-200, ВЛР-200 та ін.

2.3 Набір важків.

2.4. Секундомір або годинник із секундною стрілкою.

2.5 Зразки із сталі 45 розміром 10x10x8.

2.6 Електроди (сталь 45, хром, вольфрам, твердий сплав ВК8 та ін.).

## **3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Електроерозійне легування (ЕЕЛ) металевих поверхонь засноване на явищі електричної ерозії і полярного перенесення матеріалу анода (електрода) на катод (деталь) при проходженні електричних розрядів у газовому середовищі. ЕЕЛ здійснюється при іскровій формі електричних розрядів з тривалістю  $10^{-6} - 10^{-3}$  с.

Перенесений матеріал анода легує катод і, з'єднуючись хімічно з атомарним азотом повітря, вуглецем і матеріалом зміцнюваного виробу, утворює на поверхні останнього дифузійний зносостійкий шар.

Завдяки значній гамі металів, які можна використовувати при ЕЕЛ, участі міжелектродного середовища у процесі формування поверхневих шарів цим методом можна у широких межах змінювати механічні, термічні, електричні, термоемісійні та інші властивості робочих поверхонь деталей.

У процесі полярного перенесення парової і рідкої фаз матеріалу електродів, їх взаємного перемішування і дифузійного проникнення на поверхні деталі формується шар, що складається з чистого матеріалу анода або є результатом взаємодії між собою матеріалів електродів і повітряного середовища.

**До основних особливостей ЕЕЛ потрібно віднести локальну обробку поверхні; високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою; відсутність нагрівання деталі в процесі обробки; можливість використання як оброблювальні матеріали, як чисті метали, так і їх сплави, металокерамічні композиції, тугоплавкі з'єднання і т.п.; дифузійне збагачення поверхні катода (деталі) складовими елементами анода (електрода) без зміни розмірів деталі; відсутність необхідності спеціальної підготовки поверхні. Необхідне обладнання малогабаритне, надійне і транспортабельне.**

Процес ЕЕЛ починається із зближення електрода-інструменту з деталлю, і при відстані між ними, що дорівнює або менше пробивного, починається розвиток імпульсного розряду, який у більшості випадків продовжується і завершується при контакті електродів. Згідно з моделлю ЕЕЛ можна подати таким чином (рис. 1).

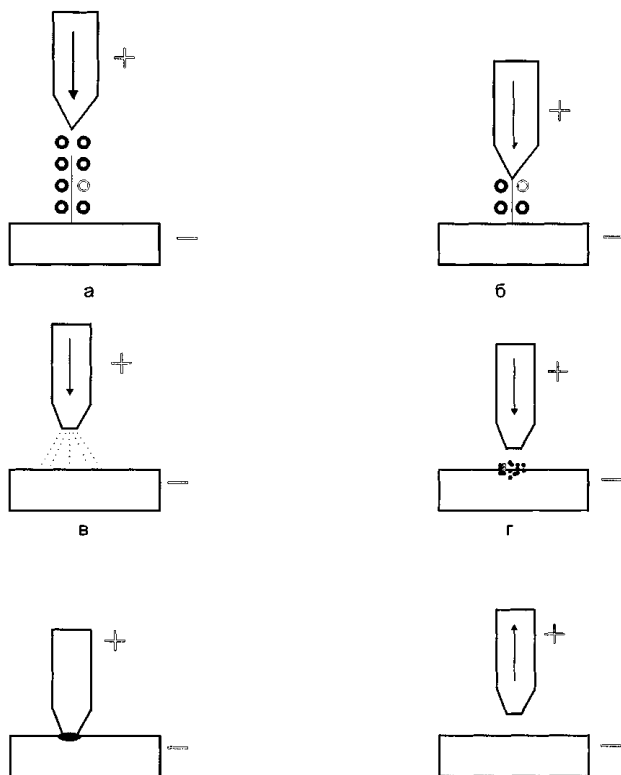


Рисунок 1 – Модель процесу ЕЕЛ

При зближенні електродів напруга електричного поля збільшується. При деякій відстані між електродами вона буде достатня для виникнення електричного розряду. Через виникаючий канал крізьної провідності пучок електронів ударяється об тверду металеву поверхню анода (рис. 1 а). Енергія руху зупинених електронів виділяється біля поверхневих шарів анода. У зв'язку з тим, що на даний момент система стрибкоподібно звільняє накопичену енергію, щільність струму значно перевершує критичні значення. У результаті цього від анода відокремлюється кра-

пля розплавленого металу, яка рухається до катода, випереджаючи рухомий анод (рис. 1 б).

У процесі відділення від анода крапля, що летить, встигає нагріватися до високої температури, закипає або «вибухає». Ланцюг струму уривається, стискуючи зусилля електромагнітного поля зникають і тому частинки, що утворилися, летять широким фронтом (рис. 1 в). **Оскільки перегріта крапля і частинки знаходилися в зіткненні з газом (навколишнє середовище), то за складом і властивостями вони можуть відрізнятись від вихідного матеріалу анода.** Розплавлені частинки, досягнувши катода, зварюються з ним і частково впроваджується у його поверхню (рис. 1 г). Вслід за частинками рухається електрод, включений у систему, що встигла накопичити енергію. Через розжарені частинки, що лежать на катоді, проходить другий імпульс струму, що супроводжується механічним ударом рухомого електрода (анода). На наступному етапі при механічному контакті електродів частинки зварюються між собою, і прогрівається тонкий шар поверхні катода. При цьому, крім дифузійного масоперенесення, під дією електричного струму в тілі катода відбуваються хімічні реакції між частинками, що наносяться, і матеріалом катода. Механічний удар електрода по розжареній масі матеріалів проковує одержане покриття (рис. 1 д), що значно збільшує його однорідність і щільність. Далі анод рухається вгору, а на поверхні катода залишається щільно сполучений з ним шар матеріалу анода (рис. 1 е).

Виходячи з поданої загальної схеми процесу, необхідно уточнити такі положення: при зближенні електродів між ними відбувається електричний розряд, миттєве розігрівання міжелектродного простору, розвиток плазмової стадії розряду, при якій можливе існування речовин в іонізованому стані. Частинки матеріалу, викинутого з анода, ударяючись об поверхню катода, прилипають. У результа-

ті деформації розплавленого металу і дії електродинамічних сил, що виникають у мікрощі, на поверхні катода утворюється лунка. Розмір лунки і кількість перенесеного матеріалу залежать від електроерозійної стійкості матеріалу електрода й енергії імпульсу. Матеріал мікрощі і частинки анода, що надходять, утворюють шар покриття.

Важливою технологічною характеристикою процесу ЕЕЛ є інтенсивність формування поверхневого шару, яка залежить від величини енергії розряду, що виділяється у міжелектродному проміжку, і середнього струму робочих імпульсів. У процесі обробки виникає необхідність управляти даними параметрами, що здійснюється за допомогою зміни режимів.

Залежно від вимог, що ставляться до формованої поверхні, її шорсткості, суцільності, товщини, пористості й т.п., застосовують різні режими обробки. Чим «м'якше» режим обробки, тим менше товщина нанесеного шару і його шорсткість.

Специфічною особливістю ЕЕЛ є те, що перенесення матеріалу електрода на виріб має межу (різний для різних режимів і матеріалів), якій відповідає максимум на кривій приросту маси катода (рис.2.).

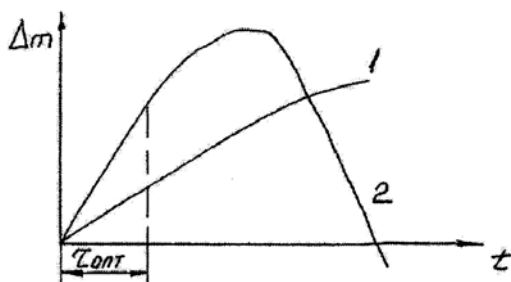


Рисунок 2 - Залежність приросту маси виробу від часу обробки при м'якому (1) і грубому (2) режимах ЕЕЛ



Існує також межа товщини покриття. Для «м'яких» режимів обробки (робочий струм менше 1,0 А) ця межа становить 0,005-0,03 мм, при обробці з робочим струмом більше 1,0 А товщина шару по найбільш виступаючих частинах 0,05-0,12 мм. За певних умов обробки можливе отримання товщини покриття, що дорівнює 0,2-0,5 мм, і більш («грубе» ЕЕЛ), але при цьому різко знижуються його якісні показники (щільність, рівномірність, шорсткість) та ін.

Метод ЕЕЛ є одним із найпростіших і доступніших з технологічної точки зору. **Серед його переваг, таких, як локальність, мала витрата енергії, відсутність об'ємного нагрівання матеріалу, необхідно зазначити простоту автоматизації, «вбудовуваності» у технологічний процес виготовлення деталей і поєднання операцій.**

У процесі ЕЕЛ на поверхні анода і катода утворюється шар зміненої структури, який при дії на нього протравлювачів, що використовуються для виявлення мікроструктури, залишається "білим", тобто структура його не виявляється. Подібні шари спостерігалися на поверхнях матеріалів, що піддавалися шліфуванню, точінню, фрезеруванню, електромеханічній обробці, обробці дробом, на поверхнях тертя після дії висококонцентрованих потоків енергії. Спільним для всіх зазначених випадків є те, що утворення "білих" шарів відбувається в умовах локальної дії високих температур і тиску. За інтенсивності дії на поверхневий шар ЕЕЛ значно відрізняється від перелічених вище процесів (тиск ударної хвилі - 0,1 Па, температура -  $5-40 \times 10^3$  °С). Висока швидкість тепловідведення призводить до того, що у межах товщини шару близько декількох мікрометрів температура швидко падає до температур плавлення і відповідних фазових перетворень. У зв'язку з цим кристалізація, фазові перетворення, дифузія і хімічна взаємодія, супроводжуюча процес ЕЕЛ, призводять до

утворення надто незрівноважених структур з дуже дрібним зерном, високою гетерогенністю за складом, структурою і властивостями. Твердість такого шару, як правило, значно перевершує твердість матеріалів електродів. У ньому діють напруги, що перевершують внутрішні напруження в електродних матеріалах анода і катода.

Загальний шар ЕЕЛ (рис. 3) має дві зони: верхній білий, що не трієється, представлений однорідним шаром і нижній перехідний шар із змінною концентрацією дифузійного характеру. У більшості випадків дифузійний шар по глибині перевищує верхній білий, а глибина проникнення елементів анода в катод може становити від декількох до ста мікрометрів.

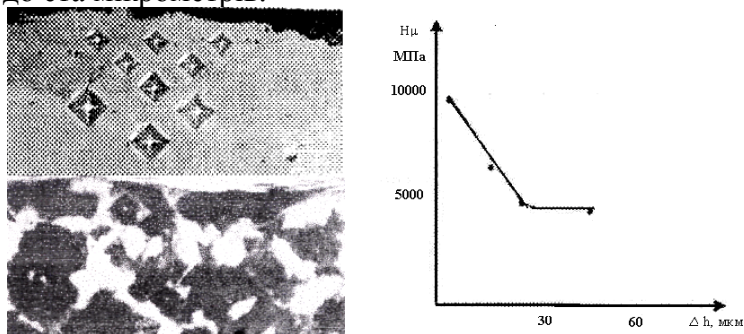


Рисунок 3 - Мікроструктура і розподіл мікротвердості по глибині шару при ЕЕЛ сплаву ХН58МБЮД твердим сплавом ВК 8, х 400

Крім цього, спостерігають часто третю зону - зону термічного впливу (ЗТВ). Для загартованих деталей підшар може бути зоною відпуску (зоною зниженої твердості). Глибина цієї зони залежить від енергії розряду.

Комплексні структурні й фазові перетворення у поверхневому шарі сталі при ЕЕЛ відбуваються не тільки при використанні електродів складних з'єднань, але і одностійких з катодом матеріалів. Так, при ЕЕЛ сталі 45 тією

самою сталлю у поверхневому шарі формується мартенситна структура, що характеризується високою густиною дефектів кристалічної будови, подібно до гартування сталі із рідкого стану. Характер взаємного розподілу елементів у поверхневих шарах при ЕЕЛ свідчить про високу рухливість атомів у кристалічних ґратках металів, підданих дії імпульсних розрядів. Подібні явища спостерігаються при дії на тверде тіло факела іскрового розряду, лазерного випромінювання та інших локальних енергетичних дій.

У всіх випадках легування залізної підкладки перехідними металами відбувається суттєва зміна структури підшару з її дробленням, що зумовлюється впливом нагрівання тонкого шару до температур алотропічного перетворення і переходу крупнозернистої  $\alpha$  - фази у дрібнозернисту  $\gamma$  - фазу.

Найбільше збільшення мікротвердості при ЕЕЛ досягається електродами з високою твердістю за рахунок їх осадження на поверхні катода, причому формовані шари можуть мати мікротвердість вищу, ніж сам матеріал, що наноситься. Так, при ЕЕЛ сталі 45 твердим сплавом **T15K6** мікротвердість шару досягала 32000-36000 МПа, хоча твердість твердого сплаву - 26000 МПа, що пояснюється взаємодією металу з азотом повітря, утворенням карбонітридів вольфраму і титану.

Суттєвим потрібно вважати, що при ЕЕЛ навіть м'якими матеріалами, наприклад, **алюмінієм**, вдається значно підвищити мікротвердість оброблюваної деталі. Так, висока мікротвердість шару (12000-14000 МПа) при ЕЕЛ титану **алюмінієм і нікелем** пояснюється утворенням інтерметалідів, нітридів, оксидів.

Метод ЕЕЛ універсальний, він використовується для: збільшення твердості, корозійної стійкості, зносо- і жаростійкості; зниження здатності до схоплювання поверхонь під час тертя; відновлення розмірів інструменту, деталей

машин і механізмів; проведення на оброблюваній поверхні мікрометалургійних процесів для утворення на ній необхідних хімічних з'єднань; створення на робочій поверхні перехідних шарів певної шорсткості; нанесення радіоактивних ізотопів; застосування у декоративному мистецтві та ін.

ЕЕЛ дає можливість змінювати фізико-хіміко-механічні властивості робочих поверхонь зв'язаних деталей, тобто підвищувати їх зносостійкість, мікротвердість, жаростійкість, корозійну стійкість і т.д. Наприклад, з'являється можливість підвищення зносостійкості поверхні деталей склоформ, сірого чавуну СЧ 21-40, високоміцного чавуну ЖЧСШ, сталі 12Х13 та ін. ЕЕЛ твердими сплавами Т15К10 і ВК8. Кращою зносостійкістю мають чавунні деталі, зміцнені твердим сплавом Т15К10.

У результаті застосування зазначеного способу видається можливим використовувати в деталях тертя, працюючих при високих температурах, такі важкооброблювані тверді зносостійкі з'єднання, як тугоплавкі метали, карбіди, кермети та інші електропровідні матеріали.

ЕЕЛ дозволяє підвищувати в 5-6 разів розпалостійкість і жаростійкість штампів. Такі властивості ЕЕЛ шару дозволяють використовувати покриття в елементах сухого тертя.

Широке застосування метод ЕЕЛ знайшов для підвищення зносостійкості металорізального і штампового інструменту.

ЕЕЛ впливає на величину ударної в'язкості. При ЕЕЛ нормалізованій сталі 45 **нітридом, карбідом і діборидом цирконію**, а також **карбідом титану**, підвищується ударна в'язкість за рахунок збільшення зони термічного впливу.

Зміцнювальні характеристики шарів, отриманих при легуванні сталевих підкладок перехідними металами IV - VI і VII груп (Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Ni), міцність

легованого шару на зріз вищі, якщо матеріали анода і катода утворюють один з одним необмежені тверді розчини.

Зміна складу і структури поверхні металу призводить до зміни його корозійних властивостей. Так, **нанесення алюмінієвого покриття** методом ЕЕЛ суттєво підвищує корозійну стійкість нелегованої сталі у фосфорнокислих і водносолевих середовищах.

Підвищення корозійної стійкості ЕЕЛ технічного титану ВТ 1-0 і його зварних з'єднань елементами молібдену, танталом, ніобієм дають позитивні результати у соляній кислоті.

Кавітаційна стійкість підвищується тільки в маловуглецевих сталях (до 0,2-0,3% вуглецю).

ЕЕЛ застосовується при зміцненні таких швидкоспрацьовуваних деталей, як вали, осі та ін., довговічність яких великою мірою визначає термін служби машин. Дуже небезпечними для таких деталей є циклічні навантаження, що призводять до втомних руйнувань.

Важливою характеристикою якості поверхневого шару є її шорсткість. Шорсткість при ЕЕЛ збільшується. Отримувана поверхня є перекриваючими одна іншу лунки з виступаючими гребінцями в місцях їх сполучення. Шорсткість залежить від ерозійної стійкості легованого і легуючого матеріалів і від величини енергії імпульсів, що проходять. Чим більша ерозійно стійкі матеріали і чим менше енергія імпульсів, тим менша шорсткість.

Метод ЕЕЛ характеризується, з одного боку, суттєвим зміцненням сформованого шару, що має високу щільність дислокацій ( $\rho \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ), з другого боку, появою в цьому шарі значних розтягуючих напруг і порівняно великою шорсткістю обробленої поверхні.

ЕЕЛ і відновлення термооброблених деталей машин, що піддаються в умовах експлуатації високим питомим навантаженням (деталі штампового інструменту, ва-

ляння прокатних станів, штоки, серезки і т.п.), не завжди приводить до бажаного результату. Причиною виходу з ладу деяких із них є те, що під шаром підвищеної твердості після ЕЕЛ з'являється зона відпуску - зона пониженої твердості. Це призводить до продавлювання зміцненого шару і, як наслідок, до швидкого зношування деталей.

Усунути вищеназвані недоліки ЕЕЛ можна як технологічними прийомами (застосуванням багат шарових електроерозійних покриттів, оптимізацією режимів ЕЕЛ, створенням нових електродних матеріалів і т.п.), так і поєднанням ЕЕЛ з іншими методами зміцнення, наприклад, поверхневою пластичною деформацією (ППД).

З метою ЕЕЛ відповідальних деталей хімічного і нафтового машинобудування як катод використовуються неіржавіючі сталі, високолеговані хромом і нікелем. Це сталі перехідного аустенітно-мартенситного класу 07X16H6 і аустенітного класу 12X18H10T з твердістю після остаточної термообробки відповідно 39-40HRC і 140-170HB.

Для розроблення технології зміцнення деталей, що працюють при низьких температурах і високому тиску (імпульсні торцеві ущільнення турбонасосів рідинних ракетних двигунів), використовуються сплави на нікелевій основі ХН58МБЮД і мідній основі - берилієвій бронзі БрБ2 з твердістю відповідно 400 і 370 HB.

Крім цього, становлять науковий і практичний інтерес багатоконпонентні складнолеговані сталі 07X16H6, 12X18H10T, P6M5 і сплави на основі нікелю і міді.

Як анод служать чисті метали, вуглець (графіт різних марок), сталі різного ступеня легування і тверді сплави.

**При легуванні нікелем** на повітрі утворюється достатньо рівномірний білий шар по всій довжині шліфа. Товщина шару в середньому 25 мкм. Твердість становить 2000 МПа. При легуванні нікелем підвищення твердості не відбувається, навпаки; спостерігається її зниження в порі-

в'язанні з основою. Твердість перехідної зони товщиною до 8 мкм досягає 4200 МПа. Низьку твердість шару можна пояснити утворенням аустенітної структури при легуванні заліза нікелем, оскільки останній є аустенітоутворюючим і має необмежену розчинність в  $\gamma$  - залізі. Перехідна зона у цьому випадку є результатом спільної дії процесів дифузії і термічного впливу. Її твердість підвищується до 4200 МПа.

**При легуванні хромом** у середовищі повітря утворюється в основному  $\alpha$ -фаза (мартенсит) з невеликою кількістю аустеніту. Однак збільшення тривалості електроерозійного розряду від 1 хв/см<sup>2</sup> до 2 хв/см<sup>2</sup> приводить до появи у структурі чистого хрому в досить великій кількості, що свідчить про масоперенесення елемента анода на катод. Те саме можна відзначити і при легуванні **вольфрамом**. Так само середовище впливає і при легуванні **титаном**. Однак у цьому випадку із збільшенням тривалості легування значною мірою з'являється у чистому вигляді  $\alpha$ -Ті і його оксиди.

При ЕЕЛ **нікелем** спостерігається відкладення нікелю й утворення  $\gamma$ -фази. Причому, зі збільшенням тривалості розряду більшою мірою відбуваються процеси відкладення елемента анода на катоді.

Таким чином, у всіх випадках, крім легування нікелем, основу структури шару складає мартенситна фаза. Інші структурні складові наявні у незначній кількості, в окремих випадках не більш 20-30% у сумі. Тому властивості шару визначаються властивостями мартенситної фази.

Найефективнішим методом поліпшення якості ЕЕЛ зміцненого шару є деформаційна дія, що дозволяє при правильному виборі термомеханічних режимів обробки реалізувати процеси зміцнення і знеміцнення структурних складових поверхневого шару. Зокрема, деформацією можна добитися дисперсійного зміцнення твердого розчину,

часткового розпаду мартенситної фази і проходження інших структуроутворюючих процесів, що визначають, зрештою, підвищення експлуатаційних властивостей поверхні і в цілому виробу.

Основні механізми структуроутворення і будови поверхневого шару при ЕЕЛ швидкорізальних сталей подібні механізмам формування шару при легуванні простої вуглецевої сталі.

При ЕЕЛ сталі Р6М5 твердим сплавом ВК8 структуру шару представляють світлі ділянки ( $H_{\mu} = 6700, 7500, 8000$  МПа), що не труяться, і поля з коричневим відтінком ( $H_{\mu} \leq 7000$  МПа). При легуванні твердим сплавом Т15К6 ситуація подібна. Мікротвердість основного металу  $H_{\mu} = 7850$  МПа, шару  $H_{\mu} = 6000$  МПа. Ділянки типу евтектики мають мікротвердість  $H_{\mu} = 6000-6700$  МПа. Наявні ізольовані включення з мікротвердістю близько 15000 МПа. Аналогічна ситуація і при легуванні хромом: мікротвердість поверхневого шару  $H_{\mu} = 6000-8000$  МПа.

У той же час при легуванні швидкорізальної сталі графітом поверхневий «білий» шар набуває вищої мікротвердості (близько 10000-12000 МПа).

Зміцнення корозієстійких (неіржавіючих) сталей аустенітного класу типу 12Х18Н10Т і перехідного аустенітно-мартенситного класу типу 07Х16Н6. ЕЕЛ потрібно вести на 5-му режимі ( $J_{к.з.} = 2,1$  А;  $U_{х,х} = 68,7$ В;  $C = 300$  мкФ) з використанням установки «УІЛВ - 8». Як анод застосовувалися вольфрам і твердий сплав ВК8.

У сталі 12Х18Н10Т відсутні фазові перетворення в процесі застигання рідкої фази, що дає можливість пропобувати механізм її зміцнення тільки за рахунок термопластичної деформації, що проходить при ЕЕЛ і легування поверхневого шару елементами анода.

У обох випадках (ЕЕЛ вольфрамом і твердим сплавом ВК8) мікротвердість зміцненого шару вища, ніж основного



металу, і становить 4700 і 5000 МПа, з глибиною 25-60 і 15-50 мкм, суцільність 80 і 90% відповідно для вольфрамового і тврдосплавного електрода. Перехідна зона практично відсутня. Твердість зміцненого шару, плавно знижуючись, переходить у твердість основного металу.

При зміцненні зразків із сталі 07X16H6 вольфрамом мікротвердість поверхневого шару підвищується до 4700-4800 МПа з глибиною 30-40 мкм. Суцільність шару близько 80%.

При зміцненні сталі 07X16H6 твердим сплавом ВК8 особливостей у формуванні структури шару не наголошується. Мікротвердість і суцільність зміцненого шару декілька вищі, ніж при легуванні вольфрамом, і становлять відповідно 5100 МПа і 90%.

У разі ЕЕЛ берилієвої бронзи твердим сплавом ВК8 процесу зміцнення поверхневого шару не відбувається, тому що мікротвердість «білого» шару суттєво нижче, ніж основного металу, і становить 1650 МПа.

Незначне підвищення мікротвердості до 4500 МПа спостерігається при ЕЕЛ берилієвої бронзи сплавом 1М (70%хром, 20% нікель, 5% бор і 5% кремній). При цьому формується досить масивний шар з товщиною до 50 мкм і суцільністю ~ 75%.

### **3.1 Підвищення якості поверхневих шарів деталей поверхневою пластичною деформацією**

Як показано вище, пластична деформація поверхні після ЕЕЛ є одним з основних методів поліпшення експлуатаційних властивостей виробу. Очевидно, застосування ППД у поєднанні з ЕЕЛ поверхневого шару становить особливий інтерес, тому що ці технології взаємно доповнюють одна одну.

Для узагальнення і спрощення вибору найраціональнішого зусилля деформації пропонується все електроерозійне покриття, залежно від мікротвердості зміцнюваної

ділянки покриття, розбити на три групи; **м'які** (< 2000 МПа), **середні** (2000-3000 МПа) і **тверді** (> 3000 МПа). Для м'яких покриттів рекомендуються питомі зусилля деформації  $P_{cp} = 750-1250$  МПа, середніх - 1300 - 1500 МПа і твердих - 2500-3000 МПа.

## **4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ЕЕЛ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ІНСТРУМЕНТУ**

### **4.1 Вимоги до виробів, що підлягають ЕЕЛ і якості**

На відміну від інших методів нанесення покриттів перед ЕЕЛ поверхні не потребують особливої підготовки із застосуванням спеціальних механічних і хімічних видів обробок.

Оброблювані вироби повинні бути виготовлені зі струмопровідних матеріалів (металів, сплавів, композицій) і не мати тріщин та інших дефектів, які можуть призвести їх до виходу з ладу в процесі експлуатації.

Якщо на поверхні оброблюваних виробів утворюється окисна плівка або інші забруднення, необхідно очистити їх механічним шляхом за допомогою металевої щітки, наждачного паперу, алмазного надфіля і т.п.

Вихідна шорсткість поверхонь, що підлягають ЕЕЛ не повинна перевищувати  $Ra = 2,5$  мкм для робочого струму, до 1,5 А і  $Ra = 6,3$  мкм для струмів вище 1,3 А.

При ЕЕЛ інструментів і оснащення, які застосовуються для точних робіт, повинна враховуватися товщина шару покриття, що наноситься.

Призначення технологічних параметрів ЕЕЛ виробів залежить від багатьох умов і перш за все від функціональної приналежності, умов експлуатації і необхідного підвищення якості.

Для кожного конкретного випадку технологічні параметри підбираються експериментальним шляхом з обов'язковими подальшими випробуваннями.

ЕЕЛ шар повинен бути рівномірним, суцільним, необхідної товщини і шорсткості.

Якісні характеристики шару визначаються за допомогою мікрошліфів, а в тих випадках, коли неможливо виготовити мікрошліф на обробленому виробі, це робиться за допомогою «зразка-свідка», який має ту саму марку матеріалу і обробляється тим самим режимом, що і виріб.

Товщина прирощеного шару може вимірюватися залежно від вимог, що висуваються до нього, мікрометром по найбільш виступаючих нерівностях або по товщині «білого» шару на мікрошліфі.

Мікротвердість ( $H\mu$ ), кгс/мм<sup>2</sup> - вимірюється за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Приблизна оцінка суцільності виробляється за допомогою лупи 4-7 кратного збільшення за ГОСТ 25706.

## **4.2 Рекомендації щодо зміцнення і відновлення деталей типу валів**

Технологія зміцнення і відновлення деталей типу валів заснована на поєднанні доповнюючих одна одну технологій ЕЕЛ і ППД (рис. 4, рис. 5).

ЕЕЛ забезпечує нанесення на зміцнювані або зношені ділянки валу твердих, зносостійких матеріалів, а ППД, у свою чергу, забезпечує необхідні вимоги, що ставляться до мікрогеометрії формованих поверхонь, а також підвищує втомну міцність, а в окремих випадках і мікротвердість формованих поверхонь.

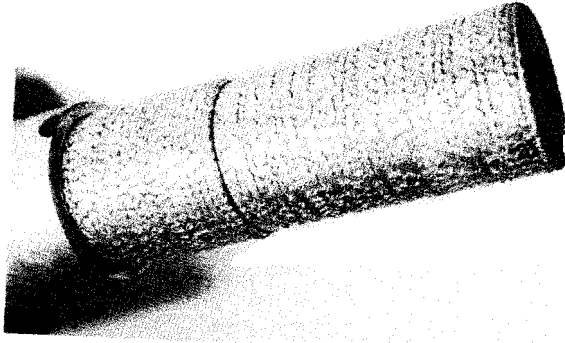


Рисунок 4 – Знос шийки валу електродвигуна з боку напівмуфти

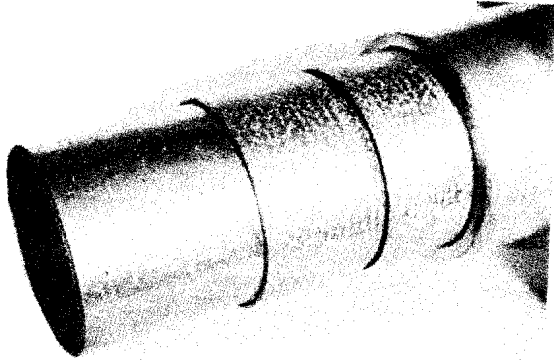


Рисунок 5 – Знос шийки ротора електродвигуна з боку вільного кінця валу

Багаторазовий додаток до валу знакозмінних навантажень при недостатньому запасі міцності або за наявності концентраторів напружень може викликати його втомне руйнування. Втома визначає службову довговічність валу, його витривалість.

Крім діючих на вал змінних сил і моментів, необхідно також мати на увазі сили тертя, що виникають у підшипниках ковзання. Тертя між поверхнями шийок валу і вкла-

дишів підшипників ковзання викликають знос шийок. Величина цього зносу залежить від умов тертя, що визначаються рядом чинників; фізико-механічними властивостями матеріалів валу і підшипника, формою і розмірами деталей, шорсткістю поверхонь тертя, швидкістю, режимами навантаження і теплового роботи пари, що третється, способом підведення, кількістю і якістю змащування.

Крім того, нерідко на валах зносу піддаються посадочні місця під робочі колеса, муфти, напівмуфти, шарико- і роликотпідшипники і т.д.

Таким чином, при ремонті деталей типу валів основним місцем, що підлягає відновленню і зміцненню, є шийка валу.

Необхідно зазначити, що при зміцненні розмір діаметра шийки валу збільшується не більш 0,005-0,01 мм, що, як правило, перебуває у межах допуску, а при відновленні - до 2,5 мм.

При зміцненні і ремонті шийок валів роторів насосного і компресорного обладнання, працюючих у парі з бабітовими підшипниками, пропонується використовувати комбіновану технологію зміцнення, що полягає в нанесенні на поверхневий шар шийки валу квазібагатошарових КЕП з проміжною й остаточною ППД.

### **4.3 Зміцнення деталей типу робочих коліс**

Надійність і довговічність відцентрових компресорів і їх різновидів дуттьових машин визначаються якістю деталей, працездатність яких залежить в основному від якості їх поверхневого шару.

Робоче колесо є основним і найбільш навантаженим елементом проточної частини відцентрового компресора. При обертанні колеса з великою швидкістю (окружні швидкості досягають 300 м/с) під дією відцентрових сил у ма-

теріалі колеса виникають великі внутрішні напруги. Крім того, колесо піддається дії тиску, температури агресивного робочого середовища.

Якщо як робоче середовище застосовується газ, що не має корозійної активності, то як матеріал робочих коліс застосовують вуглецеві сталі, а при використанні агресивних робочих середовищ робочі колеса виготовляють з легированих і хромонікелевих сталей марок 30ХГС, Х15 НЮА, 07Х16Н6 та ін.

Складність і велика вартість виготовлення робочих коліс відцентрових компресорів обумовлюють високі вимоги до їх зносостійкості.

У більшості випадків робочі колеса виходять з ладу унаслідок ерозійного зносу їх лопаток (рис. 6). Ерозійний знос особливо сильно позначається на аеродинамічних властивостях вхідної кромки лопатки. Після деякого часу роботи в умовах заповненого потоку будь-який первинний профіль вхідної кромки перетворюється на загострений. На випуклих (робочих) поверхнях лопаток часто з'являються значні поглиблення, що тягнуться біля основного диска значно далі від входу, ніж у решті частини лопатки по її ширині.

У робочих колесах дуттьових машин з метою зниження ерозійного зносу застосовують наплавлення і броньові накладки. Броньові накладки виконуються у вигляді зігнутих пластин, що прикріплюються до робочих поверхонь лопаток, а також у вигляді кутків, що приварюються у місцях стику лопаток з основним диском.

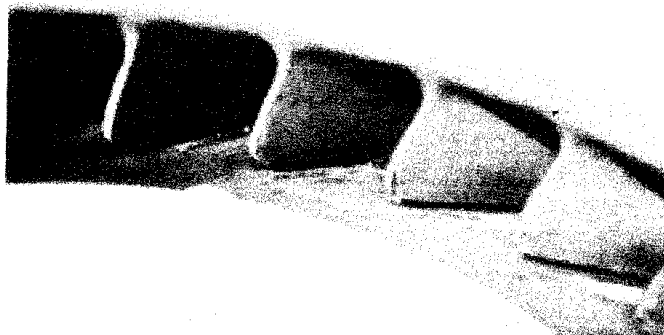


Рисунок 6 - Ерозійний знос лопаток колеса 1-ї ступені ротора

Навіть незначний знос лопатки призводить до втрати продуктивності компресора, а подальший знос спричиняє за собою його повну зупинку.

Таким чином, підвищення зносостійкості лопаток робочих коліс відцентрових компресорів є актуальною задачею.

#### **4.4 Застосування технологій електроерозійного легування для зміцнення металорізальних інструментів**

На сьогодні на багатьох підприємствах машинобудування і приладобудування металорізальний інструмент піддається зміцненню ЕЕЛ.

У табл. 1 і на рис. 7 наведені найпоширеніші металорізальні інструменти, зміцнювані ЕЕЛ, а також вказані поверхні, що підлягають обробці.

Найпоширенішими електродними матеріалами є тверді сплави групи ВК і ТК (форми і розміри за ГОСТ 25425-82, ГОСТ 25416-82, ГОСТ 25417-82), графіт марок МПГ-6, МПГ-7, МПГ-8, ЕЕПГ, а також можуть застосовуватися мідні й алюмінієві сплави та ін.

Таблиця 1 – Металорізальні інструменти, зміцнювані ЕЕЛ

| Найменування                         | Поверхні, що підлягають ЕЕЛ  |
|--------------------------------------|--|
| Фрези циліндрові з гвинтовими зубами | Задні поверхні у гвинтових зубів                                       |
| Фрези дискові                        | Задні поверхні зубів   |
| Фрези кінцеві                        | Задні поверхні зубів на торцевій і циліндровій частинах фрези          |
| Фрези кутові                         | Задні поверхні зубів   |
| Свердла спіральні                    | Задні поверхні різальних кромek конусної і циліндрової частини свердла |
| Розгортки                            | Задні поверхні зубів на західній частині                               |
| Різці токарні для чорнового точіння  | Передня поверхня   |
| Різці токарні для чистового точіння  | Задня поверхня   |
| Мітчики                              | Передня поверхня на західній частині мітчика                           |
| Протяжки циліндрові                  | Задні поверхні зубів   |
| Пили дискові                         | Задні поверхні зубів   |
| Ножі гільйотини                      | Задня поверхня різального клину  |



Рисунок 7 - Інструменти, що підлягають ЕЕЛ



Застосовуються електроди квадратного, круглого і прямокутного (співвідношення сторін не більше 2:1) перетинів.

У табл. 2 наведені найчастіше вживані при ЕЕЛ електродні матеріали.

Таблиця 2 – Найпоширеніші електродні матеріали, що застосовуються при ЕЕЛ

| Матеріал електрода | Твердість HRA | Характеристика експлуатаційних властивостей   | Призначення   |
|--------------------|---------------|---|---|
| ВК3                | 89            | Висока зносостійкість і підвищена швидкість різання. Помірна міцність, опірність ударам | Зміцнення: різців чистового і напівчистового точіння при безперервному різанні; різьбових різців; розгорток   |
| ВК6М               | 90            | Високі показники зносостійкості і експлуатаційної міцності                              | Зміцнення: різців для чорнового точіння; фрез для чистового і чорнового фрезерування; зенкерів; свердел   |
| ВК8                | 87            | Вища експлуатаційна міцність, але менша, ніж у ВК6М, зносостійкість                     | Зміцнення: різців для чорнового точіння; фрез для чорнового точіння; свердел; зенкерів; бурового інструменту  |
| ВК15               | 85            | Висока експлуатаційна міцність і опірність ударам. Зносостійкість нижча, ніж у ВК8      | Зміцнення: інструменту ударного буріння гірських порід  |
| Т15К6              | 90            | Високі експлуатаційна міцність і зносостійкість   | Зміцнення: різців при чорновому і напівчистовому точінні при безперервному різанні; різців при переривчастому різанні при чистовому точінні; фрез при чистовому фрезеруванні; свердел; зенкерів; протяжок |

#### 4.5 Технологічні рекомендації з ЕЕЛ штампового оснащення

Метою ЕЕЛ розділових і формоутворювальних штамів є підвищення їх стійкості.

Легуванню підлягають готові штампи після термообробки та інших видів обробки, передбачених технологією виготовлення. ЕЕЛ підлягають ділянки торцевих і бічних поверхонь робочих частин розділових і перехідні ділянки поверхонь робочих частин формоутворювальних штамів (рис. 8). Легування бічних поверхонь цільних матриць розділових штамів можливе, якщо ширина вікна матриці більше 5 мм. При менших розмірах вікна легується тільки торцева поверхня матриці, у формоутворювальних штамів легуються випуклі ділянки робочих елементів у місцях переходу від однієї поверхні до іншої.

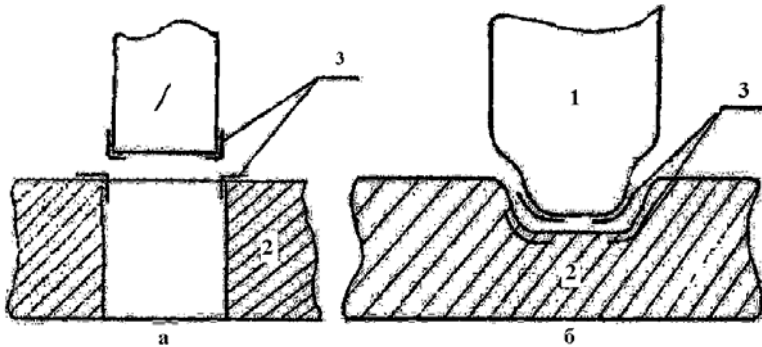


Рисунок 8 - Зміцнювані поверхні формоутворювальних (б) і вирубних штамів (а): 1 – пуансон, 2 – матриця, 3 – зміцнені ділянки

Електричні режими при легуванні розділових штамів вибираються з урахуванням товщини оброблюваного матеріалу і зазора між пуансоном та матрицею (табл. 3).

Таблиця 3 – Залежність режиму ЕЕЛ від товщини оброблюваного матеріалу і величини технологічного зазора

| Параметр                           | Товщина оброблюваного матеріалу, мм |           |           |           |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                    | 0,5                                 | 1,0       | 2,0       | 5,0       |
| Величина технологічного зазора, мм | 0,05                                | 0,10      | 0,20      | 0,50      |
| Робочий струм, А                   | 0,1 – 0,5                           | 0,5 – 1,5 | 1,5 – 2,0 | 2,0 – 2,5 |

Ширина смуги зміцнення для розділових штампів призначається такою, що дорівнює  $(2-4) d$ , де  $d$  - товщина листа заготовки. Для формуютьорювальних штампів ширина смуги зміцнення визначається конфігурацією і розмірами формуютьорювальних елементів.

## 5 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

5.1 Відрегулювати ваги. За 20-30 хвилин до початку зважування ввести ваги у робоче положення, при цьому дверці вітрин повинні бути зачинені.

5.2 Зразок з робочою поверхнею  $1 \text{ см}^2$  знежирити і протерти досуха бяззю.

5.3 Відповідно до технологічних рекомендацій щодо застосування електроіскрового зміцнення підібрати типорозмір і матеріал зміцнювального електрода, режим зміцнення і ємність накопичувального конденсатора.

5.4 Провести зважування зразка та електрода до легування. Результати вимірювань занести до табл.3.

5.5 Закріпити зразок на контактній плиті, електрод - в утримувачі вібратора.

5.6 Ввімкнути установку ЕЕЛ перемикачем «Мережа».

5.7 Підвести електрод до оброблюваного зразка до появи електричного розряду і, плавно переміщаючи його, провести процес легування протягом 1 хв. Сила притиску електрода повинна бути сталою, і її величина визначається необхідним струмом зміцнення.



5.8 Закінчивши легування, вимкнути установку від мережі, звільнити зразок і електрод.

5.9 Провести зважування зразка та електрода. Результати вимірювань занести до табл.4.

5.10 Аналогічно (див. п.5.7 і 5.9) провести ЕІІ з подальшим вимірюванням ваги зразка та електрода після кожної хвилини легування протягом 10 хвилин.

5.11 Відповідно до табл.4 за результатами вимірювань визначити втрату ваги електрода і приріст зразка після кожної хвилини легування.

5.12 За одержаними даними побудувати графік вимірювання приросту зразка (катода) та ерозії електрода (анода).

5.13 За результатами роботи зробити висновки і захистити роботу, використовуючи тестовий контроль.

## **6 ТЕСТОВІ КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

6.1 На чому заснований процес електроіскрового легування?

6.2 Які матеріали можна піддавати електроіскровому легуванню?

6.3 Які основні специфічні особливості електроіскрового легування?

6.4 Яка тривалість електричного розряду при електроіскровому легуванні?

6.5 Чи можна проводити електроіскровим легуванням художні розписи?

6.6 Чи можна електроіскрове легування використовувати для відновлення розмірів зношених деталей?

6.7 Які механічні властивості супроводять електроіскрове легування сталей?

6.8 Назвіть максимально можливу товщину зносостійкого шару після електроіскрового легування?

- 6.9 Що є анодом при електроіскровому легуванні?
- 6.10 Які матеріали можуть бути анодом при електроіскровому легуванні?
- 6.11 Назвіть основні технологічні параметри процесу.
- 6.12 Назвіть якісні характеристики електроіскрового покриття?
- 6.13 Які параметри електроіскрового легування впливають на якісні характеристики покриттів?
- 6.14 За якими параметрами доцільно оцінювати інтенсивність процесу електроіскрового легування?
- 6.15 У яких випадках при електроіскровому легуванні застосовується графітний електрод?
- 6.16 Яку товщину шару можна одержати при м'яких режимах легування?
- 6.17 Яку товщину шару можна одержати при жорстких режимах легування?
- 6.18 Чи можна легувати сталь міддю?
- 6.19 У яких випадках проводять електроіскрове легування твердими сплавами?
- 6.20 Як залежить шорсткість зміцненого шару від енергії розряду?
- 6.21 У яких випадках збільшується твердість поверхні сталевих деталей при електроіскровому легуванні?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазаренко Н. Электроискровое легирование металлических поверхностей. -М.: Машиностроение, 1976. -45 с.
2. Самсонов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. -Киев: Наукова думка, 1976. - 219 с.
3. Тарельник В.Б. Комбинированные технологии электроэрозионного легирования. -Киев: Техника, 1997.

Лабораторна робота 6  
«Карбонітрація сталей і сплавів»  
(тривалість роботи - 8 год)

## **1 МЕТА РОБОТИ**

1.1 Вивчити короткі теоретичні положення карбонітрації.

1.2 Навчитися проводити локальну обробку різального інструменту зі швидкорізальної сталі карбонітрацією.

1.3 Досліджувати одержані карбонітридні шари мікроструктурним і резистометричним аналізом.

1.4 Скласти звіт з роботи і зробити висновки з експерименту.

## **2 ОБЛАДНАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТ**

2.1 Соляна ванна з титановим тиглем і автоматичним регулюванням температури – 1 шт.

2.2 Зразки сталей для експерименту 2-3 марки сталі на групу студентів 4-5 осіб.

2.3 Тигель металевий для воронування зразків – 1 шт.

2.4 Солі  $KNO_3$ ,  $NaNO_2$ ,  $NaOH$ ,  $KNO_2$ ,  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $KNCO$ .

2.5 Карбамід гранульований.

2.6 Металографічний мікроскоп МІМ-7.

2.7 Мікротвердомір ПМТ-3.

## **3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Карбонітрація - новий і прогресивний процес хіміко-термічної обробки, який полягає у поверхневому насиченні сталей азотом і вуглецем у розплаві ціанатів.

Процес полягає у тому, що вироби (деталі машин, інструменти та ін.) піддаються нагріванню при температурах 500-600<sup>0</sup>С у розплавах неутруйних солей чистих ціанатів і ціанамідів або суміші металаміну і карбонатів для насичення поверхні виробів азотом і вуглецем з метою створення нової структури та поліпшення властивостей. На поверхні виробів одержують тонкий (10-20 мкм) шар карбонітридів, що відрізняється високою зносостійкістю при глибині підшару 0,2-0,4 мм (глибина шарів залежить від тривалості витримки, що не перевищує 1-2 год).

Видалення карбонітридного шару небажано, тому що воно призводить до істотного зниження зносостійкості. Тому карбонітрації піддають остаточно оброблені (включаючи шліфування, заточування та ін.) деталі та інструменти за схемою: знежирення в 3% розчині - підігрівання у повітряному середовищі до 350-400<sup>0</sup>С - карбонітрація при 550-560<sup>0</sup>С з продуванням розплаву стислим повітрям - охолодження на повітрі до 150<sup>0</sup>С – оксидування (воронування) при 140<sup>0</sup>С і промивка.

Для карбонітрації використовують печі, що серійно випускаються, і печі-ванни з незначною модернізацією (титановий тигель із пристроями для продування розплаву повітрям) і звичні гальванічні ванни.

У вітчизняній промисловості карбонітрацію застосовують для деталей двигуна, різальний і штамповий інструменти, інструмент і деталі ткацьких верстатів.

Оскільки карбонітрація проводиться при порівняно низьких температурах (нижче за температури структурних перетворень), то при цьому процесі вдається уникнути повторного гартування, внаслідок чого надається можливість зберегти поліпшену структуру серцевини. Крім того, для цього виду обробки використовуються неутруйні реагенти, вона порівняно проста, тому може бути рекомендована для



поверхневого різального інструменту, штампів і ресорно-пружинних сталей у виробничих умовах.

Поверхнєве насичення азотом і вуглецем значно підвищує межу витривалості сталі, особливо при невеликому знеуглецьованому шарі. Межа витривалості зміцнених зразків на 400 МПа (170%) перевищує межу витривалості незміцнених зразків. Обробку проводять при вищій температурі (510°C), ніж відпуск (460°C), що забезпечує отримання максимальної межі витривалості у сталі 60С2. Така температура обробки дозволяє одержати оптимальне поєднання зміцнювальних характеристик і чутливості до концентрації напруг.

Значне підвищення межі витривалості (від 450 до 670 МПа) зразків, зміцнених при 600°C, в порівнянні з відпущеними при цій температурі, є підтвердженням переважного впливу міцності поверхневих шарів на опір втомному руйнуванню.

Унаслідок вищої межі витривалості зміцнені сталі володіють принаймні на порядок більшою довговічністю, ніж оброблені звичайним способом. Це пов'язано зі значнішим підвищенням несучої здатності зразків унаслідок більшого зміцнення поверхні. Зміцнений поверхневий шар дозволяє розвантажити знеуглецьований шар, хоча і в не такому ступені, щоб повністю усунути його негативний вплив.

При знижених температурах процесу відбувається переважне насичення поверхні азотом, тому виходить невелика глибина зміцненої зони, а також різна зміна твердості по глибині.

Таким чином, карбонітрація - ефективний спосіб підвищення межі витривалості середньовуглецевих конструкційних сталей і усунення тим самим негативного впливу знеуглецьовання. Це пов'язано з високою втомною міцністю поверхневого шару, що забезпечує значне підвищення

несучої здатності зразків. При малій глибині знеуглецьованого шару цим способом можна підвищити межу витривалості до значень, характерних для незнеуглецьованих зразків, причому висока твердість поверхні не залежить від наявності знеуглецьованого шару.

### **Рекомендації виробництву**

Піч-ванна для карбонітрації повинна бути оснащена газовим, рідким (мазутовим), електричним нагрівальним пристроєм. Найбільш зручна система електронагріванням, що дозволяє легко автоматизувати регулювання температури в печі і розплаві солей.

Цілком зручними є електрованни із зовнішнім обігрівом типу СВГ-1,5 · 2/8.5М1; СВГ-2,5 · 2,5/8,5М1; СВГ-3,5 · 4/8.5М1.

Тигель повинен бути виготовлений з титану; залізний, сталевий або чавунний тигель неприйнятний, оскільки в процесі нагрівання залізо розчиняється сіллю, взаємодіє з нею, утворює фероціаніди і забруднює ціанатну ванну фероцианідами, осідаючими на поверхні металу і розпушуючими карбонітридний дифузійний шар. Титановий тигель забезпечує високу чистоту розплаву солі, гарну рідкоплинність і щільний дифузійний шар на поверхні оброблюваних виробів. У зв'язку з низькою температурою ведення процесу (близько 550-560°C) титановий тигель слугує довго і не здорожує процес.

*Робочий склад розплаву ванни:*

75-85% KNCO + 25-15% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

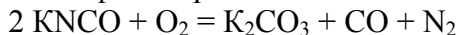
Для наведення ванни повинен бути використаний або чистий ціанат калію (KNCO), що поставляється відповідно до технічних умов, або суміш ціанату з 15-25% поташу.

Як по першому, так і по другому способам до сухого чистого титанового тигля завантажують сіль, що заповнює 1/4 + 1/2 об'єму тигля. Засипку нагрівають до розплавлення, що відбувається при T = 350°C. У розплавлену ванну завантажують нову порцію солі, яку також доводять до ро-

зплавлення. Таким чином, унаслідок поступового наплавлення заповнюють робочий обсяг тигля. Температура ванни під час наплавлення повинна підтримуватися на рівні 400-450°C. Не потрібно перевищувати її, тому що це може призвести до забруднення розплаву розвитком вторинних реакцій.

Якщо ванна наводиться з використанням суміші ціанату з карбонатом, то після декількох годин витримки її при робочій температурі 550-560°C вона готова до ведення процесу карбонітрації. Така витримка необхідна для того, щоб пройшли реакції, пов'язані з вогкістю використовуваних солей. У разі наведення ванни з використанням чистої ціанатної солі необхідно її після розплавлення постарити і окисненням довести концентрацію поташу до 15-25%, тобто рівня робочого складу ванни. Необхідно мати на увазі, що використовувані солі схильні до поглинання вологи і їх потрібно зберігати у відповідних приміщеннях. При використанні сухих солей спінення і спучування солей у ванні у процесі розплавлення не спостерігається.

У цілях інтенсифікації реакції



розплав солі продувають окисником (вуглекислим газом, повітрям та ін.). Зручно застосовувати продування повітрям, яке подається через пристосування, що має в кінці кільцеподібну форму з отворами діаметром близько 0,5 мм, розміщену на дні тигля. Трубку виготовляють так само, як і тигель, з титану.

Для запобігання розвитку відновних реакцій необхідно продування ванни повітрям починати зразу ж після розплавлення солі. Витрату повітря встановлюють із розрахунку  $2-3 \cdot 0,278 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  на 1 кг солі у розплаві. Для індивідуального обслуговування ванни карбонітрації можуть бути використані універсальний мембранний компресор УК-1М або, ще краще, мембранний компресор типу KB-10. Контроль витрати повітря здійснювати ротаметром

РС-3А або РС-3 продуктивність відповідно до 50 і понад  $50 \cdot 0,278 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для впровадження рекомендується така схема технологічного процесу карбонітрації:

| Варіант I  | Варіант II   |
|--|--|
| 1. Знежирення.<br>Гарячий розчин 3%  | 1. Знежирення.<br>Гарячий розчин 3%  |
| 2. Підігрівання, 300-3500С.<br>Повітряна атмосфера   | 2. Підігрівання, 300-350 <sup>0</sup> С.<br>Повітряна атмосфера  |
| 3. Нагрівання, 540-560 <sup>0</sup> С.<br>Соляна ванна, продування повітрям  | 3. Нагрівання, 540-560 <sup>0</sup> С.<br>Соляна ванна, продування повітрям  |
| 4. Охолодження на повітрі до 150 <sup>0</sup> С  | 4. Перенесення у розплав   |
| 5. Вороніння, 140 <sup>0</sup> С розчинів  | 5. Стабілізація, 250-300 <sup>0</sup> С  |
| 6. Промивка у гарячій воді.<br>Склад розчину (Т = 140 <sup>0</sup> С)<br>NaOH..... 550-600 г/л<br>KNO <sub>2</sub> ..... 150-200 г/л | 6. Промивка у гарячій воді.<br>Склад розчину (Т = 300 <sup>0</sup> С)<br>NaOH..... 75%<br>KNO <sub>2</sub> ..... 25% |

Тривалість витримки інструменту у ванні при карбонітрації потрібно підбирати з таблиці 1.

Таблиця 1 - Тривалість витримки у ванні при карбонітрації інструменту зі швидкорізальної сталі в ціанаті калію, 560<sup>0</sup>С

| Найменування інструменту | Діаметр танення, мм | Витримка, хвилин | Найменування інструменту        | Діаметр, товщина, мм | Витримка, хвилин |
|--------------------------|---------------------|------------------|---------------------------------|----------------------|------------------|
| 1                        | 2                   | 3                | 4                               | 5                    | 6                |
| Свердла                  | 3-6                 | 8-10             | Різці<br>токарні,<br>стругальні | 6x10                 | 10-12            |
|                          | 6-10                | 10-12            |                                 | 6x15                 | 12-15            |
|                          | 10-15               | 12-15            |                                 | 8x12                 | 15-18            |
|                          | 15-20               | 15-18            |                                 | 10x16                | 18-20            |
|                          | 20-25               | 18-20            |                                 | 16x24                | 20-22            |
|                          | 25-30               | 20-25            |                                 | 20x30                | 22-25            |

Продовж. табл. 1

| 1                            | 2      | 3     | 4   | 5       | 6     |
|------------------------------|--------|-------|---|---------|-------|
| Розгортки<br>зенкери         | 3-6    | 8-10  | Різці<br>фасонні<br>тагненціальні   | 10x15   | 15-18 |
|                              | 6-10   | 10-12 |   | 15x20   | 18-20 |
|                              | 10-16  | 12-15 |   | 20x30   | 20-25 |
|                              | 15-20  | 15-18 | Різці круглі  | 30x45   | 25-30 |
|                              | 20-25  | 18-20 |   | до 5    | 10-12 |
|                              | 25-30  | 20-25 |   | 5-10    | 12-15 |
| 30                           | 25-20  | 10-15 |   | 15-18   |       |
|                              |        |       | 15-20   | 18-20   |       |
|                              |        |       | 20-30   | 20-25   |       |
| Фрези<br>дискові             | 2-5    | 12-15 | Мітчики, крок<br>різьблення<br>1,5 мм   | 6-10    | 8-10  |
|                              | 5-10   | 15-18 |   | 10-15   | 10-12 |
|                              | 10-15  | 18-20 |   | 15-20   | 12-15 |
|                              | 15-20  | 20-25 |   | 20-30   | 15-18 |
|                              | 20     | 25-30 |   |         |       |
| Фрези<br>кінцеві,<br>фасонні | 6-10   | 8-12  | Гребінки<br>з кроком<br>різьблення.<br>Плашки<br>плоскі з<br>кроком різьб-<br>лення | 1-1,5   | 8-10  |
|                              | 10-15  | 12-15 |   | 1,5-2   | 10-12 |
|                              | 15-20  | 15-18 |   | 2       | 12-15 |
|                              | 20-25  | 18-20 |   | 1-1,5   | 7-9   |
|                              | 25-30  | 20-25 |   | 1,5-2,0 | 8-10  |
|                              | 30-40  | 25-30 |   | 2 мм    | 10-12 |
| 40-60                        | 30-40  |       |   |         |       |
| Фрези<br>черв'ячні           | 50-60  | 20-25 | Брошки  | 10-15   | 12-15 |
|                              | 60-80  | 25-30 |   | 15-20   | 15-18 |
|                              | 80-100 | 30-40 |   | 20-30   | 18-20 |
|                              |        |       |   | 30-40   | 20-25 |
|                              |        |       | 40  | 25-35   |       |
| Різці<br>різьбові            | 6x6    | 10-12 |   |         |       |

Проведені допотрібноження з інтенсифікації процесу карбонітрації у ціанатах. Для регенерації осаду ванни і його знешкодження рекомендовані добавки мелану або меламіну, їдкий натрій, нітрат натрію (бажано у компактному вигляді), для окиснення виникаючих у розплаві ціанідів уводиться аерація розплаву. Впровадження процесу дозволяє ліквідувати щоденне вичерпання частини солі для підтримки робочого складу ванни, скоротити цикл обробки і

витрату солей; понизити витрати на нейтралізацію стічних вод. Стійкість карбонірованого інструменту зростає більш ніж удвічі.

Після карбонітрації стійкість різального інструменту: різців, зенкерів, свердел, розгорток, фрез із швидкорізальних сталей Р18, Р6М5 – збільшується в 1,5-6 разів. Собівартість карбонітрації становить 1-3% вартості інструменту. Процес характеризується високою продуктивністю, простотою, технологічністю і застосуванням нетоксичних солей. Процес може бути впроваджений у термічному цеху або ділянці на будь-якому машинобудівному заводі. Процес впроваджений на багатьох підприємствах.

Установлено, що при карбонітрації також виділяються ціаніди, хоча і в меншій кількості, ніж при ціануванні. Після карбонітрації поверхня інструменту у ряді випадків покривається нальотом з сажі, видалення якої дуже складне. Солі, використовувані у цьому процесі, дещо дорожчі, ніж ціанистий натрій для рідинної азотизації.

Допотріблений процес й відпрацьовані режими зміцнення інструменту та оснащення, застосовуваних у галузі. Карбонітрація з газової фази проводиться в шахтних електропечах типу СШЦ, використовуваних для азотизації та цементації. Зміцненню піддають різальний інструмент зі швидкорізальних сталей (Р6М5, Р6М5К5 і т.п.) і пресформи зі сталі марок 4Х5МФС, 3Х2В8Ф, ЕІ-958 і т.д. для лиття під тиском кольорових сплавів. Вихідний матеріал – гранульований карбамід (сечовина), який подається у піч за допомогою дозатора, встановлюваного на кришці печі. Карбамід при нагріванні розкладається, утворюючи у пічному просторі газову фазу, що містить аміак, окисел вуглецю, водень. Температура процесу при обробці різального інструменту - 580-630°C, оснащення - 560-600°C. Тривалість обробки - 10-40 хв для різального інструменту, 45-90 хв – для оснащення. Така обробка призводить до утворення дифузійного шару завтовшки 0,006-0,02 мм на різа-

льному інструменті та 0,10-0,20 мм на прес-формах лиття під тиском.

Стійкість різального інструменту підвищується в 1,5-2,5 рази, прес-форм лиття під тиском – у 2-4 рази. У процесі карбонітрації у газовій фазі відпрацьовані гази після виходу з печі допалюють.

#### **4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ**

1 Робота проводиться групами по 4-5 осіб.

2 Згідно з технологічним процесом знежирити зразки у 5-10% водному розчині кальцинованої соди 70-80<sup>0</sup>С.

3 Промити у проточній воді.

4 Просушити у сушильній шафі.

5 Через готовий розплав карбаміду пропустити повітря і завантажити зразки на карбонітрацію.

Примітка. Залежно від марки сталі і форми інструмента-зразка, виданого викладачем, підібрати технологічний режим карбонітрації з табл. 1.

6 Провести процес карбонітрації за вибраним режимом:

6.1 Частину зразків охолодити на повітрі до температури 140-150<sup>0</sup>С і помістити у ванну для воронування при 150<sup>0</sup>С такого складу 55% KNO<sub>3</sub> + 45 NaNO<sub>2</sub>. Промити деталі у гарячій воді.

6.2 Другу частину зразків після карбонітрації охолодити у ванні для воронування при 150<sup>0</sup>С далі на повітрі. Після охолодження до температури ванни охолодити деталі на повітрі. Промити у гарячій воді.

7 Дослідити якість карбонітридного шару на зразках, виданих викладачем.

7.1 Металографічним аналізом виміряти товщину дифузійного шару.

7.2 На приладі ПМТ-3 дослідити мікротвердість по глибині дифузійного шару.

8 Скласти письмовий звіт з лабораторної роботи. Зробити висновки за результатами експерименту.

## **5 ПИТАННЯ ДЛЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ**

- 1 Що таке процес карбонітрації?
- 2 Чим відрізняється процес карбонітрації від ціанування?
- 3 При якій температурі проводиться карбонітрація?
- 4 Які зміцнювальні фази утворюються на поверхні при карбонітрації?
- 5 Які механічні властивості підвищуються після карбонітрації?
- 6 Яка оптимальна товщина карбонітрованого шару на різальному інструменті?
- 7 Назвіть склад ванни для воронування.
- 8 Назвіть склад ванни для карбонітрування.
- 9 Назвіть склад ванни для знежирення деталей перед карбонітрацією.
- 10 Які деталі рекомендується піддавати карбонітрації?
- 11 З якого сплаву рекомендовано виготовляти тигель ванни для розплаву карбідизації?
- 12 Навіщо розплав ванни для карбонітрації рекомендовано «продувати» повітрям?
- 13 Який тиск повітря використовується при «продуванні» розплаву?
- 14 Навіщо проводять воронування виробів після карбонітрації?
- 15 Як впливає розплав солей для карбонітрації на знеуглецювання поверхні деталей?
- 16 Як впливає водопоглинання солей, що застосовуються для карбонітрації, на стан розплаву?
- 17 Що застосовується для уловлювання масел для очищення повітря виробничої мережі?



18 Який приблизний час витримки при карбонітрації свердла Ø 15 мм?

19 Який приблизний час витримки при карбонітрації фасонних фрез Ø 40 мм?

20 Собівартість карбонітрації становить ...% вартості інструменту.

21 Яка зносостійкість карбонітрованого інструменту зі швидкорізальних сталей порівняно з інструментом без покриттів?

22 З яких сталей виготовляють прес-форми і ливарні форми для лиття під тиском кольорових сплавів і піддають карбонітрації?

23 Які фази утворюються з поверхні виробу при карбонітрації при температурі ~ 450-500<sup>0</sup>С?

24 Які фази утворюються з поверхні виробу при карбонітрації при температурі ~ 560-580<sup>0</sup>С?

25 Які температури карбонітрації вважаються оптимальними при обробці різального інструменту?

26 Які температури карбонітрації вважаються оптимальними при обробці штампуванням і ливарним оснащенням?

27 Яка товщина дифузійного шару при карбонітрації оснащення?

28 Що є карбюризатором при газовій карбонітрації у шахтних печах типу СШЦ?

29 Для інтенсифікації процесу карбонітрації у ціанатах для регенерації осаду ванни та його зневуглицьованої дії рекомендуються добавки...

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поляк М.С. Технология упрочнения. –Т.2. –М.: Машиностроение, 1995. – 828 с.

2. Термическая обработка в машиностроении: Справочник. /Под ред. Ю.М.Лахтина, А.Г.Рахштадта. –М.: Машиностроение, 1980. – 784 с.

Лабораторна робота 7  
«Вибір охолоджувальних середовищ під час гартування»  
(тривалість роботи – 4 год)

## **1 МЕТА РОБОТИ**

Вивчити вплив різних середовищ охолодження на загартовуваність і прогартовуваність сталей.

## **2 ОБЛАДНАННЯ І ПРИСТОСУВАННЯ**

- 2.1 Лабораторні муфельні печі – 3 шт.
- 2.2 Зразки з легованих і вуглецевих сталей.
- 2.3 Твердоміри ТК і ТП.
- 2.4 Шліфувально – полірувальні верстати.
- 2.5 Гартівні баки – вода, масло.
- 2.6 Солі  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KNO}_2$ .
- 2.7 Металеві тиглі.
- 2.8 Термопари і потенціометри.
- 2.9 Мікроскопи металографічні, МІМ-7 – 2 шт.

## **3 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Під час розроблення технологічного процесу термічної обробки щодо зміцнення деталей машин неабияку роль відіграє вибір охолоджувальних середовищ при гартуванні, забезпечуючи отримання заданих властивостей, структури, найменшої деформації і збереження геометричних параметрів виробу.

У процесі охолодження при термічній обробці охолоджувальні середовища змінюють свій стан внаслідок підвищення температури. У ряді випадків спостерігається проходження фізико-хімічних процесів, пов'язаних з випаровуванням середовища і зміною механізму процесу охолодження. Відповідно до цього охолоджувальні середовища можуть бути розділені на дві групи.

Для **першої групи** якісно процес охолодження виявляється незмінним від початку і до кінця. При охолодженні змінюються лише кількісні характеристики: температура тіла і середовища, внаслідок цього теплофізичні характеристики процесу. Процес охолодження описується плавною кривою (рис. 1 а).

До них належать розплавлені солі, розплавлені метали (температура кипіння яких в більшості випадків лежить вище за температуру нагрівання виробу під гартування); металеві плити і штампи, повітря та інші газоподібні гартівні середовища. Як видно з рис.1 гартівна здатність, інтенсивність відведення тепла від металевої поверхні плавно зменшується із зменшенням різниці температур між гартівним середовищем і гартівним виробом.

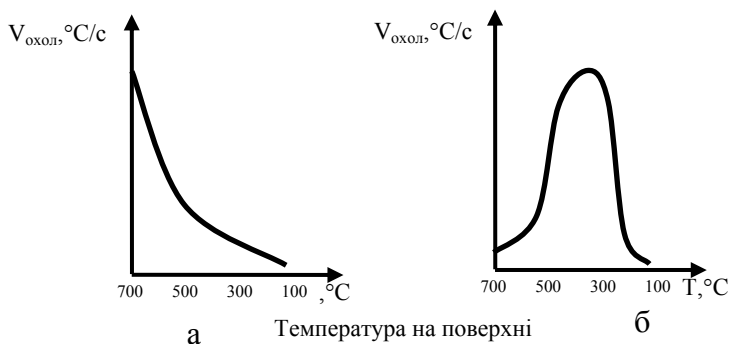


Рисунок 1- Швидкість охолодження залежно від температури середовища, що не має агрегатних змін (а) і що має агрегатні зміни (б)

Критерієм гартівної здатності вказаних вище середовищ є коефіцієнт тепловіддачі.

Відмінність у коефіцієнті тепловіддачі різних середовищ створює відповідну відмінність у швидкостях охолодження для всього температурного інтервалу охолодження.

**Друга група** характеризується зміною агрегатного стану середовища у зв'язку з кипінням. Утворення парової сорочки у момент занурення гарячого тіла в охолоджувальне середовище, що викликає сповільнене охолодження внаслідок малої швидкості тепловідведення (стадія плівкового кипіння). Руйнування парової сорочки призводить до контакту окремих обсягів охолоджувальної рідини з нагрітим тілом нерівномірності охолодження окремих його частин, при цьому рідина випаровується.

Випаровування об'ємів рідини (бульбашок), що безперервно подаються до охолоджувальної поверхні, пов'язане з поглинанням прихованої теплоти випаровування і призводить до інтенсивного охолодження (**стадія пазирчастого кипіння**).

При зниженні температури охолоджуваного тіла починається третя стадія – конвективного теплообміну (100-200<sup>0</sup>С), яка характеризується сповільненим охолодженням.

Подібний характер охолодження спостерігається при використанні середовищ, температура кипіння яких нижча за температуру охолоджуваного тіла (вода, водні розчини солей, лугів та ін.).

Для других гартівних середовищ немає певного критерію, оскільки не тільки температурне положення максимуму швидкості охолодження (рис. 1 б), але і сама залежність швидкості охолодження від температури різна для різних середовищ. Вибираючи середовище охолодження при гартуванні виробу, потрібно звернути особливу увагу на інтенсивність мартенситного перетворення саме для даної марки сталі.

Добре відомо, що кінетика мартенситного перетворення в сталі дуже слабо залежить від швидкості охолодження; а швидкість охолодження в мартенситному інтервалі від  $M_n$  і  $M_k$  істотно впливає на механічні властивості

загартованої невідпущеної сталі – надмірно інтенсивне охолодження в інтервалі мартенситного перетворення знижує рівень зміцнювальних властивостей. У зв'язку з вищесказаним потрібно прагнути до сповільненого охолодження в області,  $M_n - M_k$  менше виникає напружень, оскільки встигають проходити релаксаційні процеси. При виборі охолоджувальних середовищ необхідно пам'ятати, що для отримання структури мартенситу згідно з діаграмами ізотермічного перетворення аустеніту при гартуванні необхідно охолоджувати з більшою швидкістю в інтервалі температур 700-400°C і з меншою в інтервалі 300-100°C. Сповільнене охолодження в інтервалі 300-100°C зменшує гартівні напруги, а відповідно утворення тріщин і деформацій виробу.

При виборі гартівних середовищ потрібно враховувати ці явища. Залежність значення тимчасового опору загартованої сталі У10 від швидкості охолодження у мартенситному інтервалі температур подана на рис 2.

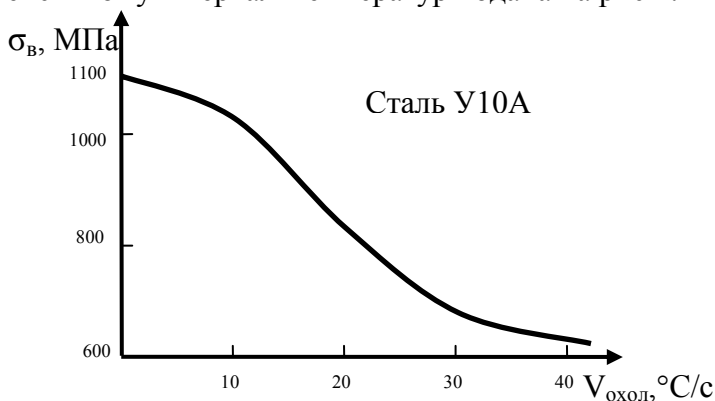


Рисунок 2 - Залежність  $\sigma_b$  від швидкості охолодження при гартуванні

Охолоджувальні середовища для гартування залежно від складу і властивостей охолоджуваної речовини підрозділяються на такі групи:

- вода і водні розчини;
- масла;
- розплави солей і лугів;
- повітря;
- водоповітряні суміші;
- розплавлені метали і сплави;
- синтетичні гартівні середовища;
- охолодження в швидкорухомому потоці води та ін.

### **3.1 Коротка характеристика гартівних середовищ**

#### **3.1.1 Вода і водні розчини**

Вони відрізняються високою інтенсивністю охолодження в області підвищених температур (400-700°C), високою швидкістю охолодження в області мартенситного перетворення. Це негативно позначається на міцності загартованої сталі і характеризується значною нерівномірністю охолодження, що є причиною деформації і тріщинотворювань, особливо у великих виробках.

Різні добавки можуть збільшити або зменшити охолоджувальну здатність водних розчинів.

Дані про гартівну здатність водних розчинів у порівнянні з чистою водою наведені у табл. 1.

З таблиці видно, що підвищення температури води призводить до зниження значення коефіцієнта гартівної здатності. Крім того, всі домішки, за винятком фосфорної кислоти, водомасляної емульсії і мильної води, збільшують цей коефіцієнт.

Відомо, що вода з різних джерел має різну гартівну здатність, дощова вода «гартує» слабше, ніж річкова; те саме можна сказати і щодо дистильованої води і звичайної водопровідної. Ці відмінності в гартівній здатності води пояснюються її різним складом – різною газонасиченістю і різним вмістом різних розчинених домішок.

Таблиця 1 – Коефіцієнт гартівної здатності води і середовищ на її основі

| Охолоджувальне середовище              | 720 - 1050°C | 200°C | Охолоджувальні середовища (10% розчини у воді) | 720 - 1050°C | 200°C |
|--|--------------|-------|--|--------------|-------|
| Вода при температурі, °C               |              |       | Кухонна сіль                                   | 1,96         | 0,98  |
|  |              |       | Вуглекислий натрій                             | 1,38         | 1,09  |
| 0°C                                    | 1,06         | 1,02  | Сірчана кислота                                | 1,22         | 1,49  |
| 20°C                                   | 1,00         | 1,00  | Фосфорна кислота                               | 0,99         | 1,07  |
| 25°C                                   | 0,72         | 1,11  | Водомасляна емульсія                           | 0,11         | 1,33  |
| 100°C                                  | 0,044        | 0,71  | Мильна вода                                    | 0,077        | 1,160 |
| Хлористий літій 10% в H <sub>2</sub> O | 2,07         | 1,04  |  |              |       |
| Їдкий натрій 10% в H <sub>2</sub> O    | 2,06         | 1,36  |  |              |       |

Усі нерозчинні у воді домішки, тобто речовини, що створюють суміші типу суспензії (тверді частинки) та емульсії (рідкі нерозчинні крапельки), а також гази, що містяться у воді, і повітря збільшують число центрів пароутворення, збільшують стійкість парової плівки і, отже, знижують критичну температуру переходу від плівкового до пазирчастого процесу охолодження. У результаті цього температурний інтервал першої стадії розширюється, а інтервал другої стадії звужується і, отже, ці домішки у воді зменшують її гартівну здатність. Навпаки, розчинні у воді домішки (солі, кислоти, луги) зменшують стійкість парової сорочки, підвищують температуру переходу від першої до другої стадії охолодження й у результаті підсилюють гартівну здатність води.

Так, наприклад, добавка 1% кухонної солі до води розширює інтервал другої стадії з 400–100 до 500–100°C, а

при 10% у воді перша стадія відсутня (рис. 3 б). Максимальна швидкість охолодження, що досягає 2500°/с при 500–600 °С, виходить у водних розчинах з 10–15% NaCl або 15-30% NaOH. Вища концентрація цих солей веде до уповільнення охолодження, але все-таки розчин з 50% NaOH охолоджує швидше, ніж вода (рис.3 в), не тільки при температурі 20°, але і при температурі 96°.

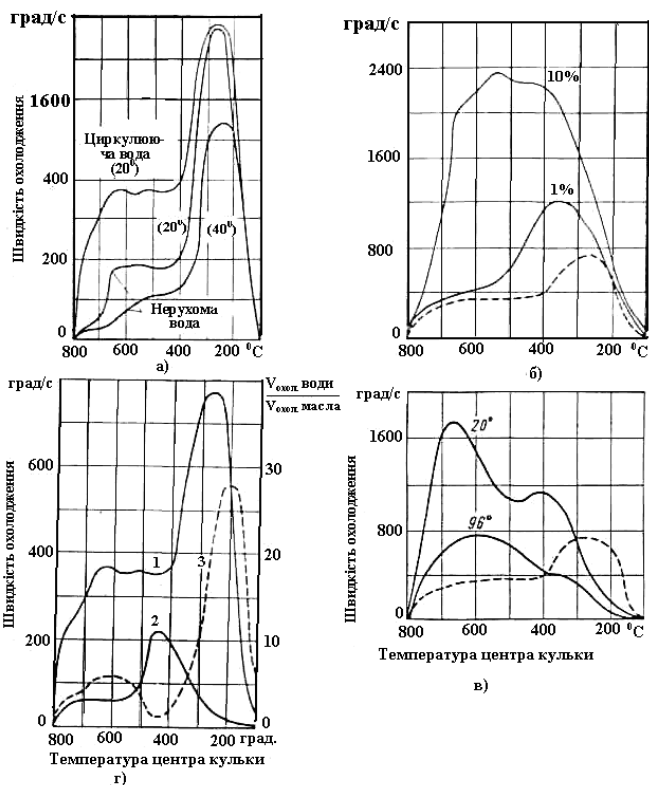


Рисунок 3 - Швидкість охолодження центра срібної кульки:  
 а – вплив температури і циркуляції води; б – вплив розчинення у воді 10% кухонної солі (пунктирна лінія – чиста вода); в – охолодження у 50% водному розчині NaOH при 20 і 96° (пунктирна лінія – чиста вода при 20°); г – охолодження у воді (1) і маслі (2) (пунктирна лінія – співвідношення швидкостей охолодження)



На сьогодні застосовують на практиці висококонцентровані розчини їдких лугів у воді (30–60%), так званий «каустик». Температура гартівного середовища підтримується на рівні 80 - 120°. Гартівна здатність цих середовищ не нижча, ніж води. Застосування цих середовищ зменшує брак щодо тріщин і викривлення і робить вироби чистішими, оскільки окалина підбурюється в гарячому лужному розчині під час гартівного охолодження.

Швидкість охолодження сталі в різних гартівних середовищах подана у таблиці 2.

Таблиця 2 - Швидкість охолодження сталі у різних середовищах

| Охолоджувальне середовище  | Швидкість охолодження<br>C/c в інтервалі температур,<br>°C |           |
|--|--|-----------|
|  | 550 - 650  | 200 - 300 |
| При температурі, °C: 18  | 600  | 270       |
| 28   | 500  | 270       |
| 50   | 100  | 270       |
| 74   | 30   | 200       |
| 10% розчин їдкого натру при 18°C   | 1200   | 300       |
| 10% розчин кухонної солі при 18°C  | 1100   | 300       |
| 10% розчин сірчаної кислоти при 18°C   | 750  | 300       |
| Дистильована вода  | 250  | 200       |
| Емульсія масла у воді  | 70   | 200       |
| Мильна вода  | 30   | 200       |
| Мінеральне машинне масло   | 150  | 30        |
| Трансформаторне масло  | 120  | 25        |
| Сплав 75 %Sn + 25%Cd   | 450  | 50        |
| Мідні плити  | 60   | 30        |
| Залізні плити  | 35   | 15        |
| Содовий силікат натрію(15% Na <sub>2</sub> O, 35% SiO <sub>2</sub> , інше H <sub>2</sub> O): розчин концентрацій,<br>% : 5 | 200  | 100       |
| 10   | 170  | 100       |
| 15   | 100  | 60        |
| 20   | 70   | 60        |
| 25   | 70   | 50        |

Не знижуючи гартівної здатності води, добавка марганцевокислого калію (~5%) зменшує брак щодо тріщин і викривлення. Припускається, що домішки до води  $KMnO_4$  не знижують швидкості охолодження у верхньому інтервалі температур, але знижують для нижнього інтервалу температур вода з перенесенням у масло.

### 3.1.2 Масла

Ця група охолоджувальних середовищ характеризується зниженою в порівнянні з водою і водними розчинами швидкістю охолодження в інтервалі температур мартенситного перетворення і застосовується для сталей із зниженою критичною швидкістю гартування, тобто при термічній обробці легованих сталей або малогабаритних виробів з вуглецевих сталей. Перелік вживаних масел наведений у табл. 3.

Таблиця 3 – Гартівна здатність технічних масел

| Гартівне масло             | Температура спалаху, °C | Гартівна здатність при температурі 20°C стосовно води |
|----------------------------|-------------------------|---|
| Індустріальне:<br>I – 12 А | 165                     | 0,35  |
| I – 20 А                   | 170                     |   |
| I – 30 А                   | 180                     |   |
| I – 40 А                   | 190                     |   |
| I – 40 А                   | 200                     |   |
| Трансформаторне            | 155                     | 0,22  |
| Машинне                    | 207                     | 0,17  |
| Парафінове                 | 163                     | 0,22  |
| Циліндрове                 | 215                     | 0,20  |

Охолоджувальна здатність гартівних масел визначається їх в'язкістю, тому підвищення температури масла

зменшує їх в'язкість і збільшує інтенсивність охолодження.

Недоліком масел як гартівних середовищ є те, що у процесі експлуатації від нагрівання й охолодження масло окислюється, взаємодіючи з гарячим металом і його оксидами. Для відновлення гартівних характеристик масло спеціально обробляють і додають (освіжають) новими порціями масла.

Для отримання світлого гартування використовують авіаційні масла типу МС 20 або суміші авіаційного і вазелінового масла з температурою спалаху 330-360°C, при цьому нагрівання виробів ведеться в контрольованій атмосфері печі.

Для підвищення якості масел, стійкості проти окислення до них додають спеціальні добавки - інгібітори. Як інгібітори застосовують 0,01 – 0,1% амідифенолу, спеціальні присадки ЦАТИМ| – 330 і 331 та ін.

Водні розчини і масла є найбільш поширеними охолоджувальними середовищами.

У таблиці 4 зіставлені середні швидкості охолодження води і масла у різних інтервалах температур.

Таблиця 4 – Швидкості охолодження масел при різних температурах

| Температура нагрівання, °С | Охолоджувальне середовище | Середня швидкість охолодження С/с в інтервалі температур, °С |         |         |         |
|----------------------------|---------------------------|--|---------|---------|---------|
|                            |                           | 700-200  | 700-500 | 300-200 | 200-100 |
| 1100                       | Спокійна вода             | 130  | 90      | 120     | 40      |
| 1000                       | Спокійне масло            | 14   | 20      | 8,3     | 6,2     |

З таблиці виходить, що загартовуваність, яка визначається швидкістю охолодження, значно більша у воді (700-200°C). У той же час значне уповільнення в районі

мартенситного перетворення (300-150°C) показує перевагу гартування в маслі.

Інтенсивність охолодження визначається, крім фізичних властивостей охолодження, інтенсивністю руху охолоджувального середовища. З даних таблиці 5 випливає, що перехід від спокійного до бурхливого руху гартівного середовища збільшує інтенсивність охолодження у воді і маслі приблизно в 4 рази.

Таблиця 5 – Інтенсивність охолодження у різних гартівних середовищах

| Рух середовища або виробу   | Повітря | Масло       | Вода      | Солоня вода |
|-----------------------------|---------|-------------|-----------|-------------|
| Без руху                    | 0,2     | 0,25 – 0,30 | 0,9 – 1,0 | 2           |
| Слабкий рух                 |         | 0,30 – 0,35 | 1,0 – 1,1 | 2,0 – 2,2   |
| Рух середньої інтенсивності |         | 0,35 – 0,40 | 1,2 – 1,3 |             |
| Енергійний рух              |         | 0,40 – 0,50 | 1,4 – 1,5 |             |
| Сильний рух                 |         | 0,50 – 0,80 | 1,6 – 2,0 |             |
| Бурхливий рух               |         | 0,8 – 1,1   | 4,0       |             |

Набуття високого комплексу механічних властивостей визначається температурою кінця охолодження в гартівному середовищі.

Для того щоб повідомити рух гартівному середовищу гартівні баки забезпечують її барбатацію, за відсутності якої необхідне інтенсивне переміщення у гартівному середовищі гартованої деталі термістом. При розробленні технологічного процесу термічної обробки тривалість охолодження виробів великих перетинів у охолоджувальних середовищах при гартуванні можна користуватися таблицею 6.

Масло як гартівне середовище застосовується достатньо широко, тому що умови охолодження у маслі істотно відрізняються від умов охолодження у воді.

Таблиця 6 – Тривалість охолодження (у хв) при гартуванні у воду і масло

| Охолоджувальне середовище | Максимальний перетин виробу, мм |           |           |           |           |
|---------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                           | до 200                          | 200 - 400 | 400 - 600 | 600 - 800 | 800 -1000 |
| Масло                     | 30 - 70                         | 70 - 120  | 120 - 180 | 180 - 240 | 240 – 300 |
| Через воду в масло:       |                                 |           |           |           |           |
| Вода                      | 1 - 3                           | 3 - 4     | 4 - 6     | 6 - 8     | 8 – 10    |
| Масло                     | 20 - 50                         | 50 - 90   | 90 - 140  | 140 - 200 | 200 – 250 |

У минулому сторіччі застосовувалися рослинні олії. У даний час застосовуються як гартівні середовища винятково мінеральні масла. Механізм дії масла, як рідини, що знає в інтервалі температур, що цікавить нас, агрегатна зміна (кипіння), таке саме, як і води, але температурні інтервали переходу від першої до другої і від другої до третьої стадії інші, ніж у води; цим у першу чергу потрібно пояснити відмінність у гартівній дії води і масла. Стійкість газової плівки масла втрачають при 500-400°; ця температура і характеризує температуру переходу від першої до другої стадії охолодження. Температура кипіння масла лежить при 200-400° (залежно від сорту), що також визначає температуру переходу від пузирчастого кипіння до конвективного теплообміну.

Для інтервалу охолодження 550-650°С температури охолоджувальної води, а так само добавки у воду кислот і солей сильно впливають на швидкість охолодження. Але для інтервалу 200-300° всі ці фактори не мають суттєвого впливу на швидкість охолодження. Масло недостатньо швидко охолоджується при 550-650°С, тому гартування у масло переважно проводять лише легованих сталей. Високовуглецеві сталі розжарюють на мартенсит у маслі перетином до 5-6 мм.

Масло приблизно в 10 разів повільніше охолоджує при 200–300°С. Масло повільніше охолоджує внаслідок

меншої прихованої теплоти пароутворення. У виробі виникає менше гартівних напружень.

**На відміну від води гартівна здатність масла мало залежить від температури;** криві швидкості охолодження температури поверхні для масла з різною температурою (від 20 до 100°C) практично збігаються.

У процесі роботи масло загусає і його гартівна здатність (швидкість охолодження в районі температур 500 - 200°C) починає знижуватися. Подібне зниження гартівної здатності спостерігається після гартування виробу вагою, що перевищує 10 ваг масла.

Різні сорти масла відрізняються один від одного в'язкістю і гартівною здатністю. Масла зниженої в'язкості володіють підвищеною гартівною здатністю. Для отримання стабільних результатів необхідно користуватися одним сортом масла і своєчасно проводити його зміну і регенерацію.

Гарячі масла для ступінчастого або ізотермічного гартування застосовуються рідко внаслідок вузького інтервалу робочих температур (допустиме нагрівання до 150-250°C, залежно від сорту масла), небезпеки перегріву масла під час роботи і займання та слабкої гартівної їх здатності.

Для отримання структури мартенсит у вуглецевих сталях швидкість охолодження в маслі недостатня у зв'язку з малим інтервалом найменшої стійкості аустеніту  $X_1$  (рис.4).

У легованих сталях С – подібна крива зсовується вправо (пунктиром), інтервал найменшої стійкості аустеніту  $X_2$  збільшується. Леговані сталі охолоджують у маслі або інших середовищах з меншою швидкістю охолодження, ніж у води. У виробі виникає менше гартівних напружень - менше деформацій виробу, менше можливості утворення тріщин.



Рисунок 4 - Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту

Вуглецеві сталі із вмістом вуглецю  $> 0,5 - 0,7\%$  рекомендується охолоджувати через воду в масло. Переносити в масло, коли виріб у воді охолоне до температур  $400 - 450^{\circ}\text{C}$ , тобто коли пройдений інтервал найменшої стійкості аустеніту ( $X_1$ ).

### 3.1.3 Розплави солей і лугів

Розплави солей і лугів застосовують для здійснення гартування у гарячих середовищах і достатньо широко використовують при термічній обробці деталей машин та інструменту.

У ряді випадків застосування цих середовищ дозволяє одержувати вищий комплекс механічних властивостей і світлу поверхню. Охолодження при гартуванні в гарячі середовища забезпечують ступінчасте або ізотермічне гартування. Для отримання зазначених середовищ використовують натрієву і калієву солі та лугу.

У таблиці 7 подані склади гартівних середовищ для ступінчастого й ізотермічного гартування.

Після гартування в їдких лугах і промивки у воді виробу одержують сріблястий або світлий колір, якщо нагрівання під гартування проводилося в розплаві солей або захисній атмосфері; тобто охолодження в лугах забезпечує так зване світле гартування.

Розплави їдких лугів хімічно нейтральні щодо розжареного металу.

Їдкі луги інтенсивно розчиняють у собі воду. Відносно малі добавки води 2-5% різко змінюють гартівну здатність розплаву і температуру його застосування (ї мало залежать від співвідношення NaOH і KOH) від 110-250°C, що дає можливість проводити гартування на мартенсит високовуглецевих сталей.

Таблиця 7 – Склад гартівних середовищ для ступінчастого та ізотермічного гартування

| Склад суміші, %  | Температура плавлення, °C | Температура застосування, °C |
|--|---------------------------|------------------------------|
| 1 NaNO <sub>2</sub>  | 317                       | 325 – 550                    |
| 2 NaNO <sub>3</sub>  | 271                       | 300 – 550                    |
| 3 KNO <sub>2</sub>   | 297                       | 325 – 550                    |
| 4 KNO <sub>3</sub>   | 337                       | 350 – 550                    |
| 5 45 NaNO <sub>3</sub> + 55 KNO <sub>3</sub>   | 220                       | 230 – 550                    |
| 6 45 NaNO <sub>2</sub> + 55 KNO <sub>3</sub>   | 137                       | 155 – 550                    |
| 7 50 NaNO <sub>3</sub> + 50 KNO <sub>2</sub>   | 143                       | 160 – 550                    |
| 8 50 NaNO <sub>2</sub> + 50 KNO <sub>3</sub>   | 225                       | 280 - 550                    |
| 9 25 KNO <sub>3</sub> + 75 NaNO <sub>3</sub>   | 240                       | 380 - 540                    |
| 10 75 NaOH + 25 NaNO <sub>3</sub>  | 280                       | 420 – 540                    |
| 11 35 NaOH + 65 KOH  | 150                       | 170 – 250                    |
| 12 20 NaOH + 80 KOH + 6 H <sub>2</sub> O   | 130                       | 150 - 250                    |
| 13 37 NaOH + 63 KOH  | 159                       | 180 - 350                    |
| 14 45NaNO <sub>3</sub> + 27,5 NaNO <sub>2</sub> + 27,5 KNO <sub>3</sub>                    | 120                       | 240 - 260                    |
| 15 53 KNO <sub>3</sub> + 40 NaNO <sub>2</sub> + 7 NaNO <sub>3</sub> + 2-3 H <sub>2</sub> O | 100                       | 110 - 125                    |

Гартування в розплаві селітри призводить до деякого окислення поверхні на невелику глибину, що видаляється з поверхні піскоструминною обробкою або витравлюванням.



Після гартування в розплави солей і лугів потрібна промивка виробів від складових розплаву.

### **3.1.4 Повітря**

Повітря при гартуванні на мартенсит використовується лише для високолегованих сталей типу швидкорізальних, інструментальних (X12, X12Ф1 та ін.) сталей ледебуритного класу.

Охолодження може бути у спокійному повітрі або повітряним струменем під тиском 3-6 кгс/см<sup>2</sup>. Але необхідно пам'ятати, що при гартуванні різального інструменту із швидкорізальних сталей на повітрі знижується теплостійкість інструменту на 20-40°C.

### **3.1.5 Повітряні суміші**

Використання таких середовищ особливо важливе при гартуванні великогабаритних виробів, наприклад, багатотонних штампів гарячого штампування, лопастей роторів великих насосів й ін.

Охолодження у воді за допомогою підйомних механізмів призводить до деформацій і появи тріщин; гартування у маслі не дозволяє одержати необхідну твердість і вимагає великих об'ємів масла.

Позитивні результати дає охолодження водоповіряними сумішами, які одержують шляхом розпилювання води за допомогою повітря через спеціальні форсунки.

У цьому випадку можна регулювати швидкість охолодження, яка залежить від витрати води і тиску повітря.

### **3.1.6 Розплавлені метали і сплави**

Вони застосовуються дуже рідко: звичайно при ізотермічному гартуванні. Наприклад, при патентуванні дроту застосовується розплавлений свинець.

Розплавлені метали як дефіцитні й дорогі використовуються у виняткових випадках. Недолік гартування в ро-

зплави металів прилипання їх до виробу, що вимагає їх подальшого відокремлення і дає великий відхід металу.

Склад і властивості металевих охолоджувальних середовищ подані у таблиці 8.

Таблиця 8 – Склад і властивості металевих охолоджувальних середовищ

| Склад, %           | Температура, °С |            |
|--------------------|-----------------|------------|
|                    | плавлення       | робоча     |
| Pb                 | 327             | 330 - 930  |
| 63 Sn + 37 Pb      | 183             | 190 - 350  |
| Sn                 | 232             | 240 - 1000 |
| 32,55 Sn + 65,7 Pb | 225             | 240 - 400  |
| 91 Sn + 9 Pb       | 200             | 210 - 400  |
| 15 Sn + 85 Pb      | 280             | 300 - 500  |
| 75 Sn + 25 Pb      | 180             | 200 - 400  |

### 3.1.7 Синтетичні гартівні середовища

Синтетичні гартівні середовища складають особливий новий клас охолоджувальних середовищ. Спеціальні добавки органічного походження дозволяють змінювати охолоджувальні властивості води у широкому діапазоні.

До зазначених добавок належать: поліанкіленгліколь, полівініловий спирт, металцелюлоза, ефір, гліцерин, аквапласт та ін. Синтетичне гартівне середовище – аквапласт дозволяє одержувати інтенсивності охолодження середні між водою і маслом. Аквапласт містить разом з розчищеною пластмасою антикорозійну добавку. Звичайна концентрація її у воді - 0,6 %. Застосування аква-пласта усуває тріщиноутворення при гартуванні.

Для гартування великих складних деталей рекомендується гартівна рідина на основі глікольполіалкенів, що забезпечує стабільність геометричних параметрів виробу.

Як гартівне середовище також рекомендується використання водного розчину полівінілового спирту (15,28%) з антиадгезійною добавкою (0,4%), просоченою добавкою

(0,4%), решта – вода. Застосування цієї рідини дозволяє одержати корисне поєднання швидкостей охолодження: високу в перлітній і малу в області мартенситного перетворення.

Застосування синтетичних гартівних середовищ – новий і перспективний напрямок розвитку технології термічної обробки сталей і сплавів.

### **3.2.8. Охолодження у швидкорухомому потоці води**

Останнім часом набуває все більшого поширення при гартуванні охолодження швидкорухомим потоком води. Гартована деталь поміщається у закриту камеру, в якій вона омивається потоком води, що рухається зі швидкістю 15–20 м/с; при цьому в камері створюється надмірний тиск (1-2 кгс/см<sup>2</sup>).

Зазначений спосіб може застосовуватися як для легованих, так і для всіх видів вуглецевих сталей, забезпечуючи високі зміцнювальні властивості й відсутність гартівних тріщин.

## **4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ**

Робота проводиться групами студентів по 5-6 осіб.

4.1 Підготувати зразки  $\varnothing 20$  мм з таких марок сталей: 20, 45, У8, У10А, 40ХН, 12Х2Н3А, 45ХНМ, ХВГ.

4.2 Призначити температури гартування зазначених сталей.

4.3 Провести нагрівання під гартування і провести охолодження у таких гартівних середовищах:

4.3.1 Вода 20<sup>0</sup>С

Вода 80<sup>0</sup>С

Вода 20<sup>0</sup>С + 10% NaCl;

4.3.2 Масло 20<sup>0</sup>С

Масло 80<sup>0</sup>С;

4.3.3 Розплав 55% KNO<sub>3</sub> + 45% NaNO<sub>2</sub> з температурою 150С;

4.3.4 Один з розчинів синтетичного гартівного середовища.

4.3.5 Охолодження на повітрі.

4.4 Зачистити лиски на зразках і заміряти твердість по HRC.

4.5 За результатами роботи побудувати графіки за такою формою (рис.5) для кожної марки сталі. Наприклад:

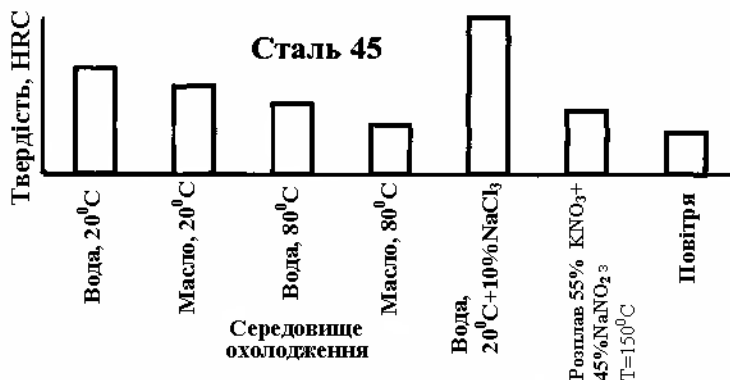


Рисунок 5 – Графік залежності твердості сталі HRC від середовища охолодження при гартуванні

4.6 За результатами роботи зробити висновки.

## 5 ПИТАННЯ ДЛЯ ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЮ

1 На які дві групи підрозділяються охолоджувальні середовища, що використовуються при гартуванні сталей?

2 Які стадії охолодження проходить виріб при гартуванні у воді і водних розчинах?

3 Як змінюється якісно процес охолодження в гартівних середовищах першої групи?

4 Чим характеризуються охолоджувальні середовища другої групи?

5 Яка приблизно температура пузирчастого кипіння у воді та водних розчинах?

6 У скільки разів інтенсивність охолодження в маслі менша в порівнянні з проточною водою при 18 °С?

7 Що є критерієм гартівної здатності охолоджувальних середовищ першої групи?

8 Що є критерієм гартівної здатності охолоджувальних середовищ другої групи?

9 Назвіть приблизно температуру інтервалу мартенситного перетворення ( $M_n$  і  $M_k$ ) сталі 40.

10 Назвіть приблизно температуру інтервалу мартенситного перетворення ( $M_n$  і  $M_k$ ) сталі ХВГ.

11 Як називається третя стадія охолодження при гартуванні сталей у воду і водні розчини?

12 Що таке інтервал найменшої стійкості аустеніту?

13 У яких сталей інтервал найменшої стійкості аустеніту дозволяє проводити гартування в масло?

14 Вкажіть криву залежності  $\sigma_b$  від швидкості охолодження при гартуванні в мартенситному інтервалі температур.

15 Які сталі можна піддавати гартуванню на мартенсит при охолодженні на повітрі?

16 Що таке патентування сталі?

17 У якого охолоджувального середовища для гартування сталей коефіцієнт гартівної здатності прийнятий за одиницю?

18 Чому вуглецеві сталі із вмістом вуглецю  $> 0,5\%$  для одержання з мікроструктури мартенситу рекомендовано при гартуванні охолоджувати через воду в масло?

19 При якій температурі виробу з вуглецевої сталі під час гартування після охолодження у воді переносять в масло?

20 Чим відрізняються технічні масла, використовувані для охолодження при гартуванні один від одного?

21 Чи залежить охолоджувальна здатність масел від температури?

22 При якій температурі води вона володіє найбільшою інтенсивністю гартування?

23 Для того щоб забезпечити гартування об'ємних багатотонних деталей, необхідно у гартівному баку мати масла ... ваг виробу.

24 Вкажіть інтервал температури кипіння масел, вживаних для охолодження виробів при гартуванні.

25 Яка швидкість охолодження води 18°C в інтервалі температур 550–650°C?

26 Яка швидкість охолодження води з добавкою 10 %NaCl?

27 У скільки разів менше інтенсивність охолодження при гартуванні у дистильованій воді у порівнянні з проточною?

28 Яка швидкість охолодження в інтервалах температур 550–650°C і 200–300°C між мідними плитами?

29 Вкажіть у якої сталі У8 або ХВГ більше інтервал найменшої стійкості аустеніту?

30 Вкажіть криву швидкості охолодження при гартуванні сталей в охолоджувальні середовища другої групи.

31 У скільки разів повільніше охолоджують масло при температурі 200–300°C?

32 Яка швидкість охолодження в інтервалі температур 550–650°C і 200–300°C між залізними плитами?

33 Назвіть розплав складу солей, що забезпечують гартування при температурі 110°C і 150°C.

34 Які охолоджувальні середовища забезпечують проведення світлого гартування?

35 Вкажіть приблизний інтервал гартівних температур розплавів солей натрію і нітриту натрію та калію?

36 Які недоліки охолоджувальних середовищ – розплавів нітратів і нітриту натрію та калію?

37 Що негативне в охолодженні швидкорізальних сталей при гартуванні на повітрі?

38 Гартування дроту в розплаві свинцю називають ....

39 Водоповітряні гартівні суміші застосовують переважно.....

40 Назвіть добавки у синтетичних гартівних середовищах.

41 Які переваги в порівнянні з іншими охолоджувальними середовищами властиві синтетичним охолоджувальним середовищам?

42 Застосування аква-пласта у синтетичних гартівних середовищах усуває...

43 Синтетичні гартівні середовища займають проміжне положення між...

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. -М.: Машиностроение, 1980. – 495 с.

2. Термическая обработка в машиностроении: Справочник /Под ред. Ю.М.Лахтина, А.Г.Рахштата. -М.: Машиностроение, 1980. – 784 с.

## ЗАВДАННЯ

для виконання контрольної роботи або обов'язкового домашнього завдання для заочників

**1** Вибрати марку сталі та розробити технологію локального зміцнення свердла діаметром 20 мм, довжиною 200 мм. Твердість робочої частини HRC 60-64, хвостовика HRC 40-45. Описати перетворення у сталі різальної частини свердла при нагріванні та охолодженні.

**2** Вибрати марку сталі для виготовлення гільзи циліндра насоса, що перекачує нафтопродукти, і призначити термічну обробку внутрішньої її частини до твердості HRC 62-64. Розробити технологічну карту термічної обробки. Розробити ескіз приладу, що забезпечує нагрівання.

**3** Вибрати марку сталі для виготовлення матриці штампу вирубки пластин трансформаторного заліза  $t = 0,35$  мм зі зміцненням різальних кромок до HRC 68-72. Розробити технологічну карту термічної обробки; описати фізичні процеси, що проходять при поверхневому зміцненні різальної частини матриці.

**4** Вибрати марку сталі для виготовлення випускного клапана двигуна внутрішнього згорання і зміцнювальну термічну обробку робочої частини до твердості HV  $\sim 1600$ . Розробити технологічну карту термічної обробки; описати всі можливі методи, що забезпечують вказану твердість.

**5** Вибрати марку сталі для виготовлення протяжки і зміцнювальну термічну обробку на твердість робочої частини HRC 60-64, хвостовика HRC 40-45. Розробити технологічну карту термічної обробки. Описати процес нагрівання протяжки у розплаві солей.



**6** Вибрати марку сталі для виготовлення ножа для роботи по дереву; довжина ножа 80, товщина 5, ширина 60 мм. Твердість робочої частини HRC 58-62, хвостовика HRC 30-32. Розробити технологічну карту термічної обробки. Спроекувати схему приладу, що забезпечує нагрівання при гартуванні робочої частини ножа.

**7** Вибрати марку сталі для виготовлення ведучої шестерні IV передачі коробки передач автомобіля ЗАЗ з модулем 4 мм. Зміцнити за контуром зуба на глибину 2 мм. Твердість робочої частини HRC 60-62, серцевини HRC 28-32. Розробити технологічну карту термічної обробки. Розробити й описати схему приладу для нагрівання шестерні.

**8** Систематизувати методи поверхневого пластичного деформування. Описати мікроструктуру і властивості поверхневого шару після ППД. Переваги і недоліки статистичних методів ППД. Призначення методів ППД стосовно конкретних деталей машин.

**9** Описати технологію, можливості, переваги і недоліки лазерного гартування; мікроструктуру і властивості поверхневого шару.

**10** Підібрати марку сталі для виготовлення колінвалу вантажного автомобіля вантажопідйомністю 10 т. Розробити технологічний процес локальної термічної обробки корінних і шатунних шийок валу на глибину 0,5 мм з мікротвердістю HV 650-850.

**11** Підібрати марку сталі для виготовлення великомодульної шестерні Ø 280 мм (т.14). Розробити прогресивний процес термічної обробки для зміцнення контуру зубів шестерні. Описати мікроструктуру і властивості серцевини зуба і поверхневого загартованого шару.

**12** Вибрати марку сталі для виготовлення прокольних пилок по дереву. Пилки повинні мати зносостійкість і пружність; HRC 50-54. Розробити процес термічної обробки робочої частини пилки. Описати структуру і властивості зміцнювального шару; ескіз приладу для локальної обробки.

**13** Ножі та пилки гарячого різання металу, що працюють в умовах підвищеного зношування при нагріванні до температури 500-600<sup>0</sup>С і значних динамічних навантажень. Вибрати марку сталі для виготовлення зазначеного інструменту. Розробити технологічний процес локального термічного зміцнення. Описати структуру та властивості до і після термічної обробки.

**14** Підібрати марку сталі для виготовлення гільзи циліндра установки для лиття під тиском. Розробити технологічний процес зміцнення внутрішньої поверхні циліндра, забезпечити окалинотійкість поверхні до 900-950<sup>0</sup>С. Описати мікроструктуру і властивості металу до і після термічної обробки.

**15** Шнекове свердло діаметром 20 мм, довжиною 600 мм має забезпечувати пряmolінійність свердління, володіти достатньою міцністю згину. Вибрати марку сталі і розробити технологічний процес зміцнення робочої і хвостової частин свердла. Описати структуру та властивості сталі до і після термічної обробки.

**16** Призначити марку сталі або чавуну для виготовлення шнекового валу м'ясорубки. Розробити технологічний процес локального зміцнення шнека, забезпечити зносостійкість і антикорозійні властивості. Описати мікроструктуру і властивості.

**17** Вибрати марку сталі та розробити технологію локального зміцнення і корозійної стійкості ножа м'ясорубки. Описати технологію зміцнення, мікроструктуру і властивості. Розробити технологічну карту процесу.

**18** Вибрати марку сталі для виготовлення ланок ланцюга конвеєрної гартівної печі, яка працює при температурах 850-900<sup>0</sup>С. Розробити технологічний процес зміцнення ланок ланцюга, що забезпечить окалиностійкість і жароміцність конвеєра. Описати мікроструктуру і властивості.

**19** Розробити технологічний процес термічної обробки ротора гідротурбіни Ø 3,0 м після локального зварювання для зняття напруг і вирівнювання мікроструктури і механічних властивостей. Описати обладнання і методику, що забезпечить локальність обробки.

**20** Вибрати марку сталі для виготовлення залізничної рейки; розробити технологічний процес локального зміцнення головки і підшови рейки. Описати мікроструктуру і властивості. Розробити технологічну карту процесу.

**21** Вибрати марку сталі для виготовлення коксової камери висотою 28,0 м для коксування кам'яного вугілля, за периметром якої проводиться зварювання складових її частин в 6 зварювальних зонах. Описати локальну термічну обробку зварювальних швів для зняття напружень, описати можливі способи термообробки, будову нагрівачів.

**22** Вибрати марку сталі для виготовлення залізничної рейки. Розробити технологічну карту локального термічного зміцнення кінців головки рейки. Описати методику зміцнення обладнання і прилади. Дати схему будови індуктора.

**23** Вибрати марку сталі для виготовлення прес-форми з пресування порошків твердих сплавів ВК8, ВК6. Розробити технологічний процес локальної зміцнювальної обробки внутрішньої камерної зони прес-форми. Описати методику проведення процесу, склад суміші й властивості поверхневого шару. Вказати твердість робочої поверхні прес-форми.

**24** Вибрати марку сталі для виготовлення ножа для різання цукрового буряка. Розробити технологічний процес локального зміцнення леза ножа. Описати можливі способи зміцнення робочого органу; їх переваги і недоліки. Описати мікроструктуру і властивості хвостової і робочої частин ножа після термообробки.

**25** Призначити марку сталі і зміцнювальну термічну обробку поршня машини лиття під тиском сплаву Бр. ОФ 10-1,5. Розробити технологічну карту термообробки, забезпечивши мікротвердість HV 1500 і високі антикорозійні властивості при температурі до 900<sup>0</sup>С. Описати структуру і властивості.

Типові режими термічної обробки марок конструкційної сталі, що використовуються, наведені у таблиці.

| Марка сталі | Попередня термічна обробка поковок (відливки); твердість HB   | Остаточна термічна обробка  |
|-------------|---|---|
| 1           | 2   | 3   |
| 40          | 1 H, 840-8600; ~207<br>1a H, 900-9500; 163-167<br>2 З, 830-8500. в<br>O, 540-580°; 228-203<br>580-640°; 228-192<br>640-680°; 195-170                | 3, 830-850°, в<br>O, 300-400°; HB 444-364<br>O, 400-450°; HB 415-321<br>O, 510-550°; HB 286-241<br>540-580°; HB 228-203<br>580-640°; HB 203-192 |
| 45          | 1 H, 850-870°; ~217<br>2 З, 820-340°; у<br>O, 540-580°; 269-228<br>580-640°; 228-192<br>640-680°; 192-170   | 3, 810-830°, в або 840°, м;<br>O, 510-560°; HB 286-241<br>560-600°; HB 235-192  |
| 50          | 1 H, 820-840°; 228<br>2 Отж, 820-840°; 179-228<br>3 H, 840-8600; O, 600°; 228<br>4 З, 840-860°;<br>O, 590-620°; 248<br>620-660°; 228                | 3, 820-840°, в;<br>O, 590-620°; ~HB 248<br>450°; ~HB 269<br>550°; ~HB 248<br>660°; ~HB 228  |
| 60          | 1 Отж., 800-820°<br>2 H, 800-820°; 187-228<br>3 H, 820-840°; O, 600-640°; ~228<br>4 З, 820-840°; у або м;<br>O, 520-560°; 286-248<br>620-660°; ~228 | 3, 820-846° м або в;<br>O, 550-620°; HB 241-207<br>400°; ~HB 321<br>500°; ~HB 286<br>600°; ~HB 228  |

Продовження табл.

| 1          | 2   | 3   |
|------------|---|---|
| 85         | 1 Отж., 800-820°<br>2 Н, 760-780°; О, 650-680°;<br>~228<br>3 3, 790-810°; у або м;<br>О, 480-520°; 460-351<br>520-580°; 351-286<br>560-600°; 286-255                              | 3, 790-810°, м або в;<br>О, 340-380°; HRC 54-47<br>480-520°; HRC 48-38<br>520-580°; HRC 43-30<br>560-600°; HRC 33-26  |
| 50Г і 60 Г | 1 Отж., 820-840°; 179-288<br>2 Н, 820-840°, ~241<br>3 Н, 840-860°; О, 640-680°;<br>~241<br>4 3, 830-850°; О, 560-580°;<br>228-207; О, 580-620°;<br>~228<br>5 Отж., 775-800°; ~228 | 3, 820-830°; м;<br>0, 550-650°;<br>400°; ~HB 321<br>500°; ~HB 286<br>600°; ~HB 228<br>3, 800-820°; м;<br>О, 480-530°; HB 321-269<br>650-680°; HB 228-179  |
| 35Г2       | 1 Отж., 770-790°; ~179<br>2 Н, 840-860°; ~241<br>3 3, 800-820°; у; О, 540-560°;<br>~269   | 3, 800-820°, в<br>О, 620-640°, в; HB 302-323<br>3, 820-840°, в;<br>О, 550-620°; HB 241-217<br>350°; ~HB 415<br>450°; ~HB 321<br>550°; ~HB 269<br>650°; ~HB 217  |
| 45Г2       | 1 Отж., 776-800°; ~187<br>2 Н, 830-850°; ~241<br>3 3, 830-850°; м;<br>О, 550-600°; ~269   | 3, 830-850°, м;<br>О, 620-640°, в; HB 302-228<br>300°; ~HB 447<br>400°; ~HB 401<br>500°; ~HB 321<br>600°; ~HB 268   |
| 15X, 20X   | 1 Н, 800-900°; 143-197<br>2 3, 860°, м; Ов, 500°  | 1 Ц, 900-920°; 3, 800-820°, м;<br>Он 180-200°<br>2 Ц, 900-920°; 3, 780-800°, в;<br>Он, 180-200°; HRC 58-60,<br>HRC 22-30<br>(сердцевина)<br>3 Ц, 900-920°; 3, 850-870°, в або Н;<br>3, 780-800°, в; Он, 180-220,<br>HRC 58-60 |
| 40X, 38XA  | 1 Отж., 890-910°; 156-202<br>2 Н, 850-870°; ~207<br>3 Н, 850°; Ов, 660°; ~170<br>4 3, 840-860°, в<br>Ов, 580-620°; 225-235<br>Ов, 620-680°; 235-202                               | 1 3, 850-870°, м;<br>Ов, 425°; ~HB 363<br>540°; ~HB 293<br>650°; ~HB 223<br>2 3, 850°, в;<br>Ов, 550-580°; HB 235-248<br>600-620°; HB 136-219<br>3 Цнр, 810-830°, м;<br>Он, 180-200°; HRC 48-56                               |

Продовження табл.

| 1            | 2  | 3   |
|--------------|--|---|
| 45X          | H, 840-860°; ≤228  | 1 3, 840°, м;<br>Ов, 485°, в; HB 302-341<br>580-620о, в; HB 255-280<br>600-650°, в; ≤HB 241   |
| 25СГ<br>35СГ | 1 H, 930°; 167-229<br>2 H, 930о; Ов, 600°; ~163<br>3 3, 910-930°, в;<br>Ов, 580-620°; 228-163              | 3, 920°; в;<br>Он, 230°, HB 388-407<br>475°, HB 302-363<br>680°, HB 217-255   |
| 40СХ         | 1 Отж., 880°; 241-269<br>2 H, 900о;<br>Ов, 660о; 241-269<br>Ов, 600-650°; 302-255<br>Ов, 650-680°; 285-241 | 1 3, 900- 920°, м або в;<br>Ов, 450-5000; HB 341-415<br>560-610°; HB 266-321<br>600-650°; HB 255-302<br>630-680°; HB 241-285<br>2 3, 880-900°, м;<br>Он, 250-280°; HRC 47<br>280-320°; HRC 47-54<br>Ов, 430-470°; HRC 38-43<br>580-620°; HRC 33-37<br>650-690°; HRC 20-30 |
| 40-Х Н       | Отж., 840-856°; ≤207<br>Отж., 840-860о; 156-207  | 3, 820-840°, м; Ов, 550-600о, в або м;<br>HB 255-286  |
| 12ХН2        | H, 885-910°; ~207  | 1 3, 815-870°, м; Ов, 420о; ~HB 341<br>Ов, 540°; ~248; Ов, 700°; ~HB 174<br>2 Цм, 960-920°; 3, 768-780°, м;<br>Ов, 180-200°; HRC 58; HRC 23-28<br>(серцевини)<br>Цм, 900-920°; 3, 850-870°, м або Н;<br>3н, 760-780°, м;<br>Он, 180-200°; ≥HRC 58                         |
| 12ХН3        | H, 885-940°; 156-228   | 1 Цм, 900°; 3, 760-800°, м;<br>Ов, 150-180°; ≥HRC 58; HRC 26-40<br>(серцевини)<br>2 Цнр, 840-860°, м; Он, 150-180°  |

Продовження табл.

|          |  |  |
|----------|--|--|
| 12X2H4   | 1. H, 885-940°; 187-225<br>2 H, 920-950°<br>640- 660°; 269-207   | 1 Цм, 900°; 3, 880°, м;<br>O <sub>н</sub> , 180°; HRC 60; HRC 35- 40<br>(серцевини)<br>2 Цм, 910°; O <sub>н</sub> , 600-668°;<br>3, 800°; м; O <sub>н</sub> , 180°; HRC 60<br>3 3, 815-845°, в, м;<br>O <sub>н</sub> , 200°; ~HB 335<br>O <sub>н</sub> , 500°; ~HB 250<br>O <sub>н</sub> , 650°; ~HB 175 |
| 18X2H4BA | H, 950°; O <sub>н</sub> , 650°; 197-269<br>H, 940-960°;<br>O <sub>н</sub> , 620-650°; 217-156  | 1 Цм, 900°; 3, 760-780°, м; O <sub>н</sub> 150-170;<br>≥HRC 58; HRC 35-47 (серцевини)<br>2 3, 860-900°; повітря; O <sub>н</sub> , 180-229°;<br>HB 311-387<br>3 3, 850°, повітря; O <sub>н</sub> , 550-590°, в;<br>HB 302-341   |
| 35XM     | 1 Отж., 890-910°; 163-207<br>2 H, 880°; 241-285<br>3 3, 850°, в;<br>O <sub>н</sub> , 800-640°; 207-241   | 1 3, 850-870°, м або в;<br>O <sub>н</sub> , 609-640°, в або м; ≥HB 221<br>2 3, 850°, в; O <sub>н</sub> , 558-560°, повітря;<br>HB 241-285  |
| 35XГ2    | H, 870°  | 3, 840°, м; O <sub>н</sub> , 620-640°, HB 228-269  |
| 20XГC    |  | 3, 880°, м; O <sub>н</sub> , 500-520°; ≥HB 228   |
| 35XГC    | 1 Отж., 890-910°; 179-255<br>2 Отж.-эф, 780°, охолод.<br>5-10 град/год.; 197<br>3 Отж. <sub>изо</sub> , 450-700°,<br>в 8-12 год.; 187-207<br>4 H, 890-910°; ≤218<br>5 H, 890-910°; O <sub>н</sub> , 700-740°;<br>228-196<br>6 3, 930-950о, м;<br>O <sub>н</sub> , 600-660о; 302-280<br>650-700о; 265-217 | 3, 860-880°, м;<br>O <sub>н</sub> , 500-550°, в або м; ~HB 235   |
| 18XГТ    | H, 960-980°, 156-228   | Ц, 920-950°<br>3, 850-870°, м; O, 180-200°   |
| 30XГТ    | H, 950-970°; 170-228   | 1 3, 840-860°, м; O, 180-200°; HRC 442<br>Ц, 900-940°;<br>3, 840-860°, м; O, 180-200°  |
| 15X2ГНТА | H, 900-940°, O <sub>н</sub>  | 1 3, 850°, м; O, 150-180°<br>2 Ц, 900-920°;<br>3, 850°, м; O, 150-180°   |
| 25X2ГНТА | H, 920-950°, O <sub>н</sub>  | 1 3, 850-880°, м; O, 150-200°<br>2 3 <sub>изо</sub> , 850-880°, м; 200-230°,<br>τ = 30-45 хв.; O, 200-230°,<br>τ = 1,0-1,5 год.<br>3 Ц, 900-920°<br>3, 800-820°, м; 150-200°   |

### Продовження табл.

|  |   |  |
|--|---|--|
| 38ХМЮА   | 1 Н, 930-970°, О <sub>в</sub> , 600-650°<br>2 Отж., 880-900°; 207-241<br>3 Отж. <sub>н.п.</sub> , 700-740°; 187-235 | З, 930-950°, м;<br>О <sub>в</sub> , 600-675°, мех. оброб.;<br>О <sub>в</sub> , 550-600°, τ = 3-10 год.;<br>А <sub>з</sub> , 500-650° |
| 45ХНМФА  | Отж., 850-860°  | З, 860-880°, м;<br>О <sub>в</sub> , 390-420°; НВ 415-477<br>460-530°; НВ 363-444<br>550-600°; НВ 321-363<br>600-650°; НВ 260-321     |
| Примітка. Наведені у таблиці температури відпалу, нормалізації і гартування дані стосовно деталей перетином менше 120 мм; для більших перетинів зазначені температури повинні дещо підвищуватися |   |  |



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Упрочнение деталей лучом лазера /Под ред. В.С.Коваленко. –Киев, Техника, 1981. -130 с.:
2. Голубев В.С., Лебедев С.В. Физические основы технологических лазеров. Ч. 1, 2, 3, 4, 5. –М.: Высшая школа, 1987.
3. Поляк И.С. Технология упрочнения. Т.2. –М.: Машиностроение, 1995. -685 с.
4. Термическая обработка в машиностроении: Справочник /Ю.М.Лахтин, А.Г.Рахштадт. –М.: Машиностроение, 1980. -784 с.
5. Болховитинов Н.Ф. Металловедение и термическая обработка. -М.: Машиностроение.1958. -432 с.
6. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1960.
7. Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. -Металлоиздат, 1980.
8. Головнин Г.Ф., Замятин М.М. Высокочастотная термическая обработка. -Машгиз, 1959.
9. Коровкин А.В., Усачев Г.А., Кравченко С.С. Прогрессивная технология нанесения износостойких покрытий на инструмент и его эксплуатация //Тр.филиала НИПИ авиапрома. –Тольятти, 1985. -77 с.
10. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов. –К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. -52 с.
11. Натапов Б.С. Термическая обработка металлов. –Киев: Вища школ, 1980. - 298 с.
12. Вязников Н.Ф. Термическая обработка стали. –М.: Гос. научно-технич. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. -350 с.
13. Лазаренко Н. Электроискровое легирование металлических поверхностей. -М.: Машиностроение, 1976. -45 с.
14. Самсонов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. -Киев: Наукова думка, 1976. -219 с.

Навчальне видання

**Сігова Валентина Іванівна**  
**Руденко Павло Володимирович**

**МЕТОДИ ЛОКАЛЬНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ  
ОБРОБКИ**

Навчальний посібник

Дизайн обкладинки П.В.Руденка

Редактор Н.А.Гавриленко

Комп'ютерне верстання В.Д. Вінницької

Підп. до друку 19.12.2008.

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman Cyr.

Друк офс.

Ум. друк. арк. 12.79. Обл.-вид. арк. 9,27.

Тираж 300 пр. Вид. № 316.

Зам. №

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті  
40007, Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного  
реєстру ДК № 3062 від 17.12.2007.

Надруковано у друкарні СумДУ

40007, Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.