ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6-7
ЗМІЦНЕННЯ ПІД ЧАС ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Фізико-механічні властивості поверхневого шару матеріалу деталі суттєво відрізняються від внутрішніх. Ці відмінності обумовлені спадковістю обробки та впливом експлуатаційних умов.

Атоми, які знаходяться на поверхні деталей, мають однобічні зв'язки з металом, що обумовлює їх активізацію, у результаті чого поверхня деталі адсорбує атоми елементів навколишнього середовища. Дифузійні процеси в поверхневому шарі притаманна поява різних сполук основного металу та речовин, що проникають ззовні. Можливий також перерозподіл легуючих елементів у поверхневому шарі, який призводить до зниження робочих властивостей деталей. Механічний, тепловий, магнітоелектричний, світловий та інші види зовнішніх впливів спричиняють збільшення спрацьовування поверхневих шарів деталі, його ерозії, кавітації, корозії, появу тріщин від утомленості тощо. При цьому суттєво погіршується робота поверхневих шарів із урахуванням негативних впливів у процесі обробки деталей або складання елементів конструкцій, які супроводжуються появою на поверхні рисок, подряпин, ум'ятин, задирок та інших дефектів.

Навіть у разі ретельної механічної обробки важко запобігти мікроскопічним подряпинам на поверхні, які є місцем концентрації напружень. Найбільш сприятливий мікрорельєф поверхні деталі може бути поверхневим зміцненням, що створює на ній залишкові стискувальні напруження. У результаті підвищуються твердість, міцність, опір відриву та утомна міцність поверхневого шару.

Поверхневе зміцнення завдяки стабільним залишковим напруженням стискування, наклепу та сприятливому мікропрофілю поверхні підвищує витривалість деталей порівняно з механічною обробкою у 2 – 2,5 рази і більше, частково або повністю знижує шкідливий для витривалості деталей вплив конструктивних концентраторів напружень, покриттів і корозійних середовищ.

Основним технологічним способом поверхневого зміцнення є зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД).

Сутність ППД полягає у створенні нерівномірної деформації поверхневого шару конструкції у пружно-пластичній та пластичній сферах, після якої в процесі розвантаження в цьому шарі виникають напруження стискування високої інтенсивності. Ці напруження врівноважуються залишковими напруженнями розтягування низької інтенсивності в серединних шарах матеріалу.

Технологію ППД застосовують практично до всіх конструкцій із металевих матеріалів, зокрема, у механічному, заготівельно-штампувальному, слюсарно-зварювальному та складальному виробництвах.

Тривалими дослідженнями встановлено, що довговічність, а отже, і ресурс деталей із конкретного матеріалу визначають станом поверхневого шару та його пошкодженням і меншою мірою станом внутрішніх шарів матеріалу деталей. Тому одним із основних питань, які необхідно вирішити під час проектування та виготовлення конструкцій, є забезпечення високої опірності поверхневого шару.

1.1. Класифікація та сфери найбільш раціонального застосування методів зміцнення поверхневого пластичного деформування деталей

Відповідно до ГОСТу 18296-72 методи ППД поділяють на статичні й ударні. У випадку застосування статичних методів обробки інструмент, робочі тіла або середовище впливають на оброблювану поверхню з певною постійною силою P,

відбувається плавне переміщення осередків впливу послідовно по всій оброблюваній поверхні.

У разі застосування ударних методів інструмент, робочі тіла або середовище багаторазово впливають на всю оброблювану поверхню або її частину, у результаті чого сила впливу Р у кожному циклі змінюється від нуля або деякого значення Р до максимуму, а у випадку локальної ударної дії осередок деформування може (як і в статичних методах) послідовно та рівномірно проходити через усю поверхню.

Для ППД як інструмент можуть бути використані ролик, куля з примусовою віссю обертання або без неї, гладилки, дорн з нерізальними кільцями, бойок тощо; як робочі тіла використовують шріт, кульки зі скла, пластмаси та ін.; робочим середовищем можуть бути рідина, газ і їх суспензії з частинками абразиву.

За способом додавання енергії зміцнювальним частинкам струминні процеси освоювали в такій послідовності: пневматичні установки (форсунки), гравітаційні та струминно-механічні апарати.

1.1.1. Ударні способи обробки

Шротоударний спосіб обробки найпоширеніший. Він заснований на застосуванні кінетичної енергії рухомого шроту, який розганяють механічно стиснутим повітрям, рідиною під тиском, гравітацією тощо.

Як робоче тіло використовують переважно сталевий шріт, виготовлений із кольорових сплавів і неметалів, головним чином зі скла. Розміри шроту залежно від призначення можуть змінюватися від 50 мкм до 6 мм.

Спосіб застосовують для зміцнення практично всіх типів деталей і металевих матеріалів для суцільної обробки під час їх виготовлення (можливе застосування для формування), а також місцевої обробки, у тому числі під час збирання або ремонту. Прийняте позначення методу шротоударного зміцнення

– ШЗ. Якщо розгін кульок, які знаходяться в замкненому об’ємі, здійснює енергія стиснутого повітря, що надходить у цей об’єм, то такий метод називають пневмодинамічним і позначають ПДЗ.

Барабанно-ударний спосіб обробки заснований на використанні енергії зміцнювального середовища, створюваної за рахунок її розгону центробіжними силами та гравітацією. Зміцнювані деталі встановлюють на щитах, які складають частину стінок барабана прямокутної чи шестигранної форми, або по осі барабана. Як робоче середовище використовують частинки кубічної форми з високоміцних алюмінієвих сплавів або сталей у випадку зміцнення деталей, виготовлених із високоміцних матеріалів. У процесі обробки під час обертання барабана частинки робочого середовища розганяються, але у верхній точці відриваються від поверхні розгону, потрапляють на поверхню деталі, зміцнюючи її. Цей спосіб застосовують переважно для зміцнення деталей каркасів із алюмінієвих сплавів із тонкими стінками. Він об’єктивний щодо зміцнення та контролю якості. Недолік способу – невелика глибина зміцненого шару й нерівномірність його на поверхні деталі внаслідок будь-якої орієнтації ділянок деталі відносно напрямку обертання барабана. Спосіб досить продуктивний. Умовне позначення – БЗ.

Віброударний спосіб полягає в застосуванні енергії вібруючого середовища. Як робоче тіло використовують сталеві кульки, абразивні гранули тощо. Сутність способу: робоче середовище та оброблювані деталі, розміщені в контейнері (резервуарі) віброустановки, зазнають механічних коливань із прискореннями до 10–15 g, у результаті чого частинки робочого середовища набувають енергії, достатньої для здійснення пластичної деформації поверхневого шару деталі. Висока рухомість частинок середовища забезпечує рівномірність і стабільність величини наклепу та значень залишкових напружень у поверхневому шарі деталей. Для даного способу характерні простота, висока продуктивність ті великі технологічні можливості: здатністю

оброблювати деталі будь-яких розмірів і форм незалежно від матеріалу.

Віброзміцнення (*ВЗ*) у середовищі сталевих кульок дає найкращі результати та має іншу назву – *вібронаклеп* (*ВН*). Віброзміцнення в середовищі наповнювача з абразивних частинок (гранул), що забезпечує велике зняття металу за порівняно невеликого підвищення його міцності від утомленості, називають *віброшліфуванням* (ВШ).

Інтенсивність зміцнення віброударним способом обмежена, якщо потрібна велика глибина зміцнення (для сталей більше 0,3 мм, для алюмінієвих сплавів – більше 0,4 – 0,5 мм), найкраще застосовувати дробоударний спосіб.

Зміцнення деталей, завантажених для ППД у контейнер з абразивом, який здійснює прямолінійний зворотно-поступальний рух, називають *пульсуючим шліфуванням* (ПШ).

Абразивний матеріал у контейнері відповідно до цього методу зміцнення ППД знаходиться у вільному стані та під час руху через велику інерційну масу зберігає свій статичний стан.

Завдяки тому, що абразивний матеріал нерухомий, а оброблювана деталь здійснює в контейнері зворотно-поступальний рух, відбувається переміщення абразивного середовища по поверхні обробки, спричиняючи зняття металу. Таким чином здійснюють об'ємну абразивну обробку. Одночасно з механізованою зачисткою відбувається зміцнення оброблюваних деталей. Для ПШ характерні такі параметри: амплітуда пульсування для сталевих деталей 110 … 150 мм, частота 300 … 500 коливань/хв, для алюмінієвих сплавів відповідно 80 … 90 мм і 200 … 400 коливань/хв.

Крім вищеописаних існує низка способів ударного зміцнення, які застосовують у виробництві різних деталей. Їх можна об'єднати в одну групу динамічних видів зміцнення. До них належать: відцентрово-ударний, ультразвуковий, чеканення, зміцнення вибухом та ін.

1.1.2. Статичні види зміцнення

Обкочуванням та розкочуванням роликами та кулями застосовують як спосіб ППД внутрішніх і зовнішніх поверхонь обертання, а також площин. Під час такої обробки може бути застосований додатковий рух вібрацією зміцнювального інструмента, що суттєво підвищує працездатність поверхонь тертя.

У процесі зміцнення за таким способом відбувається силовий вплив на поверхню робочих елементів (роликів або кульок) під час тертя кочення під дією постійного зусилля в разі пружного підтиснення робочих елементів або в умовах постійної деформації у випадку жорсткого розташування робочих елементів відносно зміцнювальної поверхні. Спосіб дозволяє створення практично будь-якої товщини зміцненого шару та може бути застосований до будь-яких матеріалів. Недоліком способу є залежність якості зміцнення від рівня кваліфікації виконавця, оскільки обробку здійснюють переважно на універсальних металорізальних верстатах із використанням спеціальних пристроїв, що потребують наладки.

Процеси обкочування та розкочування супроводжує змінювання діаметрів обкочуваної деталі в межах 0,005 …0,03 мм, що потребує встановлення відповідних припусків.

Вигладжування поверхні алмазними та твердосплавними інденторами застосовують для тих же цілей, що й розкочування та обкочування. Інструмент розсуває метал, створюючи канавку на поверхні. Після кожного оберту оброблюваної деталі канавка (слід вигладжувача) переміщується в осьовому напрямку на відстань, яка дорівнює подачі. Відбувається багаторазове перекриття її під час наступних обертів деталі, оскільки ширина канавки більша подачі. У результаті пластичного деформування оброблюваної поверхні згладжуються вихідні нерівності й створюється новий мікрорельєф поверхні зі значно меншою висотою профілю нерівностей R, до того ж розмір деталі зменшується на величину залишкової деформації Δ.

У зв'язку з невеликою площею контакту інструмента з поверхнею для обробки потрібне відносно невелике зусилля – 200 – 300 Н, що дозволяє застосовувати цей спосіб для зміцнення тонкостінних деталей.

Іншою перевагою способу є можливість вигладжування твердих і крихких покриттів і шарів.

Спосіб вигладжування має такі самі недоліки, що й попередній.

Дорнування отвору – один із основних технологічних способів підвищення ресурсів болтових з'єднань. Дорнування створює в поверхневому шарі отвори, залишкові напруження стискування шляхом перепускання дорна крізь отвір з натягом безпосередньо або крізь проміжкові (розрізні або суцільні) втулки. За призначенням дорнування поділяють на поверхневе та об'ємне. В останньому випадку пластична плинність відбувається по всьому поперечному перерізу оброблюваної деталі. За призначенням поверхневе дорнування може бути згладжувальним, калібрувальним і зміцнювальним. Різновидом є гідродорнування, під час якого між поверхнями зубів дорна та оброблюваною поверхнею відбувається постійне витікання рідкого мастила. Для поверхневого дорнування характерні натяг (різниця вихідного діаметра отвору та діаметра дорна); сила тяги, швидкість дорнування та геометричні характеристики дорна. У ході дорнування прикладена сила може бути штовхальною (дорн стискування) або тягнучою (дорн розтягування). Після дорнування потрібне калібрування отворів різальним інструментом для забезпечення встановленої точності. Якщо деформувальні шари металу не торкаються опорної плити пристрою, торцевий наплив металу її спотворення твірної за опорним торцем стають значно більшими порівняно зі спотвореннями верхнього торця. Ці спотворення можна зменшити, якщо обробку проводити в пристроях, які забезпечують затиск оброблюваної деталі по торцях. Вилучення механічною обробкою матеріалу із зазначених зон знижує ефективність зміцнення. Дорнування можна здійснювати на спеціалізованих горизонтально- чи вертикально-протяжних верстатах або за допомогою спеціального технологічного обладнання. Процес позначають літерою «Д».

1.2. Основні правила призначення та вибір методів зміцнення поверхневим пластичним деформуванням елементів конструкцій

Зміцнення ППД бажано проводити за всіма поверхнями деталей і вузлів, тому доцільніше призначати його в таких випадках роботи елементів конструкції:

1. Повторні навантаження в умовах розтягання, розтягання-стискання, згину та скручування.
2. Тривалий вплив статичних навантажень розтягання, здатних спричинити руйнування від корозії під напругою або інші види крихкого руйнування.
3. Наявність мікропереміщень, здатних призвести до фретинг-корозії.
4. Для посилення захисту від корозії (загальної, пітингової та ін.), якщо вона можлива в умовах експлуатації.
5. Якщо у процесі виготовлення конструкції в поверхневій зоні можуть виникнути м'які або тверді шари (зневуглецювання, припалювання, альфований шар).
6. За наявності крихкого покриття (хромування, анодування).
7. У разі можливості виникнення поверхневих та підповерхневих дефектів типу пор і вкраплень (для лиття та суцільних зварювальних з'єднань).

Вибір технологічних засобів зміцнення ППД здійснюють на основі технологічних особливостей конструкції, зважаючи на такі умови:

– габарити деталей мають відповідати можливостям того чи іншого виду устаткування;

– за складністю геометричних форм обирають метод зміцнення, технології та устаткування, а за жорсткістю деталі – можливість проведення зміцнення без викривлення

форм;

– від товщини стінок залежить вибір оптимальних режимів і умов зміцнення;

– за наявністю, характером і глибиною послабленого поверхневого шару визначають можливості його повного або часткового вилучення або зміцнення на величину, яка перевищує глибину послабленого шару;

– наявність на деталях дефектів на кшталт мікротріщин у результаті впливу крихких шарів і покриттів враховують для встановлення глибини зміцненого шару, що гальмує поширення таких дефектів;

– раціональність застосування одного або декількох методів зміцнення з'ясовують за точністю і шорсткістю різних поверхонь на одній деталі;

– місце зміцнювальної операції в технологічному процесі виготовлення або збирання залежить від технології визначення елементів конструкцій;

– можливість одночасного зміцнення декількох деталей;

– потрібна шорсткість поверхні служить підґрунтям для вибору методу зміцнення та обладнання, під час застосування яких можливе суміщення зміцнювальної та чистової обробки.

Під час вибору методів і засобів зміцнення ППД необхідно також враховувати технічні можливості досягнення мінімальних шорсткостей і продуктивність устаткування (табл. 1).

Матеріали для робочих тіл інструментів мають вищі фізико-механічні властивості, ніж матеріали оброблюваних деталей, зокрема: високу твердість, здатність протистояти стиранню та ударним навантаженням під час ППД, високу межу міцності на стискування, низький коефіцієнт тертя по металу, велику теплопровідність і теплоємність, властивість оброблювати поверхню до отримання мінімальної шорсткості, високу адгезійну здатність.

Таблиця 1

Залежність шорсткості поверхні від виду зміцнення

Вид зміцнення	Продуктивність зміцнення, $м^2/г$	Шорсткість, якої треба досягнути, мкм
Струминно-механічний	20 - 30	2,5
Барабанно-ударний	4 - 5	1,25
Вібраційний	0,5 – 1,5	0,63

1.3. Параметри робочих тіл, середовищ та інструментів, застосовуваних під час поверхневого пластичного деформування

Кулі та ролики застосовувані для ППД, виготовляють з підшипникових сталей ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, 18ХГТ, 20Х2Н4ВА, в особливих випадках користуються корозійностійкими сталями 11Х18М, 95Х18, а також теплостійкою вольфрамо-ванадієвою сталлю 8Х4В9Ф2.

Як матеріал для ударних інструментів використовують інструментальні сталі високої теплостійкості У10, У10А, нормальної теплостійкості Р18, Р6АМ5, підвищеної теплостійкості Р6М5К5, Р9М4К8, Р9К5, а також сплави, які мають високу теплостійкість.

Інструмент для поверхневого дорнування, а в деяких випадках обкатні ролики, гладилки та інше виготовляють з твердих сплавів, які, маючи низку переваг, гірше сприймають ударні та згинальні навантаження. Тверді сплави застосовують залежно від експлуатаційних навантажень.

Для виготовлення вигладжувачів застосовують природні та синтетичні алмази. Синтетичні алмази із зерном розміром більше 3 мм у вигляді полікристалів отримали назву балас (АСБ) та карбонідо (АСПК) за аналогією з найменуваннями відповідних природних алмазів. Алмази АСБ мають кулеподібну форму з чітко вираженою радіально-

променевою структурою, розміри їх зерен досягають 6 мм.

1.4. Підготовка поверхонь до зміцнення способом поверхневого пластичного деформування

Поверхні деталей, які підлягають зміцненню, мають бути без дефектів (подряпин, забоїн, слідів корозії тощо). Допустима зачистка місцевих дефектів перед поверхневим зміцненням. Гострі кромки округлені радіусом, не меншим 0,5 … 1,0 мм. Має бути плавний перехід у місцях з'єднань. Радіуси галтелей та інших з'єднань мають бути не менш 3 мм. У разі наявності з'єднань радіусом, меншим 3 мм, їх рекомендують до зміцнення піддавати піскоструминній обробці. Враховуючи, що підготовка поверхні, особливо для деталей з титанових сплавів, має важливе значення, у ряді випадків застосовують спеціальні заходи щодо зачищення поверхонь.

Після механічної та термічної обробки поверхні різних деталей зачищають механічним або ручним способом до шорсткості Rz 40 мкм або Ra 2,5 мкм, а поверхні деталей у місцях концентрації напружень (у концентраторах) до Ra 2,5 мкм. До процесів спеціальної підготовки поверхонь належить округлення кромок деталей з високоміцних сталей і титанових сплавів до радіусів 1 … 0,5 мм, а деталей з алюмінієвих сплавів – до радіусів 1,5 … 0,5 мм. Це округлення необхідне, щоб попередити утворення напливів під час поверхневого зміцнення, які різко знижують його ефект. Безпосередньо перед зміцненням деталі піддаються промиванню, знежиренню в антикорозійних розчинах і сушінню. Для ділянок, які не підлягають зміцненню, застосовують спеціальні покриття для захищення. Шорсткість поверхонь деталей перед зміцненням після механічної обробки не повинна перевищувати:

- для стальних деталей Ra 2,5;
- деталей з алюмінієвих сплавів Ra 5;
- деталей, які підлягають після зміцнення хромуванню, Ra 1,25.

Деталі з алюмінієвих сплавів, поверхні яких механічно не обробляють (після штампування, пресування тощо), можна не зміцнювати, якщо це спеціально не обумовлено технічними вимогами.

Поверхню деталей із шорсткістю Ra 5, виготовлених точним литтям, зміцнюють вібронаклепом без попередньої їх підготовки.

Для поверхонь після термічної та механічної обробки, виконаних з Ra 5 і грубіше, застосовують віброполірування або віброшліфування з подальшим вібронаклепом. Віброшліфування таких поверхонь рекомендовано, якщо у деталі є концентратори напружень, які не сполучаються з точними поверхнями.

Перед алмазним вигладжуванням вихідна поверхня повинна мати шорсткість у межах Ra 1,25.

Контрольні запитання і завдання

1. Охарактеризуйте ударні способи зміцнення.
2. У чому сутність статичних способів зміцнення?
3. Назвіть основні правила вибору способів зміцнення ППД.
4. Охарактеризуйте матеріали, які застосовують для виготовлення інструментів під час ППД.
5. У чому полягає підготовка поверхні перед зміцненням ППД?