

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Запорізький національний технічний університет

Конспект лекцій  
з дисципліни “Основи теорії наплавлення” для студентів  
освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості  
деталей і конструкцій» всіх форм навчання

2016

Конспект лекцій з дисципліни “Основи теорії наплавлення” для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання. / Укл.: О.Є. Капустян - Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 – 34 с.

Укладач: О.Є. Капустян, ст. викладач  
Рецензент: А.О. Шумілов, канд. техн. наук, доцент  
Редактор: І.П. Аверченко  
Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено  
на засіданні кафедри ОТЗВ  
Протокол № 2 від 27.09.2016

Рекомендовано до видання  
НМК ІФФ  
Протокол № 2 від 11.10.2016

\* Конспект складено на основі конспектів лекцій та методичних вказівок з дисципліни «Основи теорії наплавлення» для студентів спеціальності: 6.092301 / Укл.: В.С. Попов»

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 ПРОБЛЕМА ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ МАШИН .....	9
2 ЗНОС МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ .....	12
2.1 Основні визначення.....	12
2.2 Механізм зношування.....	12
2.3 Класифікація видів зношування .....	15
3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ МАШИН .....	19
3.1 Раціональне конструювання .....	19
3.2 Правильний вибір матеріалу.....	20
3.3 Підвищення зносостійкості методами термічної і хіміко- термічної обробки .....	20
3.4 Зносостійке наплавлення .....	21
4 ЕЛЕКТРОДИ ІЗ ЗАЛІЗНОГО ПОРОШКУ В ПОКРИТТІ. 26	
4.1 Відділення зварювального шлаку.....	30
4.2 Взаємодія і зчеплення шлаку з металом на площині та в обробленні.....	30

## ВСТУП

Мета курсу «Основи теорії наплавлення» ознайомити студентів з основами підвищення зносостійкості і терміну служби деталей машин, з'ясувати властивості матеріалів, які контролюють їх здатність до опору зношуванню. Ознайомити з класифікацією видів зношування і способами збільшення опірності сталей і сплавів руйнування при експлуатації в різних умовах навантаження, робочих швидкостей і температур.

Розкрити можливості наплавлення робочого шару, що має необхідну опірність руйнуванню при зношуванні в різних середовищах.

Завдання курсу «Основи теорії та наплавлення» включають вивчення основ теорії зношування сталей і сплавів та відповідних методів підвищення опірності деталей машин і апаратів впливу середовищ, які їх зношують.

Вивчити класифікацію основних видів зварювання стосовно наплавленні для відновлення форми і розмірів зношеної деталі і збільшення здатності напавленого робочого шару до опору зношування.

Вивчити основні етапи розвитку зварювання та наплавлення, відкриття електричної дуги В.В. Петровим і роботи М.М. Бенардоса і М.Г. Слав'янова в області застосування дугового розряду для зварювання і наплавлення деталей машин. Викласти студентам елементи найважливіших сучасних досліджень в розвитку зварювальних та напавних процесів.

Ознайомити студентів з основними джерелами нагріву при наплавленні.

Вивчити основи фізичної хімії, елементи хімічної термодинаміки, умови рівноваги, металургійні процеси і закономірності кристалізації при наплавленні.

Конспект лекцій з курсу «Основи теорії наплавлення» розроблений відповідно до навчальних планів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій».

В курсі використані відомості, отримані при обробці літературних джерел та результатів наукових досліджень кафедри «Обладнання і технології зварювального виробництва» ЗНТУ.

Курс «Основи теорії наплавлення» включає три основні розділи:

1. Зношування металів і сплавів - основна причина зниження терміну служби деталей машин і устаткування. Класифікація і механізм найбільш руйнівних видів зношування.

2. Способи відновлення вихідної форми і розмірів деталей, що вийшли з ладу в результаті зношування. Наплавлення - найбільш потужний засіб боротьби із зношуванням. Класифікація видів наплавлення і характеристика найбільш поширених її методів, технологій і наплавочних матеріалів.

3. Фізико-хімічні основи поведінки металів при напавленні, що послужили базою освоєння наукових знань, накопичених людством в області плавлення металів, металургійної обробки розплавленого металу і отримання заданого хімічного і структурного складу, що визначають високу якість наплавлення. Головна теоретична база, яка дозволила перетворити наплавлення з експериментального мистецтва в точну науку.

Конспект лекцій побудований на відомостях, які має в даний час наука і практика щодо механізму зношування робочих поверхонь деталей, властивостей сталей і сплавів, контролюючих їх здатність до опору руйнівному впливу матеріалів і середовищ, в контакт, з якими експлуатуються інструмент, деталі машин і устаткування, а також методів наплавлення, напилення і наплавочних матеріалів, що забезпечують підвищення зносостійкості і терміну служби деталей і вузлів машин, що швидко зношуються.

З підвищенням робочих швидкостей, тисків, температур, агресивності середовищ, жорсткості умов, характерних для роботи сучасного виробництва, збільшується інтенсивність зношування, корозія та інші види пошкодження поверхні металу деталей і механізмів, що контактують з матеріалами, що оброблюються і середовищами, які зношують.

Процес руйнування поверхні сталей і сплавів при зношуванні - явище надзвичайно складне, залежне від великого числа діючих одночасно взаємопов'язаних факторів: хімічний, структурний склад, механічні та фізичні властивості, власне, металу, з якого виготовлена деталь: аналогічні характеристики матеріалу, що обробляється або переробляється або середовища, а також зовнішніх умов процесу зношування - робочого тиску, температури, швидкості взаємного переміщення в зоні контакту деталі і контртіла, ступеня агресивності

середовища. Природно, що, будь-який показник, твердість, межа міцності, або інший критерій механічних властивостей металу, що зношується не може характеризувати рівень здатності до опору зношування, оскільки не відображає всього комплексу явищ, що відбуваються в металі під впливом середовища, що його зношує. Необхідні глибокі систематичні дослідження механізму пошкодження робочої поверхні деталі не тільки на макро-, але і на мікро- і субмікроструктурному рівні, спрямовані на виявлення тих властивостей сплаву, які контролюють його здатність до опору впливу середовищ, що зношують в реальних умовах експлуатації, що і визначає рівень його зносостійкості. До теперішнього часу накопичений великий науковий, теоретичний і практичний матеріал про зносостійкості окремих швидкозношуваних деталей машин. Однак, цього явно недостатньо для узагальненої оцінки зносостійкості. Є потреба в комплексному підході до аналізу багатofакторних обставин, що охоплюють всю складну систему їх взаємодії: метал деталі, яка зношується; матеріал контргіла і середовища, що зношує; умови зношування - тиск, температура, швидкість, ступень агресивності середовища.

У ЗНТУ (раніше ЗМІ) з 1960 р. проводяться комплексні роботи по вибору, створенню нових та використанню відомих зносостійких матеріалів для деталей, що зазнають в процесі експлуатації інтенсивне зношування. До теперішнього часу з цієї тематики захищені кілька докторських і десятки кандидатських дисертацій, випущені монографії, тематичні науково-технічні збірники. Опубліковані сотні статей і отримано цілий пакет авторських свідоцтв і патентів. Випускаються інженерні кадри за освітньої програмою «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій».

Результати роботи ЗНТУ широко відомі і використовуються не тільки в Україні але і в ближньому і далекому зарубіжжі. Так, всі підприємства вогнетривкого виробництва, де деталі технологічного обладнання схильні до інтенсивного абразивного зношування в процесі видобутку сировини, її переробки, дроблення, розсівання, транспортування, дозування, змішування шихтових матеріалів і напівсухого пресування вогнетривких виробів ось уже понад 40 років використовують розробки і рекомендації нашого університету, що забезпечує підвищення терміну служби деталей до 10 разів і відповідно, багатомільйонну ефективність.

Конструктори, які проектують машини і обладнання, далеко не завжди володіють глибокими знаннями, необхідними для прийняття правильного рішення при виборі матеріалів і процесів їх зміцнення, що забезпечують збільшення терміну служби машин. Сталі та сплави, а також технологію виготовлення тих чи інших деталей і вузлів вони призначають зазвичай, використовуючи довідкову літературу. Досить часто важко знайти у великому обсязі довідкові відомості, оптимальні матеріали для заданих умов експлуатації. Наприклад, в СРСР використовувалося понад 400 марок конструкційних і високоміцних сталей. 170 з них включені в різні ГОСТи, які і до теперішнього часу використовуються в Україні. Решта випускаються за різними ТУ. Тільки дуже кваліфікованому інженеру з досвідом використання конструкційних та зносостійких матеріалів в парах і вузлах тертя під силу професійно орієнтуватися в цьому різноманітті марок сталі і сплавів.

На базі теоретичних і експериментальних напрацювань колективу нашого університету, а також виробничого досвіду по їх впровадженню доцільна організація триботехнічного комплексу лабораторних і стендових випробувань з метою створення ряду зносостійких матеріалів для типових (уніфікованих) деталей і вузлів машин і устаткування.

Підвищення довговічності машин і обладнання є однією з актуальних народногосподарських завдань. Витрати на ремонт і заміну обладнання в зв'язку зі зношеністю складають істотну частину в загальній сумі витрат на виробництво промислової і сільськогосподарської продукції, в будівництві і на транспорті. Боротьба з передчасним зносом деталей обладнання має особливе значення в галузях промисловості, які видобувають і переробляють мінеральну сировину, тобто там, де обладнання працює в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Ефективність застосування матеріалів для виготовлення швидкозношуваних деталей і технології їх зміцнення залежить від того, особливостей експлуатації устаткування, характеру впливу, що зношує який відчуває деталь з боку матеріалів, що переробляються, ступінь абразивності цих матеріалів і зовнішні умови зношування.

Завдання знаходження кількісної залежності зносостійкості металів і сплавів від їх фізико-механічних властивостей і мікроструктури може бути вирішена створенням математичної моделі

зношування, заснованої на сучасних фізичних уявленнях про елементарні акти пластичної деформації і руйнування під впливом абразивних тіл з урахуванням нерівномірного розвитку цих процесів, обумовленого неоднорідністю структури реальних матеріалів і відмінністю фізико-механічних властивостей структурних складових. Побудова такої моделі - справа майбутнього.

Застосування сучасних теоретичних положень про здатність матеріалів до опору зношуванню в умовах експлуатації обладнання вогнетривкого виробництва, зокрема, пресового, дозволило сформулювати основні вимоги, що пред'являються до зносостійких матеріалів, одним з головних властивостей яких має бути зміцнення їх поверхневого шару під великим тиском абразивних тіл в процесі зношування. Виконання цієї умови дозволяє використовувати для деталей, що працюють без нагріву, відносно м'які матеріали, що допускають деяку деформацію при роботі без утворення тріщин і відколів і в той же час володіють достатньою зносостійкістю в результаті зміцнення під тиском абразивних середовищ в процесі експлуатації.

Застосування зносостійких матеріалів є високоефективним способом підвищення довговічності деталей. Однак, у багатьох випадках працездатність обладнання може бути істотно підвищена і за рахунок раціонального вибору типу обладнання і технології основного виробництва, що забезпечує мінімальний знос деталей, а також конструктивних прийомів підвищення їх терміну служби.

У вогнетривкому виробництві в найбільш важких умовах працює технологічне оснащення і деталі обладнання пресових відділень - облицювання і пуанسونи прес-форм пресів напіссухого пресування, лопаті шнеків стрічкових пресів, бандажі прес-вальців і ін. Дослідження умов експлуатації і характеру зношування, спрямовані на збільшення терміну служби швидкозношуваних деталей, дозволили удосконалити технологію виготовлення зносостійкого оснащення, способи її відновлення для повторного використання і визначити економічну ефективність цих заходів.

Промисловості вкрай потрібні кваліфіковані фахівці в цій галузі знань. Тому підготовка інженерів за означеною освітньою програмою була викликана потребою в фахівцях, які мають систематичну освіту в галузі фізико-хімічної механіки матеріалів, фізичного матеріалознавства, сутності підходів до розробки зносостійких



матеріалів, методів і технології їх наплавлення для підвищення терміну служби деталей.

Однак, підручників і навчальних посібників для підготовки таких фахівців поки немає, а численні публікації виробничо-технічного порядку по зносостійкості окремих конкретних виробів ще вимагають аналізу і узагальнень.

Теоретичні положення, сформульовані в працях вітчизняних і зарубіжних вчених, служать багатьом дослідникам основою для розробки програми спрямованого вивчення процесу зношування деталей машин з метою подальшого підвищення їх опірності руйнівній дії середовищ, що зношують в різноманітних умовах експлуатації.

У конспекті викладені результати, як власних досліджень авторів, так і інші матеріали, що дозволяють зробити деякі узагальнення, поглиблюють розуміння зносостійкості металів і сплавів при взаємодії з різними середовищами, а також вплив властивостей, складу і структури матеріалів на їх опір руйнуванню при зношуванні.

## **1 ПРОБЛЕМА ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ МАШИН**

Проблема підвищення довговічності машин і обладнання є однією з найактуальніших народногосподарських завдань. Боротьба з передчасним зносом деталей обладнання та інструменту має велике значення в багатьох галузях промисловості і особливо в видобувних і переробних мінеральної сировини, теплоенергетиці, виробництві вогнетривів, силікатної цегли, кавітаційному, корозійному, ерозійному впливі і ін.

Термін служби швидкозношуваних деталей визначає рентабельність багатьох дорогих машин. Часті зупинки обладнання для заміни поламаних деталей новими, призводять до значного зниження продуктивності праці, якості продукції, порушують ритмічність процесу виробництва, викликають невиробничі витрати металу на виготовлення змінних деталей, створюють необхідність в

утриманні спеціальних ремонтних бригад, істотно ускладнюють, а іноді і зовсім виключають можливість механізації і автоматизації виробництва. Все це є причиною колосальних втрат, які несе народне господарство.

Сучасні тенденції інтенсифікації виробничих процесів, збільшення робочих тисків, швидкостей, температури призводять до прискорення зношування деталей, і в поєднанні з необхідністю автоматизації виробництва, роблять проблему підвищення довговічності швидкозношуваних вузлів машин ще більш гострою.

Середня тривалість життя сталевих виробів, що знаходяться в користуванні, становить від кількох годин до 15 років.

Пошуки зносостійких металів і сплавів досить широка, специфічна і наукомістка область інженерної діяльності, що вимагає великих знань про процеси, що відбуваються в робочій поверхні деталі, що зношується під впливом середовищ в умовах експлуатації.

Тільки чіткі уявлення про властивості, які контролюють здатність сталей і сплавів до опору їх робочого шару руйнуванню під впливом середовищ, що зношують дають можливість сформулювати вимоги до зносостійких матеріалів і виробити конкретні заходи, що забезпечують працездатність деталей і збільшення терміну їх служби.

За результатами досліджень зносостійкості матеріалів є багато публікацій в технічній літературі. У більшості з них містяться уривчасті відомості про конкретні матеріали, для конкретних деталей в конкретних умовах експлуатації.

Такі знання мають обмежене наукове і практичне значення, оскільки одні й ті ж сплави, що проявляють високу зносостійкість в одних умовах, часто надають слабку опірність зношування в інших. Для виготовлення швидкозношуваних деталей використовується багато різних матеріалів. З метою збільшення довговічності машин застосовуються складні за вмістом сплави, дефіцитними і коштовними легуючими елементами. У деяких випадках складнолеговані сталі, застосовуються для умов, в яких не використовуються всі можливості, закладені в них легуванням.

Об'єктивні дані про працездатність матеріалів при зношуванні можуть бути отримані тільки при комплексному дослідженні як хімічного і структурного складу і властивостей сталі, так і хімічного і мінералогічного складу і властивостей середовища, а також зовнішніх умов, температури, ступеня агресивності середовища і тиску

зношуючих тіл на робочу поверхню деталі.

Використання макроскопічних уявлень про зношування матеріалів і опис явищ зносу за допомогою залежності від окремих механічних властивостей (твердості, деяких міцностних і пластичних характеристик) внесло певний внесок в науку про зношування, однак, не дуже істотно просунуло рішення цієї проблеми.

Значна активізація дослідницьких і практичних робіт у цьому напрямку за останні роки дозволила отримати результати, що забезпечують можливість формулювати основні теоретичні уявлення про опірності металів і сплавів зношування з позицій теорії дислокацій, механіки суцільних середовищ, теорії пружності, фундаментальних законів перетворення енергії.

Завдання знаходження кількісної залежності зносостійкості металів і сплавів від їх фізико-механічних властивостей і мікроструктури може бути вирішена на основі сучасних фізичних уявлень про елементарні акти пластичної деформації в мікрооб'ємах і руйнування під впливом абразивних тіл з урахуванням нерівномірного розвитку цих процесів, обумовленого неоднорідністю структури реальних матеріалів і відмінністю фізико-механічних властивостей структурних складових.

Застосування сучасних теоретичних положень про здатність матеріалів до опору зношування в конкретних умовах експлуатації обладнання дозволяє сформулювати основні вимоги, що пред'являються до зносостійких матеріалів, в тому числі і можливість зміцнення їх поверхневого шару під впливом тіл, що контактують з ним в процесі зношування. Виконання цієї умови дозволяє використовувати для деталей, що працюють без нагріву, відносно м'які в початковому стані матеріали, що допускають деяку деформацію при роботі без утворення тріщин і відколів і в той же час, володіють достатньою зносостійкістю в результаті зміцнення під тиском середовищ, що зношують в процесі експлуатації.

Комплексне використання виробничих і лабораторних методів вивчення зношування, а також дослідження змін тонкої структури металу в робочому шарі і аналітичний розрахунок величини енергії, що витрачається на здійснення кожного з елементарних процесів в металі, що становлять акт зношування, дозволяє виявити ті властивості сплаву, які в найбільшій мірі контролюють його здатність до опору руйнівній роботі середовищ, що зношують. Розробка моделі

зношування і кількісна оцінка кожного з явищ, що передують і супроводжують руйнування поверхневого шару металу, обумовлює більш глибоке розкриття природи опору сплавів зношування, дозволяє підвищити ефективність зміцнення матеріалів для швидкозношуваних деталей і дає можливість повніше реалізувати захисні сили металу і управляти його зносостійкість в заданих умовах експлуатації.

## **2 ЗНОС МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ**

### **2.1 Основні визначення**

Зношування - основний фактор, що обмежує термін служби обладнання, яке працює в самих різних умовах.

Стандартної термінології в області тертя і зношування поки немає. Хрущовим М.М. і Бабічевим М.А. запропоновані наступні визначення.

Зношування - процес поступової зміни розмірів тіла при терті, відділенні з поверхні тертя матеріалу і його залишкової деформації.

Знос - результат зношування, що виявляється у виді відділення або залишкової деформації металу.

Лінійний знос - знос, який визначається щодо зменшення розміру по нормалі до поверхні тертя.

Швидкість зношування - відношення величини зносу до часу, протягом якого він виник.

Інтенсивність зношування - відношення величини зносу до обумовленого шляху, на якому відбувалося зношування, або обсягу виконаної роботи.

Відносна зносостійкість - безрозмірний показник, що характеризує співвідношення абсолютних величин зносу двох матеріалів, з яких один прийнятий за еталон.

### **2.2 Механізм зношування**

Зношування здійснюється в результаті взаємодії робочого органу машини або конструкції зі сполученою деталлю або

середовищем, в якому обробляється. Результат процесу зношування залежить від трьох чинників - складу, структури і властивостей як матеріалу, з якого виготовлений робочий орган сполученої деталі або середовища, в якому обробляється так і від зовнішніх умов - температури, тиску, агресивності середовища.

Об'єктивну інформацію про процеси, що відбуваються при цьому на поверхні деталі і призводять до відокремлення мікрооб'ємів металу, що і становить елементарний акт зношування, можна отримати при розгляді тільки у взаємодії всіх цих факторів. Дослідження зношування робочої поверхні сталі і сплаву, без одночасного обліку середовища і зовнішніх умов, завжди призводить до отримання результатів, які не відображаються в інших роботах. Прикладом цьому служить велика кількість даних, які не збігаються, а іноді і суперечливі про зв'язок зносостійкості з окремими механічними властивостями, наприклад, з твердістю поверхні деталі, що зношується.

Багатьма дослідниками висуваються з різним ступенем аргументованості гіпотези про механізм зношування, що включають припущення про те, що процес зношування зводиться до суми великого числа елементарних актів дряпання, що зношування - суть втомні явища, внаслідок багаторазового пластичного передетформувannya одних і тих же ділянок робочої поверхні, що процес зношування відбувається за рахунок стирання оксидної плівки на робочій поверхні деталі, що зношування відбувається внаслідок утворення на робочій поверхні пластично видавлених канавок, що при зношуванні мікрорельєф, структура і міцність металу зазнають необоротних змін, в результаті яких формується своєрідний залишковий стан поверхневих шарів після зняття навантаження. У будь-якому випадку при будь-яких умовах процес зношування здійснюється відповідно до фундаментальних законів природи, зокрема, законом збереження енергії.

Відомо, що всі метали мають кристалічну будову. Атоми, розташовані всередині кристала, оточені більшою кількістю сусідніх атомів, з якими вони пов'язані силами міжатомної взаємодії, ніж поверхневі атоми. Тому поверхневі атоми мають енергію, що дорівнює величині нереалізованої сили міжатомного зв'язку. Поверхня металу має підвищену величиною енергії відповідної сумарній силі зв'язку всіх поверхневих атомів. Для того щоб відокремити від

монолітної деталі деякий мікро- або макрообсяг потрібно затратити енергію, по крайній мірі, рівну, величині енергії, необхідної для утворення двох нових поверхонь відповідної площі.

Найбільш повно розроблений енергетичний підхід до аналізу явищ при абразивному зношуванні. Зміна внутрішньої енергії матеріалу, що зношується дорівнює величині енергії нових поверхонь, що утворюються при руйнуванні і енергії, що акумулюється в металі у виді прихованої енергії деформації при взаємодії з середовищем, що зношується. При цьому відбувається розрив міжатомних зв'язків, що призводить до відокремлення однієї частини кристалічної решітки від іншої і утворення нових поверхонь. Ці явища вимагають певних витрат енергії і можуть здійснюватися, якщо в металі накопичено необхідний її запас.

Характеристика зносостійкості металів і сплавів, що є функцією процесів деформації і руйнування під впливом середовища, що зношується може базуватися на аналізі середньої величини енергії, яка поглинається металом при навантаженні в процесі зношування. Величина цієї енергії залежить від зовнішніх факторів і вихідного стану металу, пропорційна

$$E_M = E_P + E_{с.д} + E_T \quad (2.1)$$

Енергія, що витрачається на руйнування, складається з енергії, необхідної на пружну деформацію  $E_y$ , вдавнення складових середовища, що зношує в метал  $E_v$ , на глибину, рівну середній величині зносу за один цикл  $\Delta h$ , зародження тріщини  $E_{зт}$ , енергію, що відповідає роботі прикладеної напруги при розкритті тріщини  $E_{рт}$  і ефективної енергії утворення нових поверхонь  $2E_{п}$ :

$$E_P = E_y + E_v + E_{зт} + E_{рт} + 2E_{п} \quad (2.2)$$

У поверхневих шарах ділянки, розміри яких залежать від складу і структури металу, відбуваються незворотні процеси зміни його вихідного стану, що включають приріст щільності дислокацій  $E_p$  утворення мартенситу деформації  $E_{м.д.}$ , зміна параметрів кристалічної решітки аустеніту і ступеня тетрагональності мартенситу  $E_{т.д}$  виділення дисперсних фаз  $E_{ф}$ , утворення залишкових напружень  $E_{вн}$ :

$$E_{с.д} = E_p + E_{МД} + E_{ТД} + E_f + E_{вн} \quad (2.3)$$

У разі зношування абразивними тілами за кожен робочий цикл абразивне тіло може передати сплаву максимум енергії, стільки скільки її необхідно для його власного руйнування  $E_a$ . Таким чином, зношування можна інтерпретувати як процес перетворення механічної енергії абразиву в енергію нових поверхонь, необоротних спотворень і зміцнення в робочому шарі сплава, які передують руйнуванню і супроводжують його. Величина зносу повинна бути тим менше, чим більше енергії  $E_m$  може поглинути сплав не руйнуючись і чим менше величина енергії руйнування абразивного тіла  $E_a$ . У разі, коли сплав може поглинути енергії більше тієї кількості, яке абразивне тіло здатне одноразово йому передати, тобто при  $E_a < E_m$  зносу за даний робочий цикл не відбувається.

Якщо знехтувати витратою енергії на тертя, тепловий ефект і процеси, що відбуваються в самому абразивному зерні, то руйнування стане можливим тільки тоді, коли робоча поверхня буде насичена енергією, достатньою для здійснення зазначених вище необоротних процесів, а також зародження і розвитку тріщин.

Кількість циклів зношування, необхідна для накопичення в металі енергії, достатньої для руйнування, складе:

$$m = E_m/E_a \quad (2.4)$$

Кількість енергії, що поглинається робочою поверхнею і в значній мірі, визначає здатність до опору зношування абразивними тілами, залежить від енергоємності процесів, що протікають в металі при взаємодії з абразивами.

### 2.3 Класифікація видів зношування

Зазвичай вид зношування визначається умовами служби деталей. У ряді випадків одним і тим же зовнішнім умовам експлуатації можуть відповідати різні види зношування. Це особливо відноситься до тертя сполучених деталей.

Різні види зношування за ознакою основних явищ, що

обумовлюють ефект зношування, можна об'єднати в наступні чотири основні групи: механічний, молекулярно-механічний, корозійно-механічний і кавітаційний (рис. 2.1).

Основну групу механічного виду зношування становить абразивне зношування, тобто зношування поверхні деталі в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих частинок. Механізм цього виду зношування полягає у видаленні матеріалу з поверхні, що зношується або у виді дуже дрібної стружки, або фрагментів металу, видавленого по сторонам пластично деформованої подряпини, або у виді дисперсних частинок, що крихко відділяються при одноразовому або багаторазовому впливі.

Абразивне зношування характерно для дуже великого числа машин і механізмів, що працюють в найрізноманітніших умовах, коли робочі органи обладнання безпосередньо стикаються з тими, що видобуваються, які транспортуються і переробляються гірськими породами, ріжуть ґрунт, а також у випадках, коли тверді частинки, що захоплюються потоком води, повітря, газів зі значною швидкістю вдаряються об металеві деталі.

Втомне зношування здійснюється при повторних досить високих напругах, які долають одним і тим же об'ємом матеріалу поверхні, особливо при чергуванні знака напруги. В результаті в ньому виникають мікротріщини, що призводять до місцевого поверхневого руйнування, викришування у виді ямок. Цей вид зношування проявляється тільки через деякий період роботи деталі. До такого виду зношування призводить і малоциклова втома, що виникає при повторних пластичних деформаціях одних і тих же обсягів металу.

Основним видом молекулярно-механічного зношування є адгезійне зношування, що полягає в «схоплюванні» металів при терті в результаті перенесення металу з однієї на іншу і виривання частинок з поверхні однієї деталі і налипання або наволакування їх на сполучену. Це зазвичай призводить до появи на поверхні ризок і задирів, заїдання сполучених деталей, що супроводжується різким пошкодженням поверхні. У цих випадках виявляється молекулярна взаємодія між тісно зближеними поверхнями деталей. Необхідна умова для схоплювання - це приведення в безпосереднє зіткнення «ювенільних» поверхонь, які виникають в процесі спільного пластичного деформування.



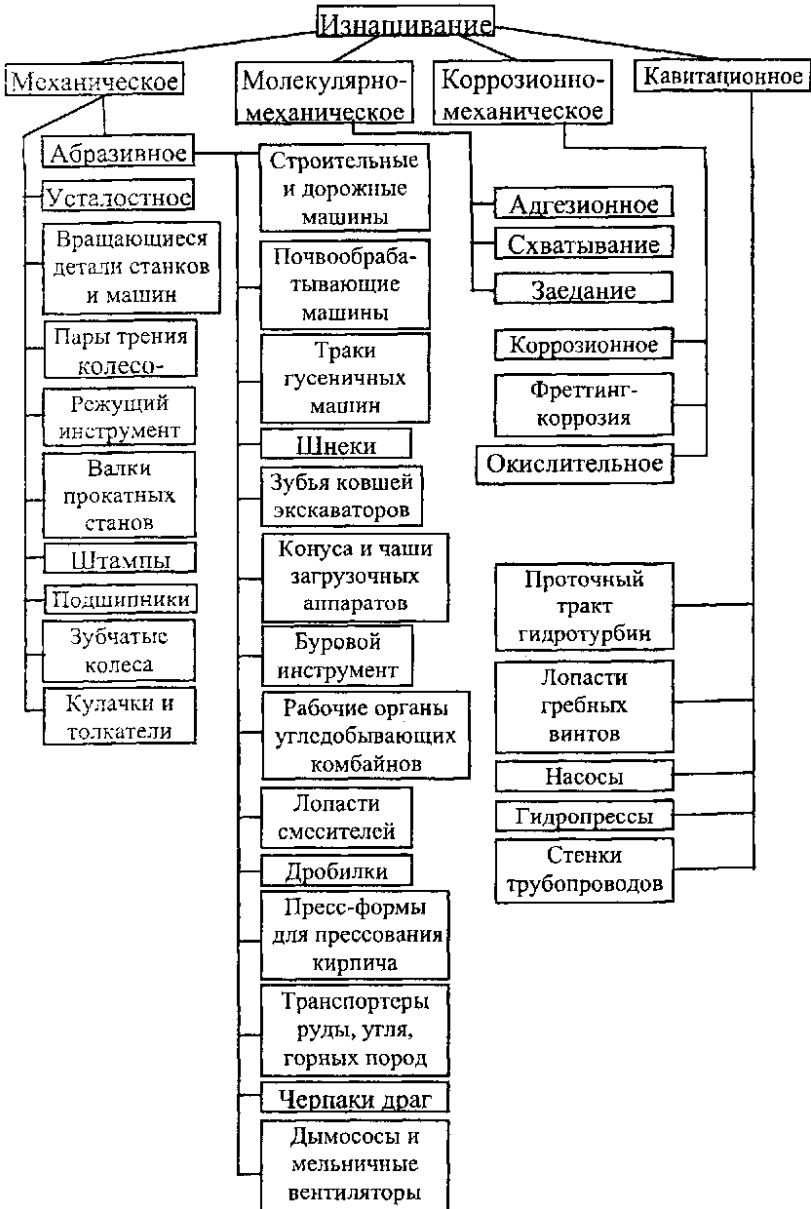


Рисунок 2.1 - Классификация основных видов износа

До різновиду такого виду зношування відносять і схоплювання при нагріванні поверхневих ділянок тіл, які труться, що відбувається в процесі тертя ковзання з великими швидкостями і значними питомими тисками. При цьому зношування здійснюється за рахунок утворення металевих зв'язків між деталями, що труться наведеними в досить тісне зіткнення до сфери дії міжатомних сил. Для цього ділянки поверхні повинні бути, як і в разі «чисто адгезійного» зношування, вільні від різного роду плівок, оксидів та адсорбованих речовин.

Корозійно-механічне зношування - це механічне зношування, ускладнене явищами корозії. Поверхня металу, вступаючи у взаємодію з киснем повітря або іншого окислювального середовища, утворює оксидну плівку, яка в силу її неметалевої природи не здатна до схоплювання і в початковий момент ізолює поверхні сполучених деталей від тісного контакту. При терті оксидні плівки поступово стираються або, відриваючись, видаляються з поверхні контакту. Потім така плівка утворюється знову, знову руйнується при терті і таким чином зношування являє собою видалення оксидних плівок, що безперервно поновлюються. Посилення зношування при терті відбувається в разі наявності агресивних середовищ.

Фреттинг-корозія - особливий вид зношування місць сполучених деталей, що знаходяться під навантаженням, що виникає при дуже малих повторних відносних переміщеннях, наприклад, при поздовжніх вібраціях.

Кавітаційне зношування відбувається в потоці рідини, що рухається зі змінною швидкістю в закритому каналі, в ділянках сильно зниженого тиску, наприклад, при обтіканні перешкод, виникають місцеві розриви суцільності з утворенням каверн. Потрапляючи з потоком в область більш високого тиску, каверни закриваються, і, якщо це відбувається у поверхні деталі, рідина з великою швидкістю вдаряється об стінку. Багаторазові повторні удари рідини по одній і тій же ділянці металу (каверни виникають і закриваються періодично, іноді з великою частотою) призводять через деякий час до його місцевого руйнування, утворення поглиблень.

На практиці рідко зустрічаються випадки зношування по якомусь одному з видів, наведених в рис. 2.1 або за іншими варіантами класифікації, відомим з літератури. Зазвичай зношування здійснюється в складних реальних умовах і за будь-які з відомих класифікацій може бути віднесено до кількох із виділених видів,

наприклад, фреттинг-корозія, гідроабразивне зношування і ін.

### **3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ МАШИН**

Промисловістю та сільським господарством щорічно витрачаються сотні тисяч тонн металу на виготовлення запасних частин і заміну ними деталей, що швидко зношуються: робочих органів дробильних механізмів, деталей землерийних машин, тягодутьєвих пристроїв, валків прокатних станів, ґрунтообробних машин і інших деталей різного роду інструментів і штампів. На операції заміни витрачається велика кількість праці. При цьому знижується продуктивність машин і апаратів, збільшуються простої агрегатів на заміну зношених деталей. Тому підвищення зносостійкості і терміну служби машин вельми важливе завдання науки і виробництва особливо в сучасних умовах, коли обладнання практично всіх підприємств істотно зношене, а перспективи його заміни на нове найближчим часом немає в зв'язку із загальним падінням виробництва в сучасних умовах і відсутністю коштів на оплату замовлень на виготовлення або покупку інших машин і механізмів.

Підвищення зносостійкості і терміну служби машин вельми актуальна проблема науки і виробництва та її рішення може бути досягнуто одним з таких методів.

#### **3.1 Раціональне конструювання**

Конструктор зазвичай користується міркуваннями найкращих способів забезпечення функціональних можливостей машини, її дизайном і не завжди приймається в розрахунок можливе збільшення терміну служби деталей, що швидко зношуються за рахунок їх раціонального конструювання.

Слід зазначити, що поки не вироблено надійних однозначних критеріїв, використовуючи які конструктор міг би надійно

розрахувати зносостійкість і термін служби конкретної деталі або машини в цілому. Однак, наука і накопичений до теперішнього часу виробничий досвід використання зносостійкості матеріалів в різних умовах експлуатації дозволяє досить обґрунтовано підходити до конструювання деталей машин, що швидко зношуються і має забезпечувати збільшення їх терміну служби.

### **3.2 Правильний вибір матеріалу**

Зносостійких матеріалів розроблено багато. Головні вимоги, які найчастіше закладалися їх розробниками, зводилися до того, щоб забезпечити отримання металу найбільшою твердістю. При цьому до складу сплаву вводилися значні кількості легуючих елементів. Загальний їх вміст в сплаві досягав іноді 60 %. Природно, що далеко не у всіх випадках раціонально використовувалися великі можливості, закладені в сплав легуванням. Високолеговані сплави при значній твердості мають найбільш високу зносостійкість, але їх застосування доцільно лише тоді, коли швидкозношувані деталі не відчувають деформацій в процесі експлуатації, які неминуче призводять до появи тріщин і відколів. В такому випадку деталі виходять з ладу не в результаті зносу, а внаслідок поломок.

### **3.3 Підвищення зносостійкості методами термічної і хіміко-термічної обробки**

Зношується, як правило, тонка поверхнева зона металу. У деяких випадках, коли незначні зміни геометричних розмірів деталі призводять до виходу з ладу всього вузла або машини, величина зносу складає всього лише кілька мікрометрів. У зв'язку з цим необхідно зміцнення тільки поверхневих шарів. Одним із способів, що можуть в деяких випадках вирішити таке завдання, є термічна обробка поверхневих шарів (Т.В.Ч.) або хіміко-термічна обробка.

Термічна обробка струмами високої частоти може проводитися на плоских поверхнях або на деталях, що мають форму тіл обертання.

При цьому поверхня деталі набуває високу твердість і істотну зносостійкість, а серцевина деталі залишається досить пластичною, здатною сприймати динамічні і знакозмінні навантаження. Застосування гарту Т.В.Ч. обмежується тим, що цей процес є ефективним не для будь-яких матеріалів.

Для підвищення зносостійкості деталей зі сплавів, які не сприймають гарт, найбільш ефективним є застосування хіміко-термічної обробки: насичення поверхневого шару сталі вуглецем - цементація, азотом - азотування, азотом і вуглецем одночасно - ціанування, бором - борування, з наступною термічною обробкою за відповідними режимами. При цьому поверхня сталі набуває інший склад, який містить дуже тверді включення: карбіди, нітриди, бориди. Структура матриці такого сплаву після термічної обробки стає в поверхневому шарі і сама досить твердою, а дуже тверді включення карбідів, нітридів, боридів, збільшують агрегатну твердість, внаслідок чого поверхня стали набуває високу зносостійкість. При цьому зберігається в серцевині деталі необхідна пластичність і, отже, здатність працювати в різних умовах навантаження, включаючи ударні і знакозмінні.

### **3.4 Зносостійке наплавлення**

Потужним засобом економії витрат живої і матеріалізованої праці є підвищення довговічності деталей і вузлів устаткування, машин і механізмів, що швидко зношуються методами наплавлення й напилювання.

Наплавлення зносостійкими сплавами є найбільш універсальним, економічним і широко застосовуваним у народному господарстві засобом відновлення і виготовлення деталей машин і механізмів, надання їх робочій поверхні спеціальних якостей, які сприяють зростанню терміну служби. Наплавлення, що представляє собою процес нанесення на спеціально підготовлену поверхню деталей, що виготовлені або ремонтуються розплавленого присадного металу, який утворює з поверхневими шарами деталі сплав з високими механічними і службовими властивостями.

У промисловості, будівництві, на транспорті і в сільському

господарстві застосовуються практично всі відомі способи і різновиди наплавлення. Безперервно удосконалюються і впроваджуються у виробництво прогресивні способи наплавлення: дугове, електрошлакове, індукційне, вібродугове, плазмове та ін.

На зносостійке і просте відновне наплавлення витрачається більше 5 % всіх електродів, близько 11 % зварювального дроту суцільного перерізу і майже половина всього порошкового дроту, вироблених в колишньому СРСР.

Потреба України в наплавлювальних матеріалах – електродах, порошкових дротах і стрічках цілком задовольняється за рахунок випуску на великій кількості дрібних підприємств і в спеціалізованих цехах промислових підприємств, найбільшим з яких є цех потужністю 6000 т в рік по виробництву порошкового дроту на Нижньодніпровському заводі металовиробів в м. Дніпро.

В результаті збільшення виробництва наплавочних робіт досягається велика економія металу, як за рахунок відновлювального наплавлення, так і за рахунок підвищення зносостійкості і терміну служби деталей машин і конструкцій.

Застосування наплавлювальних процесів дозволяє багаторазово відновлювати зношені деталі обладнання, металорізальний і штамповий інструмент, а також створювати нові біметалічні конструкції з необхідними технологічними і експлуатаційними властивостями, які у багато разів підвищують ресурс роботи виробів, значно скорочують витрати конструкційних і легованих інструментальних сталей і знижують трудомісткість їх виготовлення.

Процес зносостійкого наплавлення може здійснюватися різними способами. За джерелами енергії для нагрівання і плавлення зносостійких присадок і поверхні деталей наплавлення може бути класифіковане наступним чином (рис. 3.1).

Постановка завдання наплавлення, що визначає вибір способу здійснення цього процесу, починається з того ж, з чого повинна починатися будь-яка робота інженера або вченого - з чіткого формулювання завдання, яке необхідно вирішувати і цілі проведення цієї роботи - тобто уявлення очікуваного результату. Ця робота не є тривіальною, тому що необхідно обміркувати всю програму планованої роботи. Завдяки використанню наукових знань наплавлення перестало бути емпіричним мистецтвом і розвинулося в точну науку.

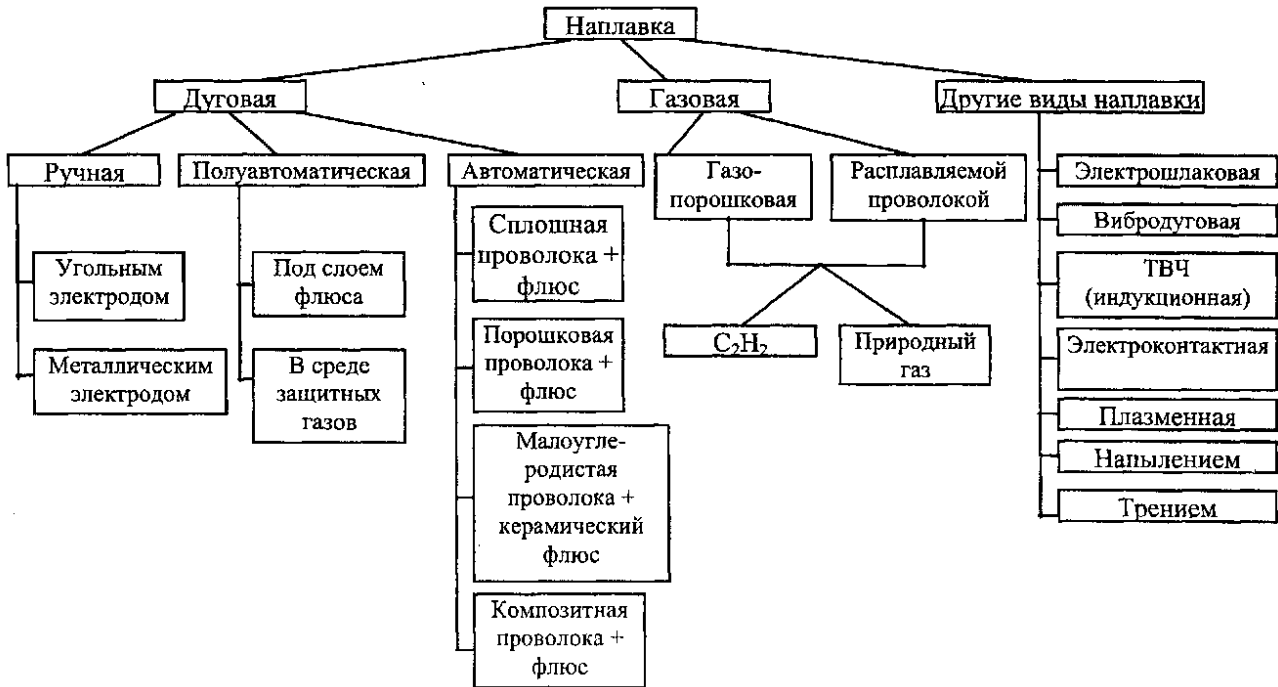


Рисунок 3.1 - Класифікація видів наплавлення за джерелами енергії

Удосконалення методів вивчення фізичних і хімічних властивостей речовин забезпечило більш точне їх визначення і можливість контролю за робочими параметрами процесів. Хімічна термодинаміка дала можливість отримати необхідну фундаментальну інформацію для оцінки оптимальних умов здійснення різних процесів при наплавленні.

Значення термодинамічних розрахунків у зварюванні і наплавленні полягає в тому, що вони дозволяють встановити і розрахувати тепловий баланс і оптимальні умови для проведення хімічних і металургійних процесів в наплавленому металі. Кількісне визначення величин термодинамічних характеристик елементів і їх з'єднань є важливою умовою в контролі і вдосконаленні основних зварювальних і наплавочних процесів.

Програмування, засноване на термодинамічних розрахунках, може бути використано для дослідження найбільш сприятливих шляхів в розробці нових зварювальних і наплавочних процесів.

Тепломісткість, теплота реакції і вільна енергія є основними термодинамічними функціями, необхідними для оцінки теплових балансів і передбачення напрямків хімічних реакцій в краплі на торці електрода і в ванні розплавленого металу.

Хімічні реакції супроводжуються зміною в розподілі енергії між речовинами, що реагують, які входять до складу електродного дроту, покриття на електродах, флюсів і навколишнім середовищем. Про це свідчить виділення або поглинання тепла. Система зазвичай стає більш стійкою, коли її теплоємність зменшується; реакція буде протікати в напрямку зменшення теплоємності. Негативна величина теплоти реакції відповідає поглинанню тепла в процесі реакції. У ряді випадків екзотермічні реакції, раз почавшись, не вимагають зовнішнього підведення енергії, як наприклад, при газокисневому різанні сталей, в той час, як для розвитку ендотермічних реакцій необхідна додаткова енергія.

Більшість промислових процесів зварювання і наплавлення, супроводжується теплообміном між системою і навколишнім середовищем. У зв'язку з необхідністю підтримки оптимальної температури при проведенні металургійних реакцій в процесі зварювання і наплавлення потрібно підведення тепла від дугового розряду при дугових видах зварювання і наплавлення або за рахунок генерування тепла при проходженні струму по розплавленому шлаку



в процесі електрошлакового зварювання або наплавлення.

Основою для всіх теплових балансів є закон збереження енергії. Тепловий баланс базується на певній кількості матеріалу, яке може бути електродом з покриттям і основним металом при ручному зварюванні і наплавленні, електродним дротом, флюсом і основним металом при автоматичному зварюванні і наплавленні.

Вільна енергія є термодинамічної функцією, яка дозволяє оцінити можливість протікання хімічних реакцій в умовах зварювання і наплавлення. Будь-яка реакція або процес супроводжується зміною вільної енергії системи і ця зміна рівна витраченої або досконалії механічній роботі під час процесу.

Величина зміни вільної енергії - це міра здатності реакції до розвитку її при розглянутих умовах. Зміну вільної енергії найчастіше обчислюють для оцінки можливості хімічної реакції. Найпростішою інтерпретацією зміни вільної енергії є те, що термодинамічно можливою реакція стає при зменшенні вільної енергії і найбільш ймовірно її завершення, якщо зміна вільної енергії буде великою негативною величиною. Якщо, зміна вільної енергії дорівнює нулю, то речовини, що реагують перебувають в стані рівноваги з продуктами реакції. Позитивне значення зміни вільної енергії свідчить про те, що реакція протікає в напрямку зворотному заданому, отже, даний процес термодинамічно неможливий при даних умовах. Зміна вільної енергії під час процесу пов'язана зі зміною теплоємності й ентропії.

$$F_T = H_T - T\Delta S_T$$

Це співвідношення показує, що енергія, вироблена механічною роботою, дорівнює загальній тепловій енергії, поглиненої або виділеної, зменшеної на величину  $T\Delta S_T$ , яка втрачена безповоротно. Зміна ентропії може розглядатися як міра пов'язаної енергії в системі, в якій відбувається корисна робота. Отже, збільшення ентропії буде відповідати збільшенню пов'язаної енергії в системі. Кількісно зміна ентропії в будь-якій системі при постійній температурі визначається поглиненою і/або виділеною теплотою, поділений на абсолютну температуру.

Зміну вільної енергії для даного процесу можна визначити, використовуючи величини вільної енергії утворення кожного із з'єднань, що беруть участь в реакції. Такий розрахунок подібний

обчисленню теплоти реакції, якщо виходити з теплоти утворення. Для елементів зміна вільної енергії освіти прийнято вважати рівним нулю. Вільна енергія не залежить від шляху розвитку даного процесу. Знаючи початковий і кінцевий стан складного процесу, представляється можливим оцінити зміну вільної енергії, що відбувається в системі.

## **4 ЕЛЕКТРОДИ ІЗ ЗАЛІЗНОГО ПОРОШКУ В ПОКРИТТІ**

Вводити додатковий металевий матеріал в покриття зварювальних електродів з метою інтенсифікації процесу плавлення присадочного матеріалу запропонували ще в 1937 р. Е.М. Кузмак і І.П. Доронін. На стержні діаметром 4,0; 5,0 і 6,0 мм, з попередньо нанесеним тонким покриттям, намотували спіраль з дроту малого діаметру. Потім на ці електроди наносили другий шар покриття того ж складу, що і перший. Маса намотаної спіралі становила 100-110 % маси стержня. За даними Е.М. Кузмак і І.П. Дороніна, запропоновані електроди мали коефіцієнт наплавлення порядку 18-20 г / А·ч, тобто більше, ніж в 2 рази в порівнянні з промисловими електродами без залізного порошку.

Приблизно через десять років фахівці ряду країн (Англії, Франції, Німеччини, США та ін.), оцінивши переваги пропозиції Е.М. Кузмак і І.П. Дороніна, розробили промислові марки високопродуктивних електродів із залізним порошком. В результаті систематичних досліджень особливостей процесів плавлення електродів з різною кількістю залізного порошку в покритті, розробки вимог до залізного порошку, вивчення технології його виготовлення в наступні роки була запропонована широка номенклатура високопродуктивних електродів, визначився стійкий попит на них. У той же час, споживач став диктувати постачальникам все нові вимоги до електродів з залізним порошком, регламентуючи типи покриттів, зварювально-технологічні характеристики, можливість зварювання в інших, крім нижнього, положеннях, властивості та експлуатаційні характеристики зварювальних з'єднань і т.д.

Процес вдосконалення високопродуктивних електродів в багатьох країнах знаходиться в розвитку і в даний час. Фірми ряду західних країн пропонують споживачеві досить широку номенклатуру електродів різного призначення з основним, рутіловим, рутіло-основним і іншими типами покриттів, що характеризуються коефіцієнтом наплавлення 12-20 г/А·ч.

У нашій країні деяке поживлення інтересу до високопродуктивним електродів намітилося приблизно з 1950 по 1965 рр. Саме в ці роки були розроблені електроди ОЗС-3, АНО-1, ЗРС-1 і ін. З коефіцієнтом наплавлення 14-15 г/А·ч. З різних причин протягом декількох десятиліть інтерес до такого роду електродів знижувався, хоча промислові та економічні вигоди застосування високопродуктивних електродів досить переконливі.

Фірма Höganas (Швеція) - одна з найбільш кваліфікованих і найбільших виробників і постачальників залізного порошку для виробництва зварювальних матеріалів. Ця фірма безперервно вдосконалює якість залізного порошку, розширюючи його сортамент, номенклатуру і вибір інших матеріалів для вирішення найрізноманітніших завдань.

Введення залізного порошку в покриття зазвичай припускає деяке збільшення товщини покриття (коефіцієнта маси покриття). При цьому маса шлакоутворюючих матеріалів в покритті не збільшується, що дозволяє знизити загальні витрати на матеріали і отримати економію електроенергії. Залізний порошок в покритті сприяє охолодженню стержня при зварюванні, так як нагрів частинок порошку поглинає тепло, що дозволяє підвищити зварювальний струм без небезпеки перегріву стержня і забезпечити більш високу продуктивність плавлення електрода.

Наявність залізного порошку в покритті, крім того, позитивно впливає на наступні зварюально-технологічні характеристики електродів: підвищує стабільність горіння дуги забезпечує швидке запалювання і повторне запалювання дуги; знижує розбрикування електродного металу, покращує формування зварного шва і віддільність шлаку від металу шва.

Крім підвищення продуктивності і поліпшення зварюально-технологічних характеристик електродів введення залізного порошку в покриття покращує якість металу шва. Попередження перегріву стержня і покриття сприяє більш швидкому охолодженню металу шва

і формування дрібнозернистої структури, що, в свою чергу, підвищує міцність і пластичність наплавленого металу. При цьому також поліпшується структура і властивості колошовної зони.

У табл. 4.1 наведені технічні вимоги до зернового складу декількох марок залізного порошку фірми Hognas, а в табл. 4.2 - хімічний склад.

Таблиця 4.1 - Розподіл часток порошоків за розмірами, %

W 40.24			W 60.281.NC			W 100.25		
Розмір, мкм	Норми вимог	Типовий склад	Розмір, мкм	Норми вимог	Типовий склад	Розмір, мкм	Норми вимог	Типовий склад
+500	0	0	+300	≤ 1	0	+212	0	0
300-500	≤ 10	3	212-300	≤ 15	12	150-212	≤ 1	2
212-300		23	150-212		35	106-150		20
150-212		34	75-100		49	75-106		33
106-150		90	-75	≤ 15	4	45-75		28
75-106		8				-45	5-25	17
-150	20-50	40						
-75	≤ 10	2						

Таблиця 4.2

Марка порошку	Хімічний склад, мас. %					
	C	S	P	Si	Mn	N
W 40.24	0,03-0,06 0,05	<0,010 0,008	<0,005 0,004	<0,12 0,10	<0,15 0,11	-
W60 28LNC	<0,01 0,004	<0,010 0,006	<0,005 0,004	<0,12 0,10	<0,15 0,11	<0,0015 0,0010
W 100.25	<0,010 0,008	<0,010 0,008	<0,010 0,008	<0,010 0,008	<0,010 0,008	-

Залізний порошок W 40.24 призначений для електродів з помірним (до 130 %) переходом електродного металу в шов. Частинки цього порошку мають неправильну форму і пронизані мікропорами.

Введення незначної кількості такого порошку в покриття невеликої товщини трохи підвищує його електропровідність і стабільність зварювальної дуги, покращує повторне запалювання дуги. Формується так зване "еластичне" горіння дуги.

Порошок W 40.24 універсальний - його вводять із зазначеними вище цілями в покриття всіх видів. Насипна щільність порошку 2,4-

2,6 г/см<sup>3</sup>.

Великі і глибокі дослідження особливостей протікання струму, енергетичного і теплового балансу в зварювальній дузі виконали відомі вчені К.К. Хренов, А.А. Єрохін, А.Г. Мазель [1-4] та інші. Встановлено, що зварювальна дуга характеризується значною нерівномірністю розподілу електричного поля і виділення тепла в стовпі дуги, в анодній і катодній областях. Щоб ефективно використовувати теплову потужність. Особливо при проектуванні електрода із залізним порошком в покритті в тому числі високопродуктивного, необхідно чітко розуміти процеси, супутні горінню дуги.

З рис. 4.1, на якому представлена схема падіння напруги по довжині дуги, можна вивести, що:

$$U_d = U_k + U_a + E \cdot L_d \quad (4.1)$$

де  $U_d$  - падіння напруги в дузі, В;

$U_k + U_a$  - сума катодного і анодного напруг, В;

$E$  - градієнт напруги в стовпі дуги, В/мм;

$L_d$  - довжина дуги, мм.

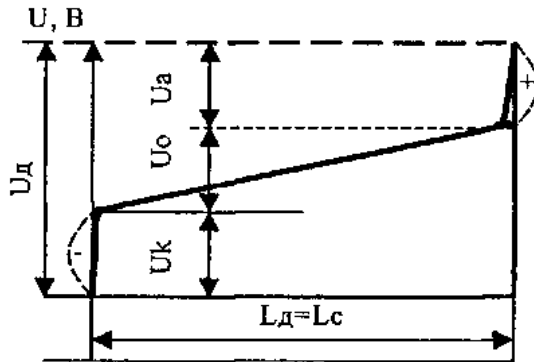


Рисунок 4.1 - Схема падіння напруги по довжині дуги.

За даними [4], градієнт падіння напруги при зварюванні електродами УОНИ-13/55 складає 2,0-2,6 В / мм, електродами ЦМ-7 - 4-5 В / мм при силі зварювального струму 150-200 А і на обох полярностях.

#### 4.1 Відділення зварювального шлаку

Одним з недоліків електродів для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей, в тому числі електродів з залізним порошком, є незадовільна віддільність шлаку. Відомо, що електроди з різними видами покриттів, що містять залізний порошок, часто забезпечують задовільну віддільність шлаку - легка або мимовільна з поверхні одиночного валика, кутового шва, однопрохідного шва виконаного в неглибоке оброблення. Однак, з глибоких оброблень і такі шлаки, як правило, видаляються погано. Можна вважати, утворення «березової кори», шпінелей, шпінелідов відбувається в результаті хімічних реакцій на етапі затвердіння взаємодіючих шлаку і металу. Утворення «березової кори» слід розглядати як незавершеність розробки зварювального матеріалу, а отже, такий матеріал не можна застосовувати для наплавлення.

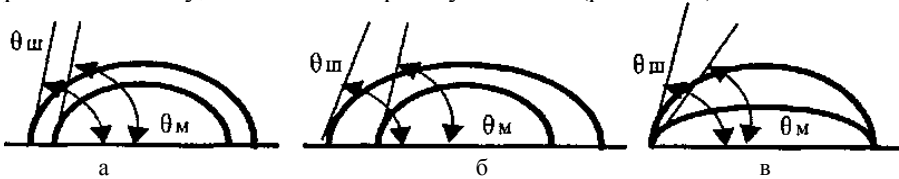
#### 4.2 Взаємодія і зчеплення шлаку з металом на площині та в обробленні

Умови формування шлаку на поверхні одиночного (наплавленого) валика і в обробленні значно відрізняються. Шлак на поверхні одиночного валика вільно розтікається і займає положення, яке визначається температурними умовами процесу, міжфазним і поверхневим натягом, змочуваністю і мінімальним запасом енергії взаємодіючих фаз. Когезійні властивості шлаку, його міцність обумовлюється його будовою при відсутності зовнішніх силових взаємодій.

При зварюванні в оброблення в результаті взаємодії з її стінками шлак ущільнюється, його міцність підвищується. Різниця коефіцієнтів теплового розширення металу і шлаку, а також зближення крайок оброблення, після зварювання кореневого шва і наступного за ним шару зумовлюють виникнення ефекту, що закріплює і посилюється розвиненим рельєфом поверхні шва (лускатість), а також нерівномірним оплавленням стінок розділки.

Можна вважати, що велике значення для віддільності шлаку має і його розподіл на поверхні шва. На рис. 4.2 показані три можливих

варіанти розподілу шлаку на поверхні шва при різних крайових кутах змочування шлаку  $\Theta_{Ш}$  і металу  $\Theta_{М}$ . При  $\Theta_{Ш} = \Theta_{М}$  (рис. 4.2 а) шлак рівномірним шаром розподіляється на поверхні шва. Повна поверхня шлаку в обробленні при  $\Theta_{Ш} < \Theta_{М}$  (рис. 4.2 б) найбільша, в порівнянні з варіантами  $\Theta_{Ш} = \Theta_{М}$  або  $\Theta_{Ш} > \Theta_{М}$ . В останньому випадку (рис. 4.2 в) поверхня контакту шлаку з металом шва і стінками оброблення мінімальна, а отже, і віддільність шлаку при інших рівних умовах повинна бути найлегшою. Таким чином, слід прагнути до отримання шлаків серповидної форми (рис. 4.2 в). Найменш сприятливим є розподіл шлаку, відповідно варіанту  $\Theta_{Ш} < \Theta_{М}$  (рис. 4.2 б).



а)  $\Theta_{Ш} = \Theta_{М}$  б)  $\Theta_{Ш} < \Theta_{М}$ ; в)  $\Theta_{Ш} > \Theta_{М}$ .

Рисунок 4.2 - Основні варіанти розподілу шлаку на шві

У попередні роки були запропоновані різні гіпотези про механізм і природу зчеплення шлаку з металом. Згідно з однією з них, найбільш визнаної, зчеплення шлаку з металом здійснюється через оксидну плівку, що утворюється в процесі окислювально-відновних реакцій при затвердінні на кордоні розділу рідкий шлак - метал. Міцність зчеплення між шлаком і металом визначається оксидною плівкою, тобто переважно хімічними силами. До підтвердження цієї гіпотези наводиться така схема. При взаємодії рідкого шлаку з затверділим металом, завдяки окислювальній дії шлаку, на поверхні наплавленого металу утворюється тонка оксидна плівка, поява якої залежить від температури, складу шлаку і тривалості його взаємодії з металом в активній хімічній фазі їх контакту. Кристалічна решітка FeO добудовує кубічну решітку  $\alpha$ -заліза, а магнетит добудовує грати вюстита, утворюючи з'єднання типу шпинелей  $MeOR_2O_3$  ( $MeR_2O_4$ ), чим і пояснюється міцне зчеплення шлаку з поверхнею металу шва.

За інших рівних умов (режим зварювання, геометрія оброблення і т.д.) віддільність шлаку залежить від складу присадного матеріалу, що визначає взаємодію між шлаком і металом шва. Отже, склад вихідних матеріалів і шлаку є головним фактором, всі інші - похідні. У той же час за рахунок зміни складу можна регулювати поверхневі властивості, коефіцієнт теплового розширення (КТР) і міцність шлаку.

В роботі [9] при аналізі сил зчеплення шлаку з металом розглядають переважно поверхневі властивості. Механізм зчеплення шлаку з металом за рахунок хімічних сил, за даними роботи [9], пов'язаний з поверхневими властивостями фаз. Міжфазний натяг характеризує енергію взаємодії атомів металу з іонами шлаку. Це повинно чинити певний вплив на міцність зчеплення шлаку з металом, а отже, і на відділення шлакової кірки. Крім того, на хімічне зчеплення шлаку і металу великий вплив мають надавати поверхневе і міжфазний натяг на межі розділу «метал-шлак», від величини яких залежить змочування металу рідким шлаком. Зі збільшенням міжфазного натягу погіршується змочування металу шлаком, а сила зчеплення (адгезія) при цьому зменшується. Чим ближче за своєю молекулярною природою шлаковий розплав і поверхня металу, тим менше міжфазний натяг на кордоні «розплав-метал» і тим більше адгезія шлаку до металу.

Наведений вище аналіз, відображає лише малу частину факторів, що беруть участь в зчепленні шлаку з металом. Більш повний аналіз можна зробити, розглядаючи сукупність взаємодіючих факторів, які складають механізм зчеплення і віддільності шлаку.

Такими факторами, крім розглянутих вище, є:

- коефіцієнт термічного розширення шлаку;
- положення шва, тобто на площині або в обробленні, конструкція оброблення;
- просторове положення шва;
- міцність шлаку.

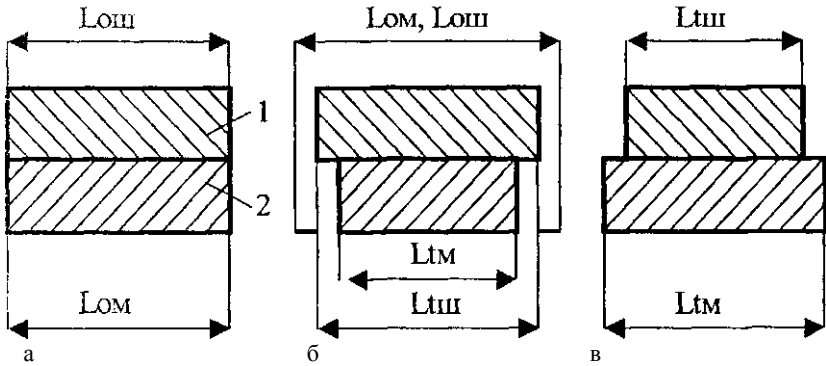
Розглянемо найпростішу схему взаємодії шлаку і металу при їх спільному охолодженні з певної температури  $t^{\circ}$  С. Припустимо, що при цій температурі розміри шлаку і металу рівні  $L_{ш} = L_{М}$  (рис. 4.3 а). При охолодженні до кімнатної температури, якщо  $KTR_{ш} < KTR_{М}$ , то  $t_{ш} > t_{М}$  (рис. 4.3 б), якщо  $KTR_{ш} > KTR_{М}$ , то  $t_{ш} < t_{М}$  (рис. 4.3 в). Отже, для того, щоб зруйнувати зчеплення шлаку з крайками оброблення або хоча б зменшити його заклинювання в обробленні, повинна бути виконана умова:  $KTR_{ш} > KTR_{М}$ .

$KTR$  шлаків ряду промислових марок електродів менше  $KTR$  металу для зварювання (або наплавлення) якого вони призначені.

Протягом багатьох років в нашій країні під час обговорення питань і завдань розробки і застосування електродів із залізним порошком мали на увазі: «високопродуктивні електроди із залізним



порошком в покритті». Тим часом, сьогодні важко назвати кілька марок електродів із залізним порошком, які були б наділені властивостями і перевагами, сучасних електродів даної групи.



а) -  $t_{omh} = t_{om}$  (при  $900^{\circ}C$ ); б) -  $t_{omh} < t_{om}$  (при  $20^{\circ}C$ ); в) -  $t_{omh} > t_{om}$  (при  $20^{\circ}C$ )

Рисунок 4.3 - Схема взаємодії шлаку (1) і металу (2) при спільному охолодженні

Фірми - виробники зварювальних матеріалів багатьох промислово розвинених країн, відповідали на питання ринку, формуючи попит, систематично вдосконалюють електроди підвищеного попиту, призначені для зварювання низьковуглецевих низьколегованих сталей середньої міцності. Одним з інструментів цього процесу вдосконалення є залізний порошок.

В останні роки істотно розширилися функції залізного порошку: його покриття рутилові, основні, рутило-основні, цирконієво-основні та ін. Залізний порошок вводять в покриття різної товщини в перекладі на коефіцієнт маси покриття від 40 до 200 % і в кількості від 3-4 % до 60-80 % від маси покриття.

Порошок вводять з метою поліпшення запалювання і повторного запалювання дуги, підвищення стійкості зварювальної дуги, підвищення продуктивності процесу плавлення електродного металу (на 4-10 %) і значного підвищення продуктивності в 2,5 рази в порівнянні з електродами без залізного порошку.

Введенням залізного порошку в покриття спільно з іншими компонентами регулюється формування наплавленого металу при зварюванні в різних просторових положеннях, різна лускатість шва і рухливість шлаку. Залізний порошок використовують для регулювання тепловкладення в виріб, проплавляючої здатності дуги

або забезпечуючи можливість зварювання стикових з'єднань з нерегулярними або підвищеними зазорами, в т.ч. без підкладок.

Електроди із залізним порошком розробляють і застосовують для зварювання або наплавлення, тільки або переважно, в нижньому положенні, для зварювання горизонтальних швів на вертикальній площині і навіть - вертикальних швів зверху вниз.

Реалізується і регулюється все це різноманіття просторових положень зварювання і наплавлення за рахунок вибору діаметра стержнів, коефіцієнта маси покриття, а також за рахунок вибору оптимальної бази (системи) покриття і різного роду добавок. При цьому також регулюються енергетичні характеристики електродів - за рахунок складу і товщини покриття, тобто номінальної напруги дуги і виділення теплової потужності в дузі.

Електроди з різними типами покриття і залізним порошком допускають зварювання сталей з різною міцністю, в тому числі схильних до «загартування» в результаті впливу термічного циклу зварювання; в зварних з'єднаннях з таких сталей регламентується вміст водню, електроди із залізним порошком задовольняють вимогам за вмістом водню найжорсткіших регламентів.

Однією з найважливіших характеристик електрода є номінальна напруга дуги. На це вказали А.А. Єрохін [3], А.Г. Мазель [4], інші фахівці, але цю характеристику і сьогодні недооцінюють. Необхідно підкреслити - розробники електродів повинні пам'ятати значення номінальної напруги дуги і вплив на зварювально-технологічні властивості електродів.

Однією з важливих характеристик електродів є розбризування (втрати) електродного металу. Сучасні електроди характеризуються розбризуванням (з урахуванням всієї металевої складової електрода) не більше 2 %. Цей показник слід прийняти в якості одного з основних критеріїв при розробці будь-якого електрода і, в тому числі, з залізним порошком в покритті.

Хімічні і механічні властивості наплавленого металу в основному визначають склад дроту, використовуваного для виготовлення електродів, а також компонентів покриття.