

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни «Наукові основи вибору  
матеріалів та технологій»  
для студентів спеціальності  
132 «Матеріалознавство»  
усіх форм навчання

2023

Конспект лекцій з дисципліни «Наукові основи вибору матеріалів та технологій» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання /Укл.: О.А. Глотка, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 100 с.

Укладачі: О.А. Глотка, к.т.н., доц.  
О.В. Лисиця, ст.викладач

Рецензент: В.Ю. Ольшанецький, д.т.н., проф

Відповідальний за випуск: О.В. Климов, к.т.н., доц.

Рекомендовано до видання  
НМК інженерно-фізичного  
факультету  
Протокол №7  
від «14» березня 2023р.

Затверджено на засіданні  
кафедри «Фізичне  
матеріалознавство»  
Протокол № 6  
від «2» березня 2023 р.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИНОБУДІВНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>10</b>
1.1. Матеріали із підвищеною та високою міцністю.....	10
1.2. Матеріали із високими пружними властивостями.....	12
1.3. Матеріали малої густини та високої питомої міцності.....	17
1.4. Матеріали технічного призначення.....	25
<b>2. ВИБІР МАРКИ СТАЛІ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....</b>	<b>45</b>
2.1. Вибір допустимого напруження.....	46
2.2. Забезпечення надійності.....	48
2.3. Забезпечення довговічності.....	50
2.4. Послідовність розглядання та вибору марки сталі.....	51
<b>3. РОЗМІРНА СТАБІЛЬНІСТЬ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ. ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ В ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ.....</b>	<b>56</b>
3.1. Характеристика розмірної стабільності металевих матеріалів.....	56
3.2. Методи визначення розмірної стабільності металів та сплавів.....	60
3.3. Загальна характеристика основних методів стабілізації обробки.....	61
<b>4. КОМПЛЕКСНІ МЕТОДИ ТА КРИТЕРІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБУ ТА ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>65</b>
4.1. Оптимізація вибору матеріалу із врахуванням надійності виробу.....	65
4.2. Оцінка ефективності використання вибору матеріалів із врахуванням їх фізичних та механічних властивостей.....	70
4.3. Оцінка ефективності використання матеріалів із урахуванням їх вартості.....	72
<b>5. СТАТИСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ (СКРЯ).....</b>	<b>74</b>
5.1. Класифікація та основні функції систем СК та РЯ виробів.....	74
5.2. Використання системи СК та РЯВ в машинобудуванні.....	77
<b>6. ПОРЯДОК РОЗРОБКИ ТА ПОСТАЧАВАННЯ ПРОДУКЦІЇ НА ВИРОБНИЦТВО.....</b>	<b>80</b>

<b>7. МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ, ЩО ФОРМУЄ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>84</b>
7.1. Технологічний процес, технологічна операція, їх структура. Кла- сифікація операцій термічної (хіміко-термічної) обробки.....	84
7.2. Порядок організації науково-технічних розробок в області технологічної підготовки виробництва, приймання та передачі їх у виробництво.....	87
7.3. Порядок виконання, прийомки та передачі у виробництво розробок нових технологічних процесів.....	88
<b>8. ЄДИНА СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА (ЄСТПП).....</b>	<b>91</b>
<b>9. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ.....</b>	<b>93</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>99</b>

## ВСТУП

Мета: викладання дисципліни полягає в тому, щоб розкрити можливості раціонального вибору матеріалу і технології термічної обробки, які забезпечуватимуть одержання необхідного рівня механічних та експлуатаційних властивостей виробів при умові економного витрачання матеріалів і енергетичних ресурсів в процесі їх виготовлення.

Завдання: полягає в тім, що на основі знань теорії термічної обробки і принципів легування машинобудівних матеріалів, ураховуючи при цьому умови роботи виробів при експлуатації, навчити майбутніх фахівців науково обґрунтовувати вибір матеріалів і технологій термічної обробки для окремих груп виробів. При виборі технології необхідно враховувати її переваги та економічну доцільність в порівнянні з іншими спорідненими технологіями.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати:

**загальні компетентності:** Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми; здатність генерувати нові ідеї та реалізовувати їх у вигляді обґрунтованих інноваційних рішень; навички використання новітніх інформаційних технологій; здатність до подальшого автономного та самостійного навчання на основі новітніх науково-технічних досягнень; здатність спілкуватися іноземною мовою в професійній (науково-технічній) діяльності;

**фахові компетентності:** Здатність критичного аналізу та прогнозування характеристик нових та існуючих матеріалів, параметрів процесів їх отримання та обробки; здатність застосовувати отримані знання для стандартизації, сертифікації й акредитації процесів термічної обробки металів, матеріалів та виробів; здатність застосовувати системний підхід до вирішення інженерних проблем на основі досліджень в рамках спеціалізації; здатність інтерпретувати, презентувати і захищати результати науково-дослідницької діяльності в фаховому середовищі та публікувати результати своїх досліджень у наукових фахових виданнях; здатність здійснювати аналіз техніко-економічних показників, безпеки застосування та експертизу конструкторсько-технологічних рішень щодо процесів термічної обробки та обладнання для їх здійснення; здатність розробляти плани і проекти для забезпечення досягнення поставленої певної мети з урахуванням всіх аспектів

проблеми, що вирішується, включаючи виробництво, експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію компонентів здійснення термічної обробки металі; здатність оцінювати показники надійності та ефективності функціонування виробів з застосованими процесами термічної обробки

**Очікувані програмні результати навчання:** Знання щодо оптимального вибору технологій термічної обробки і обладнання. Знання, що забезпечать можливість теоретично обґрунтовувати конструкції обладнання на основі, загальних принципів конструювання, теорії взаємозамінності, нормативних та довідкових даних для контролю відповідності технічної документації, виробів і технологій стандартам, технічним умовам та іншим нормативним документам. Знання конструкцій, методик вибору і розрахунку, основ обслуговування і експлуатації обладнання, що застосовується в процесах термічної обробки

### **Програма навчальної дисципліни:**

**Змістовий модуль 1.** Класифікація матеріалів і видів термічної обробки.

**Тема 1.** Класифікація конструкційних та інструментальних матеріалів за функціональним призначенням.

Класифікація конструкційних та інструментальних матеріалів за функціональним призначенням. Матеріали із підвищеними міцністю та технологічністю. Матеріали, стійкі до спрацювання. Види спрацювань.

Матеріали із високими пружними властивостями, стійкі до дії умов експлуатації (середовища, тиску, температури, часу): жароміцні, жаротривкі, корозійностійкі тощо. Інструментальні матеріали.

**Тема 2.** Класифікація технологічних операцій та процесів термічної обробки.

Загальна характеристика, сутність та призначення основних операцій термічного оброблення (відпал I та II роду, гартування, відпускання, старіння, ХТО, в тому числі і комплексні методи оброблення).

**Тема 3.** Основи вибору матеріалів для деталей машин та інструментів.

Основи вибору матеріалів для деталей машин та інструментів. Основні інформаційні джерела при пошуку матеріалів. Визначення експлуатаційних напружень та допустимих рівнів напружень. Чинни-

ки, котрі на них впливають. Заходи по підвищенню надійності виробів. Основні складові, котрі визначають цю характеристику.

Основні складові довговічності виробів. Заходи по забезпеченню та підвищенню довговічності виробів. Комплексні методи впливу на ресурс виробів: металургійні, конструкторські, технологічні, експлуатаційні.

**Тема 4.** Вибір матеріалів для виробів із врахуванням змін структури і властивостей в процесі зберігання, експлуатації та забезпечення розмірної стабільності.

Зміни структури, хімічного складу, властивостей матеріалів в процесі зберігання та експлуатації виробів. Зміни, котрі відбуваються при зберіганні гум, полімерів, пластмас, сплавів на основі алюмінію. Вплив умов експлуатації на зміни структури, хімічного складу, властивостей корозійнотривких, жаростійких, жароміцних сталей та сплавів. Заходи по зменшенню швидкості протікання цих процесів.

Стабільність розмірів виробів та заходи по її забезпеченню.

**Тема 5.** Комплексні методи оцінки ефективності вибору матеріалу.

Комплексні методи оцінки ефективності вибору матеріалу. Несівна здатність виробу, основні чинники впливу. Обґрунтування вибору матеріалу за мінімальною масою при постійній надійності.

**Змістовий модуль 2.** Основи вибору технології оброблення.

**Тема 6.** Система технологічної підготовки виробництва (СТПВ).

Система технологічної підготовки виробництва СТПВ. Сутність, призначення, стандарти (ГОСТ 14.003). Складові СТПВ: забезпечення технологічності виробу, розроблення технологічних процесів, проектування технологічного обладнання та пристосувань. Розробка та передача у виробництво нових технологій. Види випробувань виробів.

**Тема 7.** Статистичний контроль та регулювання якості виробів.

Статистичний контроль та регулювання якості виробів та технологічних процесів: основні терміни та їх визначення: вибірка, проба, точність, стабільність, статистичний контроль та регулювання. Статистичні характеристики матеріалів. Статистичний контроль та регулювання якості виробів: комплексна схема і її використання.

Статистичне регулювання технологічних процесів та статистичний аналіз точності та стабільності процесу. Методи визначення точності та стабільності технологічних процесів. Аналіз рекламцій.

**Тема 8.** Порядок розроблення та передачі продукції у серійне виробництво.

Порядок розроблення та передачі продукції у серійне виробництво. Основні етапи по розробці нових деталей, інструментів, приладів, обладнання. Пошукові роботи, науково-дослідні роботи, ескізне проектування. Розроблення технологічної документації. Технічне проектування, дослідно-експериментальні роботи.

Виготовлення дослідних зразків виробів, інструментів, машин та проведення випробувань (лабораторних, стендових, натурних). Система державних випробувань продукції (ГОСТ 16505). Основні терміни, визначення, сутність. Перевірка експлуатаційно-технічної, конструктивної, технологічної, контрольної документації та передача у виробництво.

**Тема 9.** Матеріалознавчі основи вибору технології оброблення та обладнання.

Матеріалознавчі основи вибору технології обробки та обладнання. Вхідні дані для вибору ТП, урахування альтернативних методів оброблення. Критерії оптимізації при виборі технології: енергозатрати, трудові затрати, собівартість, вплив на екологію. Енергозберігальні технології, термічне оброблення в потоці металургійного виробництва.

Співставлення вибраних варіантів технології на одно – та багатокритеріальній основі. Обґрунтування вибору обладнання для здійснення вибраного технологічного процесу (річний випуск, умови праці, цехова собівартість). Уніфікація технологій, технологічних пристосувань.

**Тема 10.** Техніко-економічне обґрунтування вибору варіанта термічної обробки (ТО).

Вибір варіантів ТО на підставі техніко-економічного обґрунтування. Цехова собівартість – як базова характеристика запропонованого варіанта ТО. Складові цехової собівартості: основні матеріали, допоміжні матеріали, паливо, електроенергія, заробітна плата.

Складові цехової собівартості: силова електроенергія, амортизація обладнання, технологічні речовини, ремонт і обслуговування обладнання, витрати на технологічні пристосування, на утримання виробничої площі. Аналіз цехової собівартості та напрямки по її зниженню.

Підґрунтям або фундаментом для вивчення дисципліни «Наукові основи вибору матеріалів та технологій» є такі дисципліни як «Металознавство», «Теорія і технологія термічної обробки», «Кольорові метали і сплави», «Машинобудівні матеріали», «Сталі і сплави з особливими властивостями», «Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні», «Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів» та інші.

## **1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИНОБУДІВНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Ця характеристика буде наведена у відповідності (послідовності) з основними експлуатаційними характеристиками матеріалів із врахуванням їх призначення. Тобто класифікація матеріалів заснована на службових властивостях. Відхід від традиційних класифікацій за структурою, хімічним складом, типовими технологіями термічної обробки дозволяє спеціалістам-матеріалознавцям, конструкторам краще орієнтуватися при вирішенні питання вибору матеріалів.

### **1.1. Матеріали із підвищеною та високою міцністю**

В цю групу сталей входять вуглецеві та низькоуглецеві конструкційні сталі, високоміцні середньолеговані сталі та високоміцні високолеговані сталі із мартенситним старінням (мартенситостаріючі сталі).

#### ***Вуглецеві та низькоуглецеві конструкційні сталі.***

*Вуглецеві сталі* стандартизовані ДСТУ 2651:2005 (ГОСТ 380-2005) «Сталі вуглецеві звичайної якості» та ДСТУ 7809:2015 (ГОСТ 1050-88) «Сталь якісна та високоякісна. Сортовий та фасонний прокат, калібрована сталь».

Найважливіша характеристика сталей – тріщиностійкість ( $K_{1C}$ ). Збільшення  $K_{1C}$  при підвищенні температури відпускання не є оптимальним варіантом. Так наприклад, сталь із 0,3%С (після термообробки) має  $\sigma_{0,2} = 500$  МПа та  $K_{1C} = 100 \dots 120$  МПа/м<sup>2</sup>. Різке зниження міцності при підвищенні температури відпускання не компенсує переваг високої  $K_{1C}$ .

*Низьколеговані сталі з карбідним зміцненням* (14Г, 09Г2, 09ГС). Використовують без термічної обробки, в гарячекатаному стані або після нормалізації. Мають гранулярність, високу міцність, низьку матеріалоемність виробів.

*Сталі із карбонітридним зміцненням* (14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ). Після нормалізації границя текучості сталей:  $\sigma_{0,2 (14Г2АФ)} = 400$  МПа;  $\sigma_{0,2 (16Г2АФ)} = 450$  МПа;  $\sigma_{0,2 (18Г2АФ)} = 500$  МПа.

Легування міддю сталі 15Г2СФД значно підвищує її корозійну стійкість.

Застосування до сталей 12Г2СМФ та 12ГН2МФЮ гартування і високого відпуску знижує поріг холодноламкості до  $-70\dots-90^{\circ}\text{C}$ . Економія металу становить 14..30% (порівняно із 14Г2) та до 50% (порівняно із Ст3).

**Високоміцні середньолеговані сталі** (30ХГСН2А, 40ХГСН2А, 25Х2ГНТА). З цих сталей виготовляють: поковки, листи, труби тощо; циліндри, балки, осі, шестерні та інші відповідальні важко навантажені деталі.

Різновиди термічної обробки: гартування та відпускання при  $200\dots260^{\circ}\text{C}$ ; ізотермічне гартування при  $240\dots280^{\circ}\text{C}$  (відсутність відпуску підвищує характеристику міцності,  $\sigma_{\text{в}}$  сягає 1800...2000 МПа).

Особливі вимоги до конструкцій виробів із зазначених сталей та технологій їх виготовлення:

- шорсткість поверхні більше ніж 0,8 мкм;
- відсутність рисок від обробки;
- поверхнева пластична деформація;
- відсутність переходів жорсткості та концентраторів напружень, неприпустимість контактних перекосів;
- припуски в отворах після термічної обробки видаляються;
- після шліфування необхідно проводити відпускання при  $200\dots300^{\circ}\text{C}$  (3 год).

**Високоміцні високолеговані сталі із мартенситним старінням (мартенситостаріючі сталі).** Основною характерною ознакою сталей є утворення безвуглецевого мартенситу при гартуванні. Найбільше розповсюдження в промисловості та техніці отримала сталь Н18К9М5Т, хоча близько 30 марок сталей цієї групи, наприклад Н16К11М3Т2, Н12К15М10, Н16К15В9М2, після гартування і наступного старіння внаслідок утворення інтерметалідів отримують  $\sigma_{\text{в}}$  від 1900 до 3500 МПа (Н18К9М5Т, Н18К18М10). Механічні властивості сталі Н18К9М5Т:  $\sigma_{\text{в}} = 2100$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1900$  МПа;  $\psi = 45\%$ ;  $\delta = 8\%$ ; КСУ = 60 Дж/см<sup>2</sup>.

Особливість хімічного складу сталі Н18К9М5Т дозволяє отримати двофазну структуру ( $\alpha + \gamma$ ). Завдяки стабілізації 18...30%А можна суттєво підвищити ударну в'язкість, відносне видовження та тріщиностійкість, опір ударно-циклічному навантаженню (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Механічні властивості сталі Н18К9М5Т після різних режимів термічної обробки (зверніть увагу на те, що при порівняно невеликих енерговитратах значно підвищуються  $K_{IC}$  та КСУ)

Варіант термічної обробки	Режим термічної обробки	$A_{заль}$ , %	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	$K_{IC}$ , МПа/м <sup>2</sup>
			МПа		%			
звичайний	Гартування, 820°C, + старіння, 490°C, 3 год	0	2100	2050	8	57	40	97
термоциклічна обробка	Гартування, 820°C, 5 хв (двічі) + старіння, 490°C, 3 год	18	1950	1990	10,5	63	90	140

*Примітка.* Зменшення, наприклад,  $\sigma_{0,2}$  на 5,9% дозволяє підвищити КСУ на 125%,  $K_{IC}$  на 47%, тріщиностійкість на 25%.

Сталі цієї групи характеризуються високим опором розвитку тріщини.

Застосування сходинкового старіння (500°C, 3 год + 425°C, до 8 год), а також тривалого старіння при 435...450°C (40...50 год) порівняно зі старінням при 500°C забезпечує високу розмірну стабільність.

Сталі використовують в авіабудуванні, ракетній техніці, космічній техніці; з них виготовляють шестерні, вали, робочі колеса тощо.

## 1.2. Матеріали із високими пружними властивостями

До цієї групи відносяться пружні сталі та сплави. Зважаючи на широкий спектр умов експлуатації та вимог до матеріалів існує широка низка сталей та сплавів цієї групи. Як і до усіх конструкційних сплавів до пружних матеріалів висуваються вимоги щодо:

- високої міцності в умовах статичного, динамічного та циклічного навантажень;
- високий опір руйнуванню;
- задовільна пластичність та в'язкість.

Проте основною властивістю цих матеріалів є високий опір малим пластичним деформаціям (МПД) як в умовах короткотривалих (границя пружності) так і в умовах тривалого (релаксаційна стабільність) навантажень. Отримана залежність між опором малим пластичним деформаціям та внутрішнім тертям, пружною післядією, пружним гістерезисом, тобто, опір МПД визначає весь комплекс основних властивостей.

**Класифікація пружних сплавів за основним способом зміцнення.** Холодна пластична деформація з наступним відпусканням (низькотемпературним відпалом). Цій обробці піддають вуглецеві та леговані сталі перлітного класу, низьковуглецеві сталі аустенітного класу, однофазні латуні та бронзи. Сплави характеризуються анізотропією властивостей та наведеною пластичною деформацією.

*Сплави та леговані сталі, що зміцнюються внаслідок мартенситного перетворення.* Термічна обробка може поєднуватися із термомеханічною обробкою (ВТМО, НТМО). Крім змін структури та фазового складу при відпускання зменшується рівень внутрішніх напружень.

*Зміцнення внаслідок дисперсійного твердіння (старіння).* Спостерігається в аустенітних дисперсійно-твердіючих сплавах, берилієвих бронзах. Максимальне зміцнення досягається не лише після гартування та старіння, а й після гартування, холодної пластичної деформації (ХПД) та старіння (відпуску).

**Класифікація пружних сплавів за призначенням.** *Пружні сплави загального призначення.* Сплави відносяться до класу конструкційних матеріалів, тому вони повинні мати в першу чергу високі значення границі міцності, пружності, витривалості, релаксаційної стійкості та опір руйнуванню.

До цієї групи сплавів відносяться переважно вуглецеві та леговані сталі перлітного класу, в обмеженій кількості – мартенситного класу. Сталі цієї групи мають підвищену кількість вуглецю 0,4...1,2%, що визначає високий ступінь зміцнення при ХПД або мартенситному перетворенні.

Вуглецеві пружні сталі (65,70,75,80,85,У9..У12) відрізняються низькою корозійною стійкістю, високим температурним коефіцієнтом модуля пружності, зниженою релаксаційною стійкістю навіть при незначному нагріванні. Вони не придатні для експлуатації вище 100°C. Низька прогартуваність заготовки невеликих розмірів; велике значення  $V_{кр}$ ; необхідність гартування у воді, звідси – жолоблення, значні напруження і можливе утворення тріщин.

Леговані пружні сталі відрізняються більш високою релаксаційною стійкістю, ніж вуглецеві, мають підвищені характеристики границі пружності ( $\sigma_{пруж}$ ), в'язкості та опір крихкому руйнуванню. Можливість гартувати сталі на повітрі дає низку переваг, серед яких змен-

шення зональних напружень та стабільність характеристик виробів в часі. Приклади використання сталей наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Приклади використання пружних сплавів загального призначення

Марка сталі	Приклади використання
60Г, 65Г, 70Г	Пружні механізми та машини
50ХГ, 50ХГН, 55ХГР, 55С2, 60С2	Ресори автомобілів, пружини залізничного транспорту
50ХФА, 50ХГФА, 55СГФ	Пружини відповідального призначення, ресори автомобілів
45ХН2МФА	Торсіонні вали, навантажені деталі працюючі при скручувальних навантаженнях
50ХСА, 60С2ХА, 65С2ВА, 60С2Н2А, 70С2ХА	Відповідальні деталі, пружини, ресори

Для виготовлення виробів використовують заготовки трьох груп:

а) холоднодеформовані із попереднім штампуванням. Пружини з цих заготовок піддають відпуску при 200...300°C (тривалість 2 год....15 хв);

б) термічно оброблені (гартування та відпускання) на заданий рівень міцності, твердості. Термічно оброблену або негартовану стрічку (дріт) виробляють із сталей 60, 70, У7, 65Г, 60С2А, 70С2ХА. Із заготовок цієї групи виготовляють пружини порівняно простої конфігурації, використовуючи вирубку, а якщо необхідно – невелике гнуття. При значних деформаціях внаслідок низької пластичності можливе руйнування;

в) холодно- або гарячекатані, які виробник піддає гартуванню та відпусканню. Із цих матеріалів виготовляють пружини більш складної конфігурації та точних розмірів. Після термічної обробки твердість пружин становить HRC 42...48. Сталі цієї групи можуть піддаватись ізотермічному гартуванню на структуру нижній бейніт з твердістю HRC 50...52. Переваги такої обробки: збільшення пластичності, в'язкості; зменшення схильності до крихких руйнувань (табл.1.4).

Таблиця 1.3 – Значення  $\sigma_b$  та HV в залежності від групи міцності

Група	$\sigma_b$ , МПа	HV
а)	1300...1600	375...485
б)	1610...1900	485...600
в)	□ 1900	□ 600

Таблиця 1.4 – Вплив варіанту термічної обробки сталі 60С2А на її властивості

Режим термічної обробки	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	$\delta$	$\psi$	КСУ Дж/см <sup>2</sup>
	МПа			%		
Гартування, 870° + відпускання, 420, °С	1765	1648	1529	11	48	35,3
Ізотермічне гартування при 290°С	2050	1715	1499	11	40	48,9
Ізотермічне гартування при 290°С + відпускання, 290°С	1930	1812	1648	12,5	50	48,9

*Пружні сплави спеціального призначення.* Поряд із підвищеними механічними властивостями повинні мати певні хімічні та фізичні властивості, вимоги до яких змінюються в залежності від умов експлуатації відповідних пружних елементів. До цих сплавів можуть висуватися вимоги щодо підвищення корозійної стійкості, немагнітності, тепло- та жароміцності.

Корозійностійкі сплави забезпечують більшу ефективність, ніж використання гальванічних покриттів на вуглецевих та легованих сталях. Внаслідок циклічної дії напружень руйнування захисного покриття пришвидшується.

Сталі 30Х13 та 40Х13 мартенситного класу. Робоче середовище пружних елементів виготовлені з цих сталей: вода, повітря, водяна пара або слабоокислене середовище. Типова термічна обробка: гартування, 1000...1050°С + відпуск, 300...350°С та відпуск, 500...550°С. Механічні властивості сталі 30Х13 після відпуску наведені в табл.1.5.

Таблиця 1.5 – Властивості сталі 30Х13 після відпуску

Температура відпускання, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{пц}$ , МПа	□, %	$\psi$ , %
325	1800	1350	1200	10	45
500	1850	1500	1250	11	35

Сталі 09Х15Н8Ю, 09Х17Н7ЮЛ дисперсійно-твердіючі аустенітно-мартенситного класу. Термічна обробка: гартування, 900...950°С + обробка холодом, -70°С + старіння, 450...500°С.

Мартенситно-старіючі сталі 03Х12Н10Д2Т, 04Х14К13Н4М3ТБВ тощо. Режим термічної обробки: гартування,

950°C + обробка холодом, -70°C + старіння, 550°C. Властивості сталі 04X14K13N4M3TBВ після термічної обробки наведені в табл.1.6.

Таблиця 1.6 – Властивості сталі 04X14K13N4M3TBВ

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,02}$ , МПа	$\square$ , %
04X14K13N4M3TBВ	1700	1580	1250	12

Сталі аустенітного класу (08X18N10T, 12X18N9T тощо) характеризуються високою корозійною стійкістю, немагнітні, у сталей цієї підгрупи відсутня схильність до крихкого руйнування. Використовують після гартування та холодної пластичної деформації. При деформуванні може утворитися мартенсит деформації, що суттєво зміцнює сталь, але вона набуває феромагнітних властивостей.

Сталі системи Co-Ni-Cr мають підвищений опір корозії, високі показники міцності ( $\sigma_B = 2500...3000$  МПа). Зміцнювальна термічна обробка: гартування, холодна пластична деформація та старіння (відпуск). При старіння утворюються сегрегації, в тому числі і на дислокаціях із атомів вуглецю та легувальних елементах.

Високоелектропровідні пружні сплави на основі Cu. Електропровідність міді приймається за еталон (100 %) по відношенню до інших металів. Відповідно і сплави міді мають достатньо високу електропровідність.

Границя пружності берилієвих бронз (BrB2; BrBHT1,7; BrBHT1,9; BrB2,5; BrBHT1,9Mg) не перевищує аналогічних значень для сталі, але завдяки меншому модулю пружності при розтягненні (110...130 ГПа проти 210 ГПа для сталі) вони характеризуються максимальною енергією пружної деформації  $\sigma_{пр}^2/(\sum E)$  та максимальною пружною деформацією  $\epsilon = \sigma_{пр}/E$ , що можуть бути досягнені в пружних елементах. Тому із берилієвих бронз при рівних значеннях міцності ( $\sigma$ ) може бути досягнена більша пружна деформація. Крім того, при рівному значенні  $\epsilon$  у виробках із бронзи буде зменшуватись  $\sigma$ .

Зміцнювальна термічна обробка берилієвих бронз: гартування та старіння; гартування, деформація та старіння. Властивості сплаву BrB2 наведені в табл.1.7.

Таблиця 1.7 – Властивості сплаву БрБ2

Стан матеріалу	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\square$ , %	HV	E, ГПа	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
Після гарту	500	250	40	90	117	0,7
Після старіння	1250	1000	3	370	131	0,125
Після гарту, деформації на 40% та старіння	1350	1200	2	400	135	-

Спеціальні мідні сплави БрМг0,5 та БрКд0,7 використовують для виготовлення провідників. Недоліком цих матеріалів є відносно низька міцність. Для підвищення міцності до сплавів застосовують термічну і термомеханічну обробку. Холодна деформація із ступенем 40...70% підвищує границю міцності ( $\sigma_B$ ) вдвічі, а електроопір на 3% (але таке зміцнення ефективне лише до 200°C).

Високу електропровідність також мають латуні (Л68, Л80, Л85) та мідно-нікелеві сплави (МНЦ15-20).

В цілому, до переваг сплавів цієї групи відноситься: мала схильність до крихкого руйнування, менший модуль пружності, знижений рівень міцності навіть при значній пружній деформації, підвищена електропровідність.

Жаростійкі та жароміцні сплави на нікелевій основі. Це сплави типу ХН77Т2ЮР, які здатні забезпечити експлуатаційність пружних елементів до 700°C. Зміцнювальна термічна обробка: гомогенізація (гартування) та старіння, 750...780°C.

### 1.3. Матеріали малої густини та високої питомої міцності

До матеріалів з малою густиною відносяться сплави на основі Al, Mg та неметалеві матеріали. Питома міцність ( $\sigma_B/\rho \cdot q$ ) – одна із основних характеристик для матеріалів, що використовують в аерокосмічній техніці. Високу питому міцність мають сплави на основі Ti, Be та композиційні матеріали.

*Сплави на основі алюмінію.* Характеризуються достатньо високою питомою міцністю, здатністю опиратись інерційним та динамічним навантаженням, гарною технологічністю. При густині не більше 2850 кг/м<sup>3</sup> значення  $\sigma_B$  алюмінієвих сплавів досягає 500...700 МПа. Показники питомої міцності деяких сплавів (23 км) наближаються або відповідають показникам високоміцних сталей (27 км). Більшість

алюмінієвих сплавів мають добру корозійну стійкість, високі тепло- та електропровідність, високу технологічність.

Умовні позначення стану напівфабрикатів (без позначень – без ТО):

П – напівфабрикат (сплави для холодного штампування з проволки);

М – м'який відпалений;

Т – загартований + природньо зістарений;

Т1 – загартований + штучно зістарений на максимальну міцність;

Т2 - -//-//- за режимом, що забезпечує більш високі значення опору крихкому руйнуванню, кращий опір корозії під навантаженням;

Т3 – гартування + штучне старіння за режимом, що забезпечує найбільш високий опір корозії під навантаженням ті в'язкість руйнування;

Н – нагартований ( деформація приблизно 5-7%);

Н1 – підсилено нагартований ( деформація на 20%);

ТПП – Гартування + природне старіння для підвищення міцності.

*Корозійностійкі сплави систем Al-Mg та Al-Mn* (АМц, АМг2, АМг3....6). Деформівні сплави, що не зміцнюються термічною обробкою. Відрізняються високою пластичністю, зварюваністю, підвищеною корозійною стійкістю. Обробка різанням поліпшується із підвищенням рівня легування, наприклад, АМг6 обробляється краще ніж АМг2. Використовують у відпаленому, нагартованому та напівнагартованому станах. Механічні властивості сплавів наведені в табл.1.8.

Таблиця 1.8 – Механічні властивості сплавів систем Al-Mg та Al-Mn

Сплав	Стан	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
АМц	Лист, М	130	50	20	65
АМг2	Лист, М	190	100	23	67
АМг6	Лист, негарт.	420	320	10	43

Примітка. М – м'який стан, після рекристалізаційного відпалу.

*Дюралюміні, сплави системи Al-Cu-Mg-Mn* (Д1, Д16, Д18, Д20, ВД17). Деформівні сплави, що зміцнюються гартуванням та старінням. Порівняно з чистим алюмінієм вирізняються істотно більшою міцністю. Густина сплавів коливається від 2500 до 2800 кг/м<sup>3</sup>, температура плавлення становить близько 650 °С. Зварюються точковим методом, схильні до утворення тріщини та МКК. Сплави широко використовують в авіабудуванні, при виробництві швидкісних потягів та у багатьох інших галузях машинобудування. Механічні властивості сплавів деяких сплавів після термічної обробки наведені в табл.1.9.

Після відпалу (гомогенізаційного, 450...560 °С; рекристалізаційного, 300...500°С) сплави мають високі показники пластичності. Після старіння (природнього, 20°С, декілька діб; штучного, 165...185°С, декілька годин) стає міцним та твердим.

Дюралюміни мають низьку корозійну стійкість. Способи захисту дюралюмінів від корозії: плакування (покриття технічно чистим Al в процесі деформації) та анодування.

*Жароміцний сплав АК4-1 системи Al-Cu-Mg-(Si) додатково легований Fe та Ni.* Має схожий фазовий склад з дюралюмінами, додаткове зміцнення інтерметалідною фазою FeNiAl<sub>3</sub> значно підвищує міцність та тривалу міцність.

Зі сплаву виготовляють деталі реактивних двигунів (колеса, елементи компресора, лопатки, диски) з температурою експлуатації 250...300°С. Термічна обробка та механічні властивості сплаву наведені в табл.1.9.

Таблиця 1.9 – Механічні властивості сплавів після термічної обробки

Марка сплаву	Термічна обробка	Механічні властивості			
		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta_5$ , %	КСУ, КДж/м <sup>2</sup>
Д1	Гартування, 495...510°С, вода + Природ.старіння (4 доби і більше)	360... 410	220... 250	10... 12	270
Д16	Гартування, 495...510°С, вода + Старіння, 185...195°С (11...13год)	412	284	10	-
	Гартування, 495...510°С, вода + Природ.старіння (4 доби і більше)	470	300	19	250
Д18	Гартування, 495-505°С, вода + Природ.старіння (4 доби і більше)	300	170	24	-
Д20	Гартування, 535±5°С, вода + Старіння, 165...175°С*, (10...16, год.), повітря або 200...230°С** (12год.), повітря	400... 420	280... 300 ( $\sigma_{0,2}$ )	10	200
АК4-1	Гартування, 525...535°С, вода + Старіння, 185...195°С (9...12год)	380...390	300...330	6...8	200

**Сплави на основі берилію.** Належать до легких сплавів, що характеризуються високою питомою міцністю (табл.1.10) та питомою пружністю (табл.1.11).

Таблиця 1.10 – Питома міцність матеріалів

Метал	$\rho$ , (кг/м <sup>3</sup> ) 10 <sup>-3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_b/\rho g$ , км
Al	2,7	50	1,88
Ti	4,5	250...300	5,66...6,79
Mg	1,74	180	10,56
Fe	7,8	150...200	2,17
Be	1,8	680	38

Таблиця 1.11 – Абсолютні (E) та питомі (E/ $\rho$ ) модулі пружності Be та інших металів

Метал	$t_{пл}$ , °C	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	E, ГПа	(E/ $\rho$ )·10 <sup>-7</sup> , м
Be	1284	1,85	300	16,60
Fe	1539	7,8	210	2,65
Al	660	2,7	71	2,63
Mg	651	1,76	44	2,50
Ti	1668	4,5	105	2,44

Поєднання E,  $\lambda$ , C, малої густини, високої питомої міцності дозволяють використовувати сплави цієї групи в аерокосмічній техніці.

Основні недоліки берилію: токсичний рідкісний метал високої вартості, що має низьку пластичність, значну анізотропію механічних властивостей в деформівних напівфабрикатах, високу чутливість до концентраторів напружень.

За характером зміцнення розрізняють берилієві сплави малолеговані і дисперсно-зміцнені (в тому числі з інтерметалідним зміцненням); за структурною ознакою – конструкційні низьколеговані із структурою твердого розчину, двофазні композиційні з пластичною основою та берилієві сплави з дисперсною структурою.

Берилієві сплави з пластичною основою легко піддаються зварюванню, штампуванню, пресуванню, вальцюванню (сплави системи «Be-Al» за температури 600...650 °C, сплави системи «Be-Al-Mg» за температури, не вищої за 450 °C). З берилієвих сплавів виготовляють напівфабрикати у вигляді листів, прутків, профілів та поковок.

Із сплавів Be слід виділити сплави системи Al-Be-Mg (АБМ із 70%Be).

Таблиця 1.12 – Механічні властивості та густина сплавів системи Al-Be-Mg (деформований напівфабрикат)

Марка сплаву	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	E, ГПа	G, ГПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
АБМ-1	2,35	1335	47	430...500	250...300	11...20	0,15...0,30
АБМ-2	2,40	115	41,5	420...500	200...240	15...29	0,2...0,3
АБМ-3	2,05	210	97,8	550...620	380...480	7...12	0,09...0,16
АБМ-4	2,18	170	80	520...590	370...450	9...15	0,15...0,25

**Композиційні матеріали.** Слід виділити декілька підгруп, які суттєво відрізняються як за матрицею, так і за зміцнювачем.

**Дисперсно зміцнені композиційні матеріали (ДЗКМ).** Матеріали цієї групи відносяться за технологією виготовлення до порошкових в котрих матриця із металом або сплавом зміцнюється штучно введеними дрібними частинками розміром  $\leq 0,1$  мкм із масовою часткою 0,1...15%. Наповнювачі: оксиди, карбід, нітриди, бориди та інші важкотопні сполуки.

Суміші порошоків отримують наступними механізмами: змішування; поверхневе або внутрішнє окислення; хімічне осадження із розчинів; розкладання сумішей солей. Спінання після формування із наступною ГПД дозволяє отримати щільний, майже безпористий напівфабрикат (стрічка, смуга та інше).

**ДЗКМ на основі Al (САП-1, САП-2, САП-3).** Наповнювач – оксид Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (відповідно 6...9%, 9...13% та 13...17% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Показник  $\sigma_{0,2}$  сплавів дорівнює 200 МПа (САП-1), 230 МПа (САП-2), 340 МПа (САП-3). Сплави мають підвищені характеристики жароміцності, що обумовлено стабільністю фази-наповнювача.

При температурі 300-400°C ДЗКМ на основі алюмінію переважають за міцністю всі промислові сплави і характеризуються високими показниками жароміцності та повзучості.

За характеристиками довготривалої міцності при підвищених температурах САПи перевершують звичайний жароміцний алюмінієвий сплав Д20 (табл.1.13).

Таблиця 1.13 – Тривала міцність ( $\sigma_{100}$ ), МПа, при різних температурах випробування (пос.кольорові)

t, °C	250	300	350	500
САП-1	125	115	85	45
Д20	120	80	40	-

Сплави САП мають таку ж високу корозійну стійкість, як і м'який технічний алюміній.

Із САПів рекомендується виготовляти деталі, які працюють при температурах 300...500°C: малонавантажені конструкції; лопатки газових турбін; поршневі штоки; шестерні; деталі для суднобудування та хімічного машинобудування; труби для буріння глибоких свердловин (коли температура досягає 300...400°C); в атомній енергетиці для поглинання нейтронів.

ДЗКМ на основі Mg. Перевага цих КМ полягає в незначній розчинності кисню ГЦП-гратці Mg, тому оксиди MgO ефективно використовують в ДЗКМ Mg-Mg (до 1%). Подальше підвищення MgO практично не впливає на міцність, але суттєво знижує пластичність. Тривала міцність ДКЗМ становить  $\sigma_{100} = 10 \text{ МПа}$ . При температурах вище 400 °C корозійна стійкість на повітрі знижується.

Матеріали використовують в авіації; ракетній та ядерній техніці; виготовляють деталі корпусних виробів із мінімальною масою та підвищеною міцністю. Приклади марок ?

ДЗКМ на основі Ni. Ці КМ зміцнюються оксидами ThO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub> та Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Підвищенню жароміцності сприяє: отримання оптимальної дислокаційної структури матриці; дисперсність зміцнювальних частинок та певна відстань між ними; застосування термомеханічних режимів обробки – холодної деформації і високотемпературного відпалу. Дисперсно зміцненні сплави на основі нікелю зберігають опір повзучості до температура 1200...1300 °C. (*нос.персп.тех.*)

Позначення та хімічний склад поширених жароміцних дисперсно зміцнених сплавів: ВДУ-1 (98%Ni – 2%ThO<sub>2</sub>), в США має назву TD-нікель; ВДУ-2 (98%Ni – 2%HfO<sub>2</sub>); ВДУ-3 (Ni + 20%Cr + ThO<sub>2</sub>). Типовий представник цієї групи ТД-ніхром (80%Ni + 20%Cr (80%Ni + 20%Cr = 98%) + 2%ThO<sub>2</sub>). Властивості сплавів ДКЗМ на основі Ni наведені в табл.1.14 та 1.15.

Таблиця 1.14 – Властивості ТД-ніхрому

Температура випробування, °С	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
800	200...220	240...260	20...22	30
1000	110...120	130...140	15...16	25

Таблиця 1.15 – Тривала міцність сплаву ВДУ-2

Температура випробувань, °С	$\sigma_{100}$ , МПа	$\sigma_{1000}$ , МПа
900	105	95
1000	90	80

Крім того, в авіації та ракетній техніці використовують ДЗКМ системи:

– Ве-ВеО; Ве-Ве<sub>2</sub>О

– Со + ThO<sub>2</sub> (до 2...4%); (Со-Сг-Мо-В) + ThO<sub>2</sub> (до 3%).

Тривала міцність сплава ДЗКМ системи Со + ThO<sub>2</sub>:

$$\sigma_{100}^{800} = 200 \text{ МПа}, \sigma_{100}^{1050} = 100 \text{ МПа.}$$

*Волокнисті металеві КМ (ВМКМ).* Властивості волокон та матриць визначають методи виготовлення виробів із цих КМ.

Порошкова металургія. Укладка волокон в матрицю, холодне пресування, спікання та заключна операція – гаряче пресування.

Технологія із застосуванням фольги. Використання клейових речовин для з'єднання волокон із фольгою; пресування шарів волокон та фольги; точкове або безперервне з'єднання фольги із волокнами. Заключна операція – дифузійне зварювання, гаряче пресування або гаряче ізостатичне пресування.

Ливарний метод. Лиття готового виробу або нанесення рідкого металу на поверхню окремих волокон або виготовлених із неперервних стрічок. Для отримання готових виробів заключні операції не потрібні.

Таблиця 1.16 – Монокристалльні волокна (короткі)

З'єднання	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3960	4100...24000
SiC	3170	13800...41500
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3160	4800...13800

Таблиця 1.17 – Неперервні волокна

З'єднання	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа
SiO <sub>2</sub>	2190	5900
B	2630	3100
SiC	3350	2800
C	1900	2100
Сталь	7800	4100
W	19400	4100

Одними із найбільш поширених є композиційні матеріали на основі алюмінія (табл.1.18). Це обумовлене високими технологічними властивостями самого Al, порівняно невисокою температурою плавлення та доброю адгезією.

Таблиця 1.18 – Композиційні матеріали на основі Al

КМ	Наповнювач		$\sigma_b$ , МПа (при 20°)	$\sigma_b/(\rho \cdot q)$ , кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{-1}$ , МПа
	Матеріал	Частка, %				
ВКА-1	борне волокно	50	1200	45	2,65	600
ВКУ-1	вуглецеве волокно	30...40	900...1000	42	2,25	200
КАС-1	сталевий дріт	40	1600	31	4,8	350

Композиційний матеріал ВКА-1. Фольги із Al сплаву чергують-ся із борним волокном. Недолік цього КМ: взаємодія Al із волокнами В при нагріванні. Долається нанесенням бар'єрних шарів із SiC або BN.

Композиційний матеріал ВКУ-1. Характеризується малою густиною в поєднанні з високою міцністю.

Композиційний матеріал КАС-1. Має найбільшу міцність, але поступається іншим матеріалам питомою міцністю.

*Евтектичні композиційні матеріали (ЕКМ).* До цієї групи відносяться сплави евтектичного або близького складу, в яких наповнювач – орієнтовані кристали, що утворюються в процесі спрямованої кристалізації. При цьому необхідно забезпечити пласку поверхню розділу між рідиною та твердою фазами (поверхня фронту кристалізації) та однонаправлене відведення тепла. Евтектика кристалізується перпендикулярно до поверхні розділу, має орієнтовану волокнисту або пластинчасту будову.

Структура евтектики КМ, що створена природнім шляхом, а не штучним введенням армуючих фаз, має високу міцність та термічну

стабільність до температур, наближених до температури плавлення евтектики. Властивості деяких сплавів ЕКМ наведені в табл.1.19 та 1.20.

Недоліки матеріалів ЕКМ:

- підвищена чистота сплавів;
- залежність властивостей від швидкості кристалізації;
- обмежена можливість зміни вмісту армуючої фази.

Таблиця 1.19 – Властивості матеріалу ЕКМ системи Al-Al<sub>3</sub>Ni

V <sub>кр</sub> , См/год	σ <sub>в</sub> , МПа
10,8	420
30,0	340

Таблиця 1.20 – Властивості та методи отримання деяких матеріалів ЕКМ

ЕКМ системи	σ <sub>в</sub> , МПа	Ці КМ отримані методом спрямованої кристалізації. Вони жароміцні. У них високі межі взаємодії, зміцнені карбідами. Структура складається з високопластичної матриці, армованої високімідними орієнтованими кристалами.
Ni-NiMo	1250	
Ni-NbC	890	
(Co-Cr)-(Cr-Co) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1380	

Важливо, що порівняно із сплавами з інтерметалідним зміцненням ЕКМ на основі Ni та Co при високих температурах знеміцнюються менш інтенсивно, тому мають переваги при температурах вище 900 °С. Це обумовлено тим, що фази – складові евтектики, зберігають свою морфологію до температури плавлення.

#### 1.4. Матеріали технічного призначення

##### *Процеси зношення та методи підвищення зносостійкості.*

Досконала за замислом та конструкцією машина може стати непрацездатною внаслідок незадовільного функціонування вузлів тертя (підшипників, шарнірів, зубчастих колес, кулачків тощо).

На ділянках фактичного контакту жорстких поверхонь діють значні питомі зусилля, величина котрих визначається твердістю матеріалів, що контактують. При терті в зоні контакту вершин нерівностей виникають деформації зсуву. В умовах важких режимів тертя (високі швидкість та тиск) виникають температурні «спалахи», котрі можуть значно перевищувати температуру термообробки заготовок та виробів. Таким чином, оксидні та адсорбовані плівки, мастило знаходиться в своєрідному реакторі із екстремальними параметрами: тиск, темпе-

ратура, швидкість, зсувні процеси, хімічні процеси. Все це призводить до протікання різноманітних фізичних та хімічних процесів в нерівноважних умовах із утворенням нових речовин, станів матеріалів, фаз тощо. Цим самим підкреслюється складність процесів тертя, зношення та змашування, котрі ґрунтуються на знанні багатьох наук: хімії, фізики, механіки, матеріалознавства, теорії обробки тиском, теорії пластичності, теорії різання.

Зношення – процес відокремлення частинок матеріалу із поверхні твердого тіла. Розрізняють наступні види зношення:

- механічне;
- корозійно-механічне;
- абразивне;
- втомне зношення;
- фретинг-корозія;
- ерозійне;
- кавітаційне;
- зношення при ударних навантаженнях;
- комбіноване.

Однією із основних причин зношення металевих матеріалів є захоплення контактних поверхонь (твердофазне зварювання). Як наслідок це утворення наростів, катастрофічне пошкодження поверхонь тертя і зношення. Воно також обумовлене фретинг-корозією.

Залежність відносної зносостійкості ( $\epsilon$ ) при абразивному зношенні від твердості різних матеріалів та сталей надане на схемі (рис.1.2).

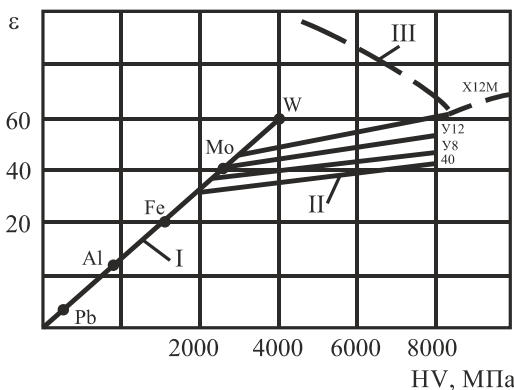
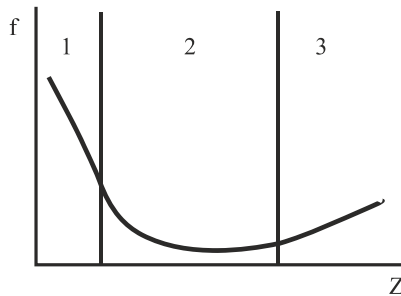


Рисунок 1.2 – Відносна зносостійкість (еталон – Pb)

Для попередження схоплення та зменшення пошкоджень використовують наступні заходи:

- вибір матеріалів з мінімальною схильністю до схоплення;
- легування сплавів;
- максимальне підвищення твердості (ГО/ХТО);
- зміна складу поверхневих шарів завдяки ХТО;
- нанесення на поверхню виробів плівок м'яких матеріалів;
- введення м'якої складової до антифрикційних сплавів (бронз, Al-Pb сплавів);
- використання матеріалів з твердим мастилом (фторопласт);
- використання пористих самозмащувальних матеріалів (вводять рідкі або пластичні мастила);
- використання матеріалів з низькою адгезійною здатністю.

Важливою характеристикою, що впливає на процес зношення, є коефіцієнт тертя ( $f$ ). Його залежність від динамічної в'язкості мастила ( $\mu$ ), кутової швидкості ( $\omega$ ) та тиску ( $p$ ) надана на рис.1.3.



- 1 – зона граничного змащування;  
 2 – зона напіврідинного змащування;  
 3 – зона рідинного змащування.

Рисунок 1.3 – Залежність  $f$  від параметру Зоммерфельда ( $Z = \frac{\mu \omega}{p}$ )

В умовах підвищеного зношення необхідно переходити на рідинне змащування. Для цього збільшують динамічний коефіцієнт в'язкості та кутової швидкості, зменшують тиск.

**Зносостійкі матеріали високої твердості.** Використовують в трибосистемах в умовах абразивного зношення. Високу твердість має алмаз та хімічні сполуки: К, Н, Б, С.

*Надтверді матеріали.* До цієї групи відносяться алмаз та нітрид бора. Властивості наведені в табл.1.21.

Таблиця 1.21 – Властивості алмаза та нітрида бора

Характеристика	Алмаз	Нітрид В
Гратка, період, нм	Кубічна 0,35675	Кубічна 0,36165
Мінімальна відстань між атомами, нм	0,154	0,156
Густина, кг/дм <sup>3</sup>	3,49-3,54	3,44-3,49
Теплостійкість, °С	850	1200
Е, ГПа	900	809-973
Мікротвердість	150000	60000

Нітрид В перевершує алмаз по теплостійкості. Крім того, він менш адгезійно активний по відношенню до заліза, кобальта та нікеля, менш схильний до схоплення.

*Металоподібні сполуки.* Властивості наведені в табл. 1.22. Із зменшенням Н (навантаження), зменшується Е та підвищується  $\alpha$ .

Порошки використовують для обробки матеріалів. Деталі виготовляють методами порошкової металургії.

Таблиця 1.22 – Властивості металоподібних сполук

Сполука	Н, МПа	Е, ГПа
TiC	29000	494
HfC	27000	480
Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	13800	369
TiN	20000	390...500
HfN	21500	480
Cr <sub>2</sub> N	15700	310
TiB <sub>2</sub>	34800	541
VB <sub>2</sub>	28000	340,4
MoSi <sub>2</sub>	12000	530
TiSi <sub>2</sub>	8920	355

*Неметалеві безкисневі сполуки.* Високоєфективні (?) інструментальні матеріали на основі композицій SiN<sub>4</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (сіалон) та SiN<sub>4</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC (силініт). Властивості матеріалів наведені в табл.1.23.

Таблиця 1.23 – Властивості деяких неметалевих безкисневих сполук

Сполука	Н, МПа	У, ГПа
SiC	21300...29500	408
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	33000	320
B-BN	60000	809...973

*Кераміка та ситали.* Ситали (склокераміка) – це склокристалічні матеріали, які складаються з однієї або декількох кристалічних фаз, рівномірно розподілених у склоподібній фазі. Це перш за все оксиди  $Al_2O_3$ ,  $BeO$ ,  $ZrO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ .

Оксид  $Al_2O_3$  природнього походження: сапфір, рубін. Колір залежить від наявності інших оксидів. Має показники  $H = 20000$  МПа,  $E = 350$  ГПа). Характеризується високою теплостійкістю, зносостійкістю, хімічною стійкістю. Використовують для виготовлення горловин гідроабразивних насосів, деталей ткацьких верстатів, деталей приладів, елементів підшипників.

*Тверді сплави.* Сплави мають дуже високу твердість, тому що вони складаються з 90...98% карбідів (решта – кобальтова зв'язка). До сплавів цієї групи відносяться сплави: ВК4, ВК6, ВК8, Т15К6, Т5К10, ТТ7К12 (HRA 87...92). Для прикладу:

Таблиця 1.24 – Гарантовані властивості деяких твердих сплавів

Марка сплаву	Склад, %			Опір згину, МПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	HRA
	WC	TiC	Co			
ВК6	94	-	6	1200	14,6...15,0	88
ВК8	92	-	8	1300	14,4...14,8	87,5
Т5К10	85	5	10	1150	12,3...13,2	88,5
Т15К6	79	15	6	1100	11,0...11,7	90

Примітка: HRA 84 (HRC 72); HRA 85 (HRC 74); HRA 86 (HRC 76); HRA 87 (HRC 78); HRA 92 (HRC 88).

*Наплавочні матеріали* (від Є-10Г2 до Є-320Х23С2ГТР; 100Г13Н4; 200Х15СТР). Сплав Є-320Х23С2ГТР має твердість HRC58.

До групи наплавочних електродів входять електроди, що використовують для ручного дугового наплавлення поверхневих шарів з особливими властивостями (крім електродів для наплавлення шарів з кольорових металів). Наплавлювальні електроди широко застосовують в промисловості для ремонту і відновлення різноманітних деталей механізмів, вузлів і агрегатів.

*Зносостійкі покриття (шари).* Задовольнити вимоги щодо високої твердості, зносостійкості поверхні, об'ємної міцності та в'язкості можливо завдяки створенню композицій із пошаровим розташуванням матеріалів, що виконують різні функції. Способи створення зносостійких покриттів:

- хімічне осадження із газової фази (VC, TiN, TiC, SiC,  $Si_3N_4$ );
- термовакuumне напилення;
- вакуумне іонно-плазмове покриття;

- гальванічні покриття;
- хіміко-термічна обробка.

**Матеріали стійкі до зношування в умовах значного тиску та ударних навантажень.** За цих умов експлуатації розрізняють наступні види зношення:

- ударно-абразивне;
- ударно-гідроабразивне;
- ударно-втомне;
- ударно-теплове.

Основні матеріали цієї групи – інструментальні сталі зміцненні термічною обробкою. Багато інструментальних сталей є теплостійкими.

*Ударно-абразивне зношування.* Малоциклова втома/навантаження мікрооб'ємів матеріалу. Супроводжується впровадженням в метал твердих частинок. Критерій зносостійкості – твердість.

*Ударно-гідроабразивне зношування.* Удари із наявністю рідини та частинок абразиву, призводить до появи мікрорізання (багатоциклове навантаження).

*Ударно-втомне зношування.* Багаторазове динамічне навантаження контактуючих поверхонь без абразивних частинок. Руйнування відбувається внаслідок наклепу, окрихчення та відокремлення частинок.

*Ударно-теплове зношування.* Удар поверхонь за умови значного об'ємного нагрівання. Відокремлення частинок як наслідок багаторазової пластичної деформації або зрізання об'ємів металу при впровадження твердих частинок.

Критерій Тененбаума:  $K_T = H_M / H_A$ ; де  $H_M$  – мікротвердість матеріалу,  $H_A$  – мікротвердість абразиву. При  $K_T = 0,5 \dots 0,7$  – руйнування при одноразовому впливі абразивних частинок (ударно-абразивне зношення); при  $K_T > 0,7$  – багатоциклове зношування, інтенсивність зношування різко знижується.

В сталях із метастабільним аустенітом різної твердості підвищення кількості А приводить до збільшення зносостійкості. Так сталь Х12М після гартування (1000°C) та відпуску має твердість HRC 59...60. Використовується для металорізальних інструментів та штампів холодного деформування. Сталі для виготовлення штампів гарячо-

го деформування мають твердість HRC 42...50. Вплив температури відпускання на зносостійкість показано на рис.1.4.



Рисунок 1.4 – Залежність зносостійкості від температури відпускання

При ударно-абразивному зношуванні лінійний зв'язок між зносостійкістю та твердістю зберігається до певного значення енергії удару. При збільшенні енергії удару твердість взагалі не впливає на зносостійкість або спостерігається збільшення зношення при збільшенні твердості.

При ударно-втомному зношуванні вибір зносостійкого матеріалу здійснюється не лише за допомогою твердості. Динамічний характер прикладання навантаження не дозволяє використовувати інструментальні сталі високої твердості. Через високу твердість (HRC 60...68) низька пластичність та в'язкість сталі не дозволяють перерозподіляти напруження на ділянках їх концентрацій. Тому опір зношенню, що пов'язане із накопиченням пошкоджень при циклічному навантаженні, буде знижуватись у сталей, котрі не володіють певним запасом пластичності. Робота на зародження і, особливо, розвиток тріщини у сталей, що мають високу твердість, мала, запас пластичності невисокий. Зниження твердості від HRC 68 до HRC 55 мало впливає на показник пластичності, тому необхідно завдяки термічній обробки знизити твердість до 45...48 HRC.

Рекомендовані наступні значення твердості:

- для металорізальних інструментів та штампів холодного деформування HRC 59...66;
- для штампів гарячого та холодного деформування, що працюють в умовах ударних навантажень HRC 42...50.

Руйнування в умовах ударно-втомного зношення характерне для роботи штампів холодного деформування. За однакової твердості зносостійкість у легованих сталей в 2...3,2 рази більша, ніж у вуглецевих, що обумовлене позитивним впливом складних карбідів. Проте це

спостерігається при малій питомій енергії удару (до 5 Дж/см<sup>2</sup>). Зі збільшенням енергії удару до 14 Дж/см<sup>2</sup> карбідна фаза сприяє викривленню окремих мікрооб'ємів.

При *ударно-тепловому* впливі основний показник – опір термічній втомі. Для основної групи штампових сталей чим вище пластичність та в'язкість тим вище разгаростійкість.

**Кавітаційно-стійкі матеріали (КСМ).** КСМ вибирають враховуючи особливості роботи в умовах кавітації.

Під дією ударів при кавітаційному зношуванні поверхня металу починає деформуватися і піддаватися наклепу; утворюються лінії зсуву, проявляються межі окремих зерен. Багаторазове повторювання ударів призводить до знеміцнення та наклепу матеріалу на окремих мікроділянках, що супроводжуються зародженням тріщини. В першу чергу руйнується найменш міцна структурна складова (в сталях – ферит, в чавунах – графітові включення). Потім може наступити викришування і міцніших компонентів. В залежності від міцності зерен та зв'язку між ними руйнування розвивається в межах зерен або на їх границях. Інтенсивність кавітаційного зношування залежить від температури, властивостей рідини і матеріалу деталей. Вплив в'язкості рідини на кавітаційне зношування незначний. Зі збільшенням поверхневого натягу рідини зношування відбувається інтенсивніше.

На розвиток кавітаційно-ерозійного руйнування значний вплив має структурний фактор: сталі феритного класу протистоять кавітаційному руйнуванню гірше, ніж аустенітні сталі; зменшення розміру зерна зменшує опір кавітаційному руйнуванню; сталі аустенітного класу із нестабільним твердим розчином характеризуються високим опором руйнуванню при кавітації, що пояснюється перетворенням А на М, меншим розміром субзерен та більшим викривленням ґратки М.

Мартенсит з високою стійкістю до кавітації можна отримати двома способами:

– використання сталей, легованих Сг та Мп (30Х10Г10), що утворюють нестабільні тверді розчини, котрі здатні зміцнюватись при деформації завдяки перетворенню А на М;

– утворення безвуглецевого М із наступним його старінням, що супроводжується зміцненням.

**Антифрикційні матеріали.** У машинах використовують не тільки підшипники кочення, але і ковзання. Оскільки вкладиші підшипників ковзання безпосередньо стикаються з валами, вони повинні

бути досить пластичними і досить твердими, мати малий коефіцієнт тертя, бути мікропористими і мати невисоку температуру плавлення. Сплави, що відповідають переліченим вимогам, називають антифрикційними. Вони відрізняються низькою адгезією, добрими теплопровідністю і стабільністю властивостей. Однією з важливих властивостей антифрикційних матеріалів є їх нездатність або мала здатність до схоплювання (адгезії) з матеріалом спряженої деталі.

Антифрикційні матеріали поділяють на такі групи:

– білі антифрикційні сплави на основі олова, свинцю і алюмінію;

– сплави на основі міді;

– чавуни сірі, модифіковані та ковкі;

– металокерамічні пористі матеріали;

– пластмаси.

**Фрикційні матеріали.** Накладки дисків зчеплення автомобільних трансмісій виготовляють з фрикційних матеріалів. Вони мають значну фрикційну теплостійкість; достатню механічну міцність і корозійну стійкість; високий опір схоплюванню та стиранню контактних поверхонь, теплової втомлюваності; плавність і безшумність зчеплення та ковзання.

**Матеріали, стійкі до впливу робочого середовища та температур.**

**Корозійностійкі матеріали.** Металеві сплави – дво- або багатокомпонентні системи. Характеризуються стійкістю до загальної корозії або локальних видів корозії: міжкристалічної, точкової та корозії розтріскування. Це сплави на основі заліза, титана, нікеля, міді, алюмінія.

**Корозійностійкі сталі.** Атмосферо корозійностійкі сталі – низьколеговані маловуглецеві 10ХНДП, 10ХСНД, 15ХСНД. Швидкість корозії в 2...3 рази нижча ніж у вуглецевих, тому що на початковій стадії експлуатації утворюються оксиди хрому та фосфіди, а на другій – зовнішній шар збагачується хромом. Гарна адгезія лакофарбових покриттів, що є додатковим чинником підвищення корозійної стійкості в 1,5...2 рази. Сталі використовують при будівництві промислових споруд, мостів; для виготовлення опор, стінових панелей тощо.

Власне корозійностійкі сталі (КСС). Корозійна стійкість оцінюється по десятибальній шкалі в залежності від швидкості корозії (ГОСТ 13815-68, табл.1.25).

Таблиця 1.25 – Десятибальна шкала корозійної стійкості

Група стійкості	Швидкість корозії металу, мм/рік	Бал
Значна стійкість	<0,001	1
Високостійкі	>0,001...0,005	2
	>0,005...0,01	3
Стійкі	>0,01...0,05	4
	>0,05...0,1	5
Занижена стійкість	>0,1...0,5	6
	>0,5...1,0	7
Малостійкі	>1,0...5,0	8
	>5,0...10,0	9
Нестійкі	>10	10

Ця велика група високолегованих матеріалів включає шість структурних класів (визначається за допомогою відносної діаграми Шефлера  $E_{Ni} = f(C, N, Ni, Mn, Cu)$ ;  $E_{Cr} = f(Cr, Si, W, Mo, V, Ti)$ ). Сталі незалежно від класу містять  $\geq 12\%Cr$ . Найважливіша характеристика (властивість) матеріалів – перехід в область пасивного стану. Пасивність – стан підвищеної корозійної стійкості металу або сплаву, зумовлений переважним гальмуванням анодних процесів в умовах, коли із термодинамічних міркувань вони достатньо реакційноздатні. Причина пасивності – утворення на поверхні сталі хімічно стійкої плівки  $Cr_2O_3$  та окиси хрому шпінельного типу. В табл.1.26 наведено структурні класи, марки та призначення деяких марок КСС.

Титан та його сплави. Титан – метал, що активно пасивується. Це і обумовлює його дуже високу корозійну стійкість практично у всіх природних середовищах: атмосфері (морській та промисловій), ґрунті, прісній та морській воді.

Завдяки легуванню створено сплави із високою стійкістю в  $HNO_3$ , багатьох органічних кислотах та ін.. У Ті мала схильність до контактної, пітингової корозії. Він відповідає вимогам високої стійкості у фізіологічних (біологічних) середовищах, тому використовується як кістковий імплантат.

Для підвищення корозійної стійкості титанові сплави легують Мо, Zr, V, Та, Мп. Алюміній – основний легувальний елемент, що знижує корозійну стійкість, але в кількісному співвідношенні цей вплив незначний.

Таблиця 1.26 – Структурні класи, марки та призначення КСС

Структурний клас	Марка	Призначення
Феритний	08X13, 08X18T	Для виробів, що експлуатують при кімнатній температурі в слабоагресивному середовищі
	15X25T	Неударостійка, для окислювального середовища
Аустенітний	08X18H10T	Окисні середовища типу $\text{HNO}_3$
	10X17H13M2T	Для експлуатації в середовищі ортофосфорної ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) та сірчаної ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) кислоти та ін.
	10X14Г14H4T	До $-253^\circ\text{C}$ в окислювальному середовищі слабкої агресивності
	03X21H21M4ГБ	Для зварних конструкцій і вузлів, що працюють в умовах дії гарячої фосфорної кислоти
Аустенітно-феритний	08X22H6T	В хімічній та харчовій промисловості як замітник X18H10T при експлуатації до $300^\circ\text{C}$
	08X21H6M2T	Замітник сталі 10X17H13M2T
Мартенситний	20X13	Вимірювальний та різальний інструменти, пружні елементи, малонавантажені підшипники, хірургічні інструмент
	30X13	
	40X13	
Аустенітно-мартенситний	07X16H6	Високоміцні вироби, що експлуатують в слабоагресивному середовищі
	08X17H5M3	В слабоагресивному середовищі відновного характеру
Мартенситно-феритний	12X13	Вироби, що експлуатують в слабоагресивному середовищі
	14X17H2	Навантажені вироби, що експлуатують в слабоагресивних умовах окислювального характеру

Алюміній та його сплави. Поверхня алюмінієвих виробів покрита захисною плівкою  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , товщина якої 5...100нм. Це робить його пасивним. В нейтральному та слабоагресивному середовищах метал схильний до самопасивації. Алюміній широко використовують для виготовлення будівельних конструкцій, що працюють в атмосферних умовах; хімічній промисловості; побути та криогенній техніці. Метал стійкий в азотній кислоті,  $\text{H}_2\text{S}$ , парях S. В літакобудуванні алюміній високої чистоти використовують для плакування виробів з алюмінієвих сплавів.

Відомо, що більшість легувальних елементів в алюмінієвих сплавах підвищують характеристики міцності та негативно впливають на корозійну стійкість. Тому найкращий показник корозійної стійкості у сплавів АМц, АМг2 та АМг3.



Мідь та її сплави. Мідь погано пасивується, тому її підвищена корозійна стійкість обумовлена термодинамічною стабільністю (на повітрі, в прісній холодній та гарячій воді, морській воді). Погана стійкість в атмосферах, що містить сполуки S. Характерний недолік латуні – знецинкування та сезонне (міжкристалітне) розтріскування. Це обумовлено вибіркоким корозійним руйнуванням Zn у зв'язку із більш високою електрохімічною активністю атомів цинку в порівнянні із міддю. Тому латуні для покращення корозійної стійкості легують Sn, P, As, ( може Al, Si, Mn, Ni, Sn ?).

*Теплостійкі матеріали.* До цієї групи відносяться сталі перлітного, мартенситного, мартенситоферитного та аустенітного класів, а також сплави на основі Mg, Al, Ti. Теплостійкими називають матеріали, що здатні працювати в навантаженому стані при температурі до 600°C впродовж певного часу. При температурі нижче 450°C доцільно використовувати звичайні конструкційні сталі. В табл.1.27 наведені властивості деяких теплостійких сталей.

Кольорові метали та сплави на їх основі вважають теплостійкими, тому що вони, як правило використовуються при температурах значно нижче 600°C. Максимальні температури експлуатації деяких кольорових сплавів наведено в табл.1.28, 1.30, 1.32, властивості – в табл.1.29, 1.31, 1.33.

*Жаростійкі матеріали.* Руйнування поверхневих шарів металів та сплавів при високих температурах в корозійно-активному середовищі створює певні труднощі при експлуатації машин, апаратів та обладнання; печей газових турбін, ДВЗ ядерних реакторів. Значні втрати матеріалів від високотемпературної газової корозії спостерігаються при виконанні різних технологічних операцій: кування, штампування, термічна обробка без використання захисних атмосфер. Практика свідчить, що при термічній обробці втрачається від 0,5 до 1,5 відсотка маси виробів, а при гарячій пластичній деформації – до 3%. Тому важливе значення має жаростійкість матеріалів, яка характеризує здатність матеріалів опиратися газовій корозії при високих температурах в процесі обробки та, головним чином, при експлуатації.



Таблиця 1.27 – Приклади використання та властивості деяких теплостійких сталей

Сталь	Призначення	$t_{\text{викор}}, ^\circ\text{C}$			$\sigma_{10000}$	$\sigma_{1/10000}$
Перлітний клас						
12X1МФ	Труби, поковки для котлів, колектори високого тиску	510	480	260	140 (560°C)	118 (560°C)
25X1МФ	Болти, шпильки, пружини, деталі кріплення	510	900	750	130 (550°C)	90 (550°C)
20X3МВФ	Ротори, диски, труби	500... 560	900	750	200 (550°C)	130 (550°C)
Мартенситний клас (середньолеговані)						
15X5ВФ	Деталі насосів, кріплення та ін	600	400	220	89 (550°C)	50 (550°C)
12X8ВФ	Труби печей	600	400	170	92 (550°C)	54 (550°C)
Мартенситний клас (високолеговані)						
15X11МФ	Робочі та направляючі лопатки газових турбін	550	686	490	200 (550°C)	180 (550°C)
20X13	Клапани, лопатки парових турбін	500	645	441	195 (500°C)	180 (500°C)
40X9С2	Клапани ДВЗ, деталі кріплення	650	735	441	130 (550°C)	100 (550°C)
Аустенітний клас						
12X18Н9Т	Деталі вихлопних систем газових турбін	600	539	196	130 (600°C)	100 (600°C)
08X16Н13М2Б	Диски, лопатки, болти	600	545	216	200 (600°C)	140 (600°C)
31X19Н9МВБТ	Лопатки, ротори, диски, болти	600	588	294	240 (600°C)	150 (600°C)

Таблиця 1.28 – Максимальні температури експлуатації Al сплавів

Марка сплаву	Температура експлуатації, °C
Д16	до 150
Д19	до 250
Д20	до 350
Д21	до 250
Д17	до 300

Таблиця 1.29 – Характеристика сплаву Д20

$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$		
МПа			
400	250	40	20

Таблиця 1.30 – Максимальні температури експлуатації магнієвих сплавів

Марка сплаву	Температура експлуатації, °С
МА1	до 150
МА2	до 200
МА3	до 150
МА4	до 100
МА5	до 150
МА8	до 200

Таблиця 1.31 – Характеристика сплаву МА8

$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$		
МПа			
230	140	75	25

Таблиця 1.32 – Максимальні температури експлуатації Ті сплавів

Марка сплаву	Температура експлуатації, °С
BT3-1	до 450 °С
BT35	до 400 °С
BT35-1	до 450 °С
BT6	до 450 °С
BT8	до 450 °С
BT9	до 500 °С
BT18	до 600 °С

Таблиця 1.33 – Характеристика сплаву BT18

$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$		
МПа			
1000	950	200	120

Рушійна сила газової корозії – термодинамічна нестійкість металів в газових середовищах при даних зовнішніх умовах: тиск, температура, склад середовища.

Існують декілька теорій щодо легування жаростійких сплавів. Основні положення зводиться до наступного:

– легувальний елемент повинен мати більшу спорідненість до  $O_2$ , ніж метал основа;

– іони легувального елемента входять до складу оксиду основного елемента і тим самим підвищують щільність та знижують швидкість деформації. Цим пояснюється висока жаростійкість низьколегованих сталей та сплавів;

– легувальний елемент та основа металу утворюють подвійний оксид шпінельного типу:  $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . Шпінелі забезпечують підвищення захисних функцій.

Основні жаростійкі сплави – це сплави на основі Fe та Ni. З них виготовляють ненавантажені або слабконавантажені вироби. При виборі матеріалу необхідно враховувати температуру та тривалість експлуатації, характеристики міцності та пластичності, склад робочого середовища. В табл.1.34 наведено приклади використання та температури окислення деяких жаростійких сталей.

Таблиця 1.34 – Використання та температури окислення жаростійких сталей

Марка сталі	Призначення	Температура інтенсивного окислення, °С
Сталі мартенситного класу		
15X5	Труби	600...650
40X10C2M	Клапани, тракт ДВЗ	850
30X13H7C2	Клапани ДВЗ	950
Сталі мартенсито-феритного класу		
15X6CЮ	Труби	800
12X13	Деталі турбін	700
Сталі феритного класу		
10X13CЮ	Клапани двигунів, деталі парових турбін	950
12X17	Піддони, труби	960
15X25	Теплообмінники та ін.	1050
Сталі аустенітного класу		
12X18H9	Теплообмін., муфелі	850
09X14H16Б	Турбіни пароперегр. і трубопроводи установок надвисокого тиску	850

Широке використання в промисловості знаходять жаростійкі чавуни – як найбільш дешевий та доступний матеріал. Швидкість окислення не більше  $0,5 \text{ г}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ . Незначне легування чавунів хромом дозволяє збільшити температуру використання до  $700^\circ\text{C}$  (від  $300\dots500^\circ\text{C}$  для нелегованих чавунів). При виборі марки крім жаростійкості необхідно звертати увагу на зміну механічних характеристик із температурою. До основних легувальних елементів жаростійких чавунів, що і зрозуміло, відноситься Cr, Al та Si. Принципи легування ті ж, що і для сталей. Приклади використання та властивості жаростійких чавунів наведені в табл.1.35.

Таблиця 1.35 – Чавуни

Марка	Призначення	m, г/(м <sup>2</sup> ·год)	t <sub>p</sub> , °C
ЧХЗ	Деталі термічних печей, балки	0,5 (600°C)	600
ЧХ28	Пічна арматура; деталі що експлуатують в кислотах, лугах	0,2 (900°C)	1100
ЧС5Ш	Арматура котлів, деталі пароперегрівачів	0,05 (800°C)	800
ЧЮ30	Деталі печей випалювання мінеральної сировини		1100
ЧЮ22Ш	Деталі арматури котлів, печей термічних, печей випалювання	0,05	1100
ЧЮХШ	Деталі пічного обладнання		700
ЧЮ7Х2	Деталі пічної арматури		800

Крім металів та сплавів для виготовлення жаростійких виробів використовують кераміку та металокераміку. Недолік цих матеріалів – крихкість при кімнатній температурі.

*Жароміцні матеріали.* Жароміцними матеріалами називають матеріали, що опираються пластичній деформації та руйнуванню в умовах дії високих напружень та температур впродовж обраного часу. До цієї групи матеріалів відносять сплави на основі Fe, Ni, Nb, Co.

Жароміцні сталі. Сталі із матрицею на основі Fe<sub>α</sub> мають понижено жароміцність. Тому підвищення та високі характеристики жароміцності – ознака сталей аустенітного класу. Загальним для них є збереження в умовах експлуатації А структури. В залежності від хімічного складу та способу зміцнення аустенітні сталі ділять на групи:

- гомогенні (із твердорозчинним зміцненням);
- із карбідним зміцненням;
- із інтерметалідним та карбідно-інтерметалідним зміцненням;
- залізохромонікелеві сплави.

Гомогенні сталі. Хромонікелеві сталі, низьковуглецеві, додатково леговані важкотопкими елементами (W, Mo, Ti). Використовують в енергомашинобудуванні для виготовлення труб, трубних дошок тривалої експлуатації (до 100000 год) при температурах до 650...700°C. Особливості легування сталей: невелика концентрація C (0,06...0,12%) та співвідношення (Ti, Nb)/C > 10, виключають можливість утворення карбіду Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> при експлуатації, що запобігає крихкості; введення 2...3%W та до 2,5%Mo підвищують жароміцність. Перевага цих сталей – висока жаростійкість. В табл.1.36 наведені границі тривалої міцності деяких гомогенних жароміцних сталей.

Таблиця 1.36 – Границя тривалої міцності сталей X18H12M3T , 10X18H12T та 08X15H24B4TP

Температура, °С / МПа	10X18H12T	X18H12M3T	08X15H24B4TP
300	110	-	300
400	70	112	230
500	45	62	140
600	-	30	80

Сталі піддають аустенізації (гомогенізації) при 1050...1200°C, що забезпечує номер зерна аустеніта 3...6 бал.

Аустенітні сталі із карбідним зміцненням (температура експлуатації до 600...700°C). Типовий представник цієї групи – сталь 40X14H14B2M, з якої виготовляють клапани ДВЗ та деталі кріплення. Сталь 31X19H9MBBГ порівняно із попередньою сталлю має меншу концентрацію Ni, що частково замінений на Mn. Сталь 37X12H8Г8МФБ завдяки легуванню має значну кількість карбідів. З неї виготовляють турбінні диски та деталі кріплення газотурбінних двигунів. Термічна обробка сталей складається з гартування та старіння. В табл.1.37 вказані показники тривалої міцності деяких жароміцних сталей з карбідним зміцненням.

Таблиця 1.37 – Тривала міцність сталей з карбідним зміцненням 40X14H14B2M, 31X19H9MBBГ та 37X12H8Г8МФБ

Температура, °С / МПа	40X14H14B2M	31X19H9MBBГ	37X12H8Г8МФБ
300	80	-	310 (10000)
400	40	80	220 (10000)
500	15	40	190 (10000)

Аустенітні сталі з карбідно-інтерметалідним зміцненням. Особливості легування: понижений вміст С (0,06...0,10%); Ni 10...35%, до 7%Mo; до 6%W; до 1,3%Nb; до 0,5%V; до 3,2%Ti; до 3,2%Al. Введенням Mo та Cr забезпечує твердорозчинне зміцнення та захист від високотемпературної корозії. Сталі із співвідношенням Cr/Ni < 1 (09X14H19B2BP). Термічна обробка сталей складається з гартування та старіння. Зміцнювальні фази в сталях: Nb(C,N); фаза Лавеса Fe<sub>2</sub>W, Ni<sub>3</sub>(Ti); Ni<sub>3</sub>(Ti, Nb); бориди. В табл.1.38 наведені значення тривалої

міцності деяких жароміцних сталей з карбідно-інтерметалідним зміцненням.

Таблиця 1.38 – Властивості сталей з карбідно-інтерметалідним зміцненням

Сталь МПа	09X14H19B2BP	10X11H20T3P	08X15H24B4TP
1000	200	590 (1000)	300
1000	130	480 (1000)	230
1000	95	400 (1000)	140
1000	55	280 (1000)	80

Залізохромонікелеві сплави. Композицію елементів, що складається із Fe, Cr, Ni, W та інших елементів, коли  $\sum(\text{Ni} + \text{Cr}) > 50\%$ , прийнято називати сплавами.

Сплав ХН32Т (температура експлуатації до 850°C). Обмежений вміст С, тому мала кількість карбідів  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , сплав не окрихчується та зберігає високу в'язкість. Використовують для виготовлення труб газовідведення та деталей, що виготовляють із листових заготовок.

До виробів із сплаву ХН35ВТЮ застосовують наступну термічну обробку: подвійне гартування та старіння. Перше гартування (1180°C, 4...8 год) забезпечує вищого зерна необхідних розмірів та розчинення  $\gamma'$ -фази. При охолодженні на повітрі відбувається часткове виділення  $\gamma'$ -фази. При нагріванні до температури другого гартування (1050°C)  $\gamma'$ -фаза не повністю розчиняється в твердому розчині, крім того в твердий розчин не переходять карбіди  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . При температурі 1050°C карбіди укрупнюються. Охолодження на повітрі та старіння (750...800°C, 16 год) супроводжуються виділенням  $\gamma'$ -фази у вигляді дисперсних включень. Подібна термічна обробка дозволяє отримати необхідний запас пластичності в поєднанні із високою жароміцністю. Зі сплаву виробляють лопатки; диски турбін, компресорів із обмеженим терміном експлуатації до 750°C. Для виробів зі сплаву ХН35ВТЮ можуть використовувати інший режим термічної обробки: перше гартування 1160°C, 6...10 год, повітря + друге гартування, 1050°C, 4 год, повітря + старіння, 830°C, 16 год, повітря.

Тривала міцність деяких жароміцних залізохромонікелевих сплавів наведена в табл.1.39.

Таблиця 1.39 – Тривала міцність залізохромонікелевих сплавів

Температура, °C	ХН32Т		ХН35ВТЮ	
	$\sigma_{1000}$	$\sigma_{10000}$	$\sigma_{1000}$	$\sigma_{10000}$
650	110	78	470	380
700	80	55	320	260
750	56	38	210	160
800	40	27	-	-

Сплави на основі Ni. Відомо, що тривала міцність технічно чистого нікелю невисока  $\sigma_{1000}^{800} = 40 \text{ МПа}$ , покращити властивості вдається завдяки комплексному легуванню. Завдяки чому в нікелевих сплавах утворюються карбіди Mo, W та Cr ( $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ), складні інтерметалідні фази типу  $(Ni, Co)_3(Al, Ti, Nb, Ta)$ . Крім того, Ti, Nb, Ta утворюють карбід типу MC. Також легувальні елементи розчиняючись в ГЦК гратці нікелю призводять до зміцнення твердого розчину. Все вище наведене в комплексі значно зміцнює нікелеві сплави.

Такі елементи як C, B, Zr, La, Nd, Ce рафінують метал від домішок, зміцнюють границі зерен завдяки сегрегаціям, утворюють фази впровадження.

За технологією виготовлення виробів нікелеві сплави розподіляють на деформовні та ливарні.

Деформовні сплави. Оскільки високий вміст карбідів буде негативно впливати на пластичність, то в деформовних сплавах вміст вуглецю обмежений –  $\leq 0,12\%$ .





Перший і найпростіший серед десперсійнозміцнювальних деформовних нікелевих сплавів – сплав ХН77ТЮ. Наступні ХН77ТЮР, ХН62МБВЮ (властивості наведені в табл.1.40). Це сплави із широкими технологічними можливостями та помірною жароміцністю. Використовують для виготовлення робочих лопаток, дисків, що експлуатують до  $750^\circ\text{C}$ . Характеризуються високою технологічною пластичністю, не схильні до утворення тріщин при зварювання та нагріванні зварних з'єднань.

Таблиця 1.40 – Тривала міцність сплавів ХН77ТЮР, ХН62МБВЮ

Температура, °С	ХН77ТЮР		ХН62МБВЮ	
	$\sigma_{1000}$	$\sigma_{10000}$	$\sigma_{1000}$	$\sigma_{10000}$
650	470	350	-	-
700	300	180	400	-
750	200	110	190	-

До сплавів із обмеженими технологічними властивостями та високою жароміцністю відносяться сплави ХН70МВТЮБ, ХН62МВКЮ, ХН55ВМКТЮ (значення тривалої міцності вказані в табл.1.41). Температура експлуатації цих сплавів 750...900 °С. Зі сплавів виготовляють лопатки, диски, деталі турбін.

Таблиця 1.41 – Тривала міцність сплавів ХН70МВТЮБ, ХН62МВКЮ, ХН55ВМКТЮ

Сплав МПа	ХН70МВТЮБ	ХН62МВКЮ	ХН55ВМКТЮ
		620	-
	480	740	-
	330	-	530
	250	430	290
	180	-	-
	-	190	230

Ливарні нікелеві сплави. Вміст легувальних елементів значно більший ніж в деформівних сплавів на основі Ni. Це пояснюється тим, що більшість виробів виготовляють за витопними моделями та методами спрямованої кристалізації.

## 2. ВИБІР МАРКИ СТАЛІ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Одна з основних задач, котру повинен вирішити конструктор, це вибрати сталь для конкретного виробу. При цьому не може бути однозначного та простого вибору, тому що необхідно забезпечити в першу чергу міцність, надійність та довговічність виробу, технологічність, економію сталі, врахувати специфічні умови роботи деталі (температуру, середовище, навантаження, схему напруженого та деформовного станів, рівень напружень).

Єдиних принципів при виборі марки сталі не існує, тому кожен конструктор вирішує цю задачу в залежності від свого досвіду, особистих знань, досвіду колективу конструкторського бюро, котрі не завжди достатні. При цьому помилки при виборі марки сталі не настільки рідкі, що може привести до небажаних наслідків.

При вирішенні цієї задачі перш за все необхідно знати форму, розміри та умови роботи деталі, вимоги до матеріалу. Розміри деталі в значній ступені визначаються габаритами машини та об'єму, котрі відведено для розташування даної деталі. Зрозуміло, що при цьому можливі різні варіанти, навіть до перегляду конструктивного рішення всієї складальної одиниці, вузла або всієї машини.

Припустимо, що чисто конструктивне оптимальне рішення знайдено. Якщо сили, що діють на виріб і розміри виробу теж орієнтовно визначені, то із певною точністю можна розрахувати напруження в найбільш небезпечних перерізах. Для усіх сталей модулі пружності при розтягненні та при чистому зсуві практично однакові ( $E = 214$  ГПа;  $G = 80$  ГПа), тож можна підрахувати пружну деформацію при максимальному зусиллі. Якщо це неможливо, то необхідно провести натурні випробування. Якщо пружна деформація знаходиться в допустимих межах, то слід перейти до основного питання – вибору марки сталі; але якщо ні – то конструктору необхідно змінити конфігурацію виробу. Необхідно зазначити, що підбором марки сталі пружну деформацію зменшити неможливо.

В будь-якому випадку виготовлений із вибраної сталі виріб повинен бути *міцним, надійним, довговічним та жорстким*.

*Жорсткість* – це опір виробу пружній деформації; податливість – це здатність виробу піддаватися пружній деформації.

*Міцність* – це опір пластичній деформації, тобто навантаження та напруження не повинні викликати остаточну деформацію вище заданого рівня. За винятком пружин та пружних елементів, для яких дуже важливим є опір матеріалів релаксації напружень, для більшості машинобудівних деталей залишковою деформацією менше 0,2% можна знехтувати. Це означає, що умовна границя плинності визначає верхню границю допустимого напруження у виробі, а, таким чином, міцність оцінюється напруженнями, що не викликають залишкову деформацію.

*Надійність* – мала ступінь імовірності руйнування або других видів відмови виробів. Зрозуміло, що виріб повинен експлуатуватися при дотриманні умов, передбачених проектом щодо даної розробки. Достроковий її вихід із ладу свідчить про те, що деталь не відповідає вимогам, є браком (виготовлена не із того матеріалу, були порушення технологій, невірно був здійснений вибір матеріалу, допущені серйозні похибки в розрахунках міцності, не враховано вплив концентраторів напружень на надійність).

В процесі експлуатації можливі короткотривалі відхилення деяких параметрів від передбачених проектом. І якщо виріб при цьому витримав екстремальні умови, то він надійний. Надійність може бути оцінена температурою, швидкістю деформації, %/хв, та будь-якими іншими параметрами, що виходять за межі розрахунків.

*Довговічність* – час, впродовж котрого виріб може зберігати працездатність. Цей час не нескінченний, тому що досить часто в процесі експлуатації можуть змінюватися: властивості матеріалів, їх фазовий та хімічний склад, стан поверхні, виникнути як поверхневі так і внутрішні пошкодження тощо. Довговічність характеризується опором втомі, зношенню, корозії, повзучості та іншими впливами.

## 2.1. Вибір допустимого напруження $[\sigma]$

Показником, котрий найбільш узагальнено характеризує міцність матеріалу є границя плинності, що визначена на гладких зразках при мінімальному напруженому стані. Допустимо, що в нашому розпорядженні є три сталі (1, 2, 3) із різними границями плинності  $\sigma_{0,2_1} < \sigma_{0,2_2} < \sigma_{0,2_3}$ . Необхідно з'ясувати, чи будемо мати економію, якщо сталь 1 замінити на більш міцну сталь 3. Це доцільно, якщо можуть виникнути напруження, близькі до  $\sigma_{0,2_2}$  та пружні деформації  $[\delta]$

близькі до  $\Delta\delta_3$ . Якщо допустима пружна деформація  $[\delta] \leq \delta_1$ , то при напруженнях більших за  $\sigma_{0,21}$  завдяки залишковій пластичній деформації розміри виробів вважають за допустимі. В цьому випадку заміна сталі 1 на сталь 3 ефективна (рис.2.1).

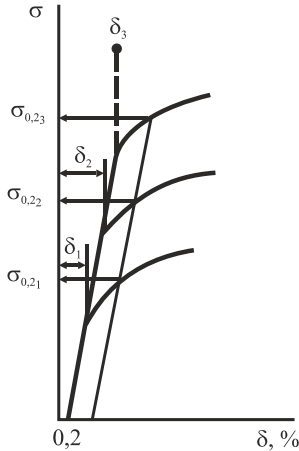


Рисунок 2.1 – Залежність міцності від пластичності

Таким чином, ступінь допустимої деформації (пружної) визначає  $[\sigma]$  – допустимий рівень напруження, що є основним при виборі сталі по міцності.

В першу чергу використовують дані стандартів. Необхідно враховувати наступне. Металургійна промисловість випускає сталі за двома групами гарантованих показників: за механічними властивостями та по хімічному складу. Якщо сталь на машинобудівному підприємстві не піддається термічній обробці, що призводить до зміни її структури та властивостей (ХПД, ГПД, ТО, ХТО, зварювання), то властивості сталі в заготовці та виробі однакові. Тому властивості, гарантовані ДСТУ, ТУ, в цьому випадку можуть бути закладено в розрахунки міцності деталей машин.

Разом із тим, в загальному випадку не слід прагнути до отримання міцності вище необхідної, тому що при цьому, як правило, знижується опір руйнуванню, знижується надійність сталі. Великий запас міцності внаслідок використання більш міцних матеріалів – не гарантія надійності, а швидше навпаки.

## 2.2. Забезпечення надійності

Досвід експлуатації багатьох машин, споруд, аналіз зруйнованих виробів показує, що спостерігаються багаточисленні випадки несподіваних руйнувань при  $\sigma$  в 2...4 рази менше ніж  $\sigma$  розрахункове, та значно нижче за границю плинності. За таких умов можлива незначна пружна деформація.

Відомо, що робота руйнування

$$A = A_3 + A_p,$$

де  $A_3$  – робота зародження тріщини, а  $A_p$  – робота розповсюдження тріщини (робота мікропластичної деформації у вершині тріщини, що росте).

Будь-який поверхневий дефект призводить до зниження  $KC_3$ , можливо, що  $KC_3 = 0$ . Для багатьох сталей характерна різка зміна  $KC_p$  в певному інтервалі температур (рис.2.2). Вважається, що температура, при якій  $KC_p$  зменшується вдвічі, відповідає температурі переходу у крихкий стан. Це так звана температура півкрихкості ( $t_{50}$ ), при якій в зламі 50% в'язкої та 50% крихкої складових. Експлуатація сталі при температурі нижче за  $t_{50}$  не припустима, тому що її надійність катастрофічно падає. Необхідний запас в'язкості  $\Delta t = t_c - t_{50}$ . При виборі сталі  $\Delta t$  в межах 20...60. Задовільні значення  $\Delta t$  для забезпечення надійності та запасу в'язкості: для невідповідальної деталі, що не зазнає динамічних навантажень – 20 °С; для відповідальних деталей, що зазнають динамічних навантажень – 60°С, для всіх інших випадків – 40°С.

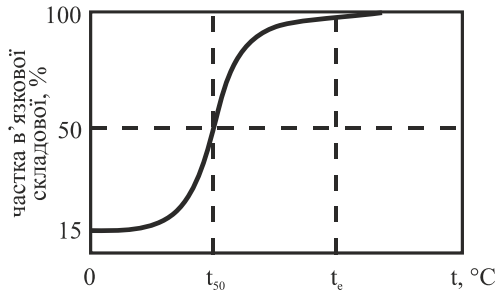


Рисунок 2.2 – Залежність кількості в'язкої складової від температури експлуатації сталей

Значення  $t_{50}$  залежить від хімічного складу та структурного стану сталі, ліквідації шкідливих домішок, стану границь зерен, мікроструктури, морфології фаз зміцнення. Тому необхідно обирати такий режим термічної обробки, щоб  $t_{50} = (-40 \dots -20)^\circ\text{C}$  для виробів, що експлуатуються при  $20^\circ\text{C}$ .

Слід зауважити, що в науковій літературі не для всіх конструкційних сталей наведено дані щодо залежності ударної в'язкості від температури випробування при низьких температурах.

Інколи необхідно, щоб сталь мала високий опір пластичній деформації та границю плинності  $1200 \dots 1600$  МПа. В цьому випадку руйнування звичайних конструкційних сталей при температурах, близьких до  $t_{50}$ , змішане – крихко-в'язке. Ці сталі вже не такі надійні, тому повністю не руйнуються в'язко.

В лінійній механіці є поняття щодо інтенсивності напружень у вершині тріщини, котра залежить від сили, необхідної для просування вершини тріщини на одиницю довжини.

Теоретично, високоміцні матеріали, як показано Гріфітсом, фактично не міцні, тому що вони при крихкому та в'язко-крихкому руйнуванні надзвичайно чутливі до різних дефектів. Тому неідеальна міцність таких матеріалів сягає  $1800 \dots 2200$  МПа, а геометричні розміри дефектів визначають можливе навантаження. Таким чином для подібних матеріалів не міцність матеріалу, а розмір дефекту та здатність матеріалу до його призупинення у вершині тріщини визначають допустиме руйнівне напруження.

При довжині тріщини  $0,1$  мм та  $\sigma = 300$  МПа – дефект безпечний (рис.2.3). При довжині  $l = 0,5$  мм руйнування відбувається при  $\sigma = 430$  МПа (сталь А) та  $\sigma = 700$  МПа (сталь Б), незважаючи на те, що  $\sigma_{0,2}$  в обох сталях може бути вище  $1200$  МПа.

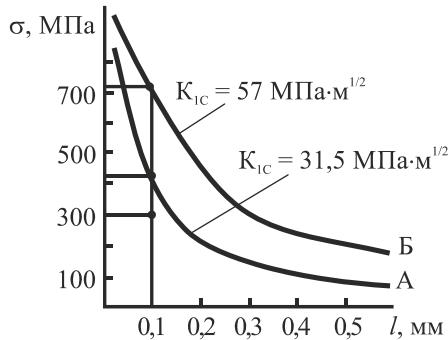


Рисунок 2.3 – Вибір допустимого напруження  $\sigma$  за значеннями  $K_{1C}$  та довжиною дефекту  $l$

Таким чином для деталей, що руйнуються в'язко, вибір матеріалу оснований на співвідношенні розрахункових напружень та границі плинності (за умови забезпечення задовільного запасу міцності, що гарантує малу імовірність руйнування).

Для сталей зі змішаним, а тим більш крихким руйнуванням, вибір напруження визначається величиною  $K_{1C}$  та граничним розміром дефектів. На жаль, накопичена інформація щодо  $K_{1C}$  є для обмеженого кола сталей, методи виявлення та вимірювання розмірів дефектів, особливо внутрішніх, недостатньо відпрацьовані.

### 2.3. Забезпечення довговічності

Довговічність забезпечується не лише матеріалом виробу, але й способами поверхневого зміцнення, при цьому деталь в цілому (по об'єму) не змінюється. Для більшості деталей машин їх вихід з ладу пов'язаний з двома видами пошкоджень поверхні – зношенням та втомою.

Зношення полягає в поступовому вилученні з поверхні частинок металу. Загальновідомо, що чим вище твердість поверхні сталі (сплаву), тим менше зношення, хоча окремі характеристики структури (включення карбідів, наявність А, здатність до наклепу і особливо питома робота руйнування), можуть здійснити певний, а інколи і суттєвий внесок в опір зношуванню. Таким чином підвищення поверхневої твердості (гартування, ХТО, напilenня, наплавлення) в різній мірі призводить до підвищення зносостійкості.

Втомне руйнування складається із трьох етапів: зародження тріщини втоми; її розповсюдження; доламування (остаточне руйнування). Але всі ці етапи є етапами руйнування. Зародження тріщини мало залежить від природи (властивостей) сталі. Два останніх етапу протікають, перш за все, за двома механізмами – в'язкому та крихкому, котрий характеризується великою швидкістю. Це ще одно свідчення того, що сталь, котра зазнає втомного руйнування, повинна мати достатній запас в'язкості.

Втомні тріщини зароджуються на поверхні внаслідок впливу найбільших по перетину напружень розтягнення. За наявності концентраторів напружень величина напружень навколо них підвищуються, що сприяє більш швидкому утворенню зародкової тріщини втоми. І навпаки, за наявності на поверхні напружень стиснення загальні напруження розтягнення зменшуються і, таким чином, ускладнюється утворення зародкової тріщини.

Загальний принцип такого способу підвищення втомної міцності полягає у тому, що на поверхні створюється шар з меншою густиною, більшим об'ємом, в ньому виникає напруження стиснення. Такі шари можна створити поверхневою пластичною деформацією, поверхневим гартуванням, ХТО та іншими менш розповсюдженими способами. Ці шари, найчастіше, мають підвищену твердість, тому поверхнєве зміцнення дозволяє вирішити дві задачі: підвищити втомну міцність та зносостійкість.

Забезпечення таких показників довговічності, як корозійна стійкість, жароміцність, окалиностійкість, розпалостійкість визначається, в основному, правильним вибором сталі, її схемою легування, а потім і раціональною ТО (ХТО).

#### **2.4. Послідовність розглядання та вибору марки сталі**

По перше, необхідно з'ясувати, які навантаження діють на виріб. Якщо це напруження стиснення або напруження розтягування, що більш-менш рівномірно розподілені по перетину, то гартування повинно забезпечити наскрізну прогартуваність. Для сталі із 0,4%С наведений вплив легування на прогартуваність у воді та олії (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Вплив легування на прогартовуваність

Сталь	40	40X	40XH	40XHM	40X2H2MФА
Прогартовуваність, мм $\left(\frac{\text{ВОДА}}{\text{ОЛИВА}}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{30}{15}$	$\frac{30}{85}$	$\frac{100}{75}$	$\frac{180}{120}$

Гартування у воді, якщо конфігурація деталі складної форми, призводить до сильної деформації, короблення.

По друге, якщо деталь зазнає дії крутих або згинальних моментів, то, як відомо із рівняння  $\sigma_i = M_i/W_i$  або  $\tau_i = M_{кр}/W_{рi}$ , серцевина не зазнає впливу напружень. Тому прогартовуваність не має настільки важливого значення. В цьому випадку при виборі може розглядатися декілька варіантів:

- сталі із 0,15...0,3%С (цементация або нітроцементация);
- сталі із 0,3...0,4%С (азотування);
- сталі із 0,45...0,6%С (пониженої прогартовуваності). Наприклад, сталь 55ПП: після об'ємного нагрівання та спреєрного охолодження мартенситна структура утворюється лише на поверхні.

Викладені вище підходи щодо вибору матеріалу відносяться до простих випадків та умов навантаження, коли наявні лише напруження розтягнення або круті або згинальні моменти

В дійсності при складнонапруженому стані (найчастіший випадок в сучасному машинобудуванні) і на серцевину деталі можуть діяти значні напруження. Тому до серцевини сталі висувають певні умови щодо міцності та прогартовуваності. В табл.2.2 наведено вплив хімічного складу сталі на структуру та властивості серцевини зразків з діаметром 20 мм після ХТО.

Таблиця 2.2 – Вплив хімічного складу на структуру та властивості серцевини

Сталь	Термічна обробка	Мікроструктура	$\sigma_{0,2}$ , МПа
20	Ц., 920...950°C, пов. + Г., 800...820°C, в. + Н.в., 180...200°C	Ф+П	300
20X	Ц., 920...950°C, пов. + Г., 780...820°C, о. + Н.в., 180...200°C	Б	700
18ХГТ	Ц., 920...950°C, пов., безпосереднє Г., 820...860°C, о. + Н.в., 180...200°C	М	1000

Примітка. Ц – цементация; Г – гартування; Н.в. - низькотемпературний відпуск; пов. – повітря; в. – вода; о. – олива.

Таким чином, при складнонапруженому стані та ХТО необхідно враховувати і міцність серцевини. Це особливо важливе коли мова йде

про зниження матеріалоемності виробів, коли необхідно при великій потужності приводу ГТД забезпечити мінімальну масу.

Вище зазначалось, що зусилля та габарити виробів в більшості випадків відомі заздалегідь, тож можливе розрахункове визначення напружень. Фактично, за винятком окремих випадків, рівень максимальних напружень для виробів зі сталі повинен знаходитися в межах 300...1800 МПа (це інтервал зміни  $\sigma_{0,2}$  в залежності від вмісту вуглецю, легувальних елементів та температури відпускання 200...650 °С). В реальних умовах напруження повинні бути в 1,5...2,5 рази менше (це так званий запас міцності). Існує точка зору, що запас міцності більший в 2...2,5 необґрунтований та обумовлений тим, що конструктор невпевнений в вірності розрахунків міцності.

Довідкових даних, котрими користується конструктор, недостатньо для вірного вибору матеріалу. Раціональним вважається сумісне рішення цього питання конструктором та матеріалознавцями. Конструктор формує умови роботи виробу, а матеріалознавець пропонує найбільш придатний матеріал для цих виробів.

Не на останньому місці при виборі матеріалу для виробів знаходиться економічна сторона. Чим більше в сталі легувальних елементів, тим вона дорожча. Основне призначення легувальних елементів – це збільшення прогартовуваності, теплостійкості,  $K_{1C}$ , зниження порогу холодноламкості, тобто отримання високого комплексу властивостей в крупних перетинах, тому леговані сталі, перш за все, слід використовувати для деталей значних розмірів.

Відомо, що легувальні елементи рівноцінні по вартості. Раніше ще розглядалось питання доцільності, але зараз його слід залишити поза увагою, тому що чим дефіцитніший легувальний елемент, тим вища його вартість. До найбільш дорогих легувальних елементів для більшості конструкційних сталей відносять нікель, молібден та вольфрам. Ці елементи підвищують прогартовуваність. При використанні нікелю та молібдену слід враховувати їх специфічний вплив на властивості сталі. Нікель знижує поріг холодноламкості, тим самим підвищує надійність сталі. В конструкційні сталі, що піддають високому відпусканню, не рекомендовано вводити більше 3...4%Ni, тому що при 5% Ni  $A_{C1}$  понижується до рівня температур високотемпературного відпускання. При цій операції ТО при нагрівання відбувається перетворення М на А, а при охолодженні навпаки. Молібден уповільнює процеси, що викликають окрихчення сталі після високотемпературно-

го відпускання. Відомо, що швидке охолодження після відпуску запобігає появу цього виду відпускнуї крихкості. Таке охолодження можливе для дрібних виробів. Швидке охолодження неможливе для виробів великих перетинів, тому для виготовлення таких виробів використовують сталі з 0,20...0,25%Mo.

При виборі марки сталі для виробів слід передбачити спосіб металургійного виробництва. При орієнтованому вмісті вуглецю, легувальних елементів сталі різного способу виробництва відрізняються за домішками. Наявність цих домішок призводить до підвищення порогу холодноламкості та не впливає на стандартні механічні характеристики сталі. Чистоту сталі зараз прийнято оцінювати показником АНМ (число атомів домішок на 1 мкн атомів заліза). Ступінь забрудненості та значення температури півкрихкості для сталей різних способів виробництва наведено в табл.2.3.

Таблиця 2.3 – Вплив способів виплавки на ступень забрудненості та температуру півкрихкості

Спосіб виплавки сталі	Забрудненість, АНМ	$t_{50}$ , °C	Вартість, грн/т
Мартенівська	2000	-20	$A_1$ -(100-200 )
Киснево-конверторна	2000	-20	$A_1$ -( 300-400)
Мартенівська кипляча	2500	+10	$A_1$ +(500-800)
ВЕД	1500	-30	$A_1$ +(100-150 )
Електросталь, вакуум в ковші	1200	-40	$A_1$ +(1500 )
Електросталь, перетоплення у вакуумі	1000	-50	$A_1$ +(2000)
Електросталь, ВЕД + ЕШП	1000	-30	$A_1$ +(3000-4000)

Величина  $A_1$  залежить від шихти, марки сталі (вмісту легувальних елементів), виду металургійного півфабрикату. В табл.2.3 наведено вплив способу перетоплення на якісному рівні, рівень  $A_1$  змінюється в межах від 3000 до 8000 грн/тонну.

Надійність сталі як конструкційного матеріалу характеризує  $t_{50}$ , котра залежить як від хімічного складу та ТО так і від забрудненості сталі домішками. Зміну  $t_{50}$  в залежності від збільшення на 0,01% забруднення наведено в табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Залежність  $t_{50}$  від забруднення

Елемент	O	N	C	P	S	Cu	Sn	Zn	Bi	Sb
$t_{50}, ^\circ\text{C}$	+15	+10	+2	+7	-10	+1	+30	+7	+25	+20

Подібний вплив при вмісті домішок до 0,005, при більшій концентрації інтенсивність впливу різко знижується. Із звичайних домішок найбільш значно на  $t_{50}$  впливає кисень, вміст його в сталях звичайної якості складає 0,02...0,03%, а в сталях «кп» – до 0,1%, тому спосіб розкислення та вакуумна обробка є важливими напрямками щодо збільшення якості сталі.

Температура півкрихкості надзвичайно структурно чутлива характеристика. При збільшенні розміру зерна ( $A$  чи  $\Phi$ )  $t_{50}$  збільшується, при впливі забруднювачів підсилюється. Це, імовірно, пов'язано із сегрегаційним розподілом елементів по межах зерен і чим менше стає загальна площа меж зерен, тим більше їх концентрація в крупнозеренній сталі. Очевидно, що і термічна обробка – радикальний спосіб зниження  $t_{50}$ .

До сталей, що використовуються у високоміцному стані ( $\sigma_{0,2} = 1400 \dots 1800$  МПа), необхідно застосовувати усі способи поліпшення їх металургійної якості.

### **3. РОЗМІРНА СТАБІЛЬНІСТЬ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ. ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ В ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ**

Здатність металевих матеріалів та виробів до самодовільної зміни форми та розмірів є перешкодою на шляху забезпечення зростаючих вимог до точності та надійності машин та особисто приладів. Для деяких із них припустима розмірна нестабільність, яка не повинна перевищувати  $10^{-7} \dots 10^{-6}$  мм/мм. При цьому необхідна постійність розмірів в умовах тривалої експлуатації при постійній та змінній температурах (в межах  $(-60..100)^\circ\text{C}$ ).

Наприклад, інструмент виготовлений зі сталі ХВГ. Після гартування з наступним низькотемпературним відпусканням має приблизно 5% Азал. Відомо, що перетворення А на М призводить до збільшення розмірів приблизно на 0,8%. Тому розмірна нестабільність складе:  $0,05 \cdot 0,008 = 4 \cdot 10^{-4}$  (мм/мм), що в 4000...400 разів перевищує норми на нестабільність розмірів.

Забезпечення указаних вимог є досить складною задачею, рішення котрої зв'язане із необхідністю використання металевих матеріалів із високою постійністю розмірів і необхідністю використання спеціальних методів і технологічних процесів, стабілізаційних обробок при виготовленні виробів.

Питання стабілізаційної обробки розглядають із позицій забезпечення стійкості фазового ті структурного стану сплавів, або із позиції максимально можливого пониження рівня залишкових внутрішніх макронапружень у виробках.

#### **3.1. Характеристика розмірної стабільності металевих матеріалів**

Самодовільна зміна розмірів металевих виробів є наслідком двох чинників:

- нестабільність фазового та структурного стану матеріалів;
- релаксація залишкових внутрішніх напружень, що виникають у виробках в процесі різних технологічних операцій гарячої та холодної обробки, а також при механоскладальних операціях.

Переважання першого або другого фактору в розвитку процесів самодовільної зміни розмірів визначається природою матеріалу та його

го структурним станом. В деталях із сплавів зі стабільним фазовим станом зміна розмірів пов'язана із релаксацією внутрішніх напружень. У сплавах із метастабільною структурою зміна розмірів є результатом одночасної дії обох чинників. При цьому фазові та структурні перетворення різко інтенсифікують процеси релаксації залишкових внутрішніх напружень. Одночасно внутрішні напруження активують вплив різних чинників на фазові та структурні перетворення, направлені на досягнення більш рівноважного стану.

На практиці розмірна нестабільність виробів є результатом релаксаційних процесів, що протікають в матеріалі під впливом одночасно експлуатаційних та залишкових внутрішніх напружень. Особливо інтенсивно процеси релаксації розвиваються, як зазначалось раніше, в сплавах із метастабільним фазовим станом. При експлуатації високоточних приладів та машин спостерігається процес повільного та неперервного наростання пластичної деформації при внутрішніх напруженнях, що значно менше границі плинності та таких, що зменшуються із часом. Зазвичай протікають процеси релаксації напружень без зафіксованих зв'язків (тобто без дотримання постійності суми пружної та остаточної деформації) або процеси повзучості при змінних напруженнях, що постійно зменшуються.

Зазначене дозволяє зробити висновок: чим більше опір матеріалу мікропластичним деформаціям у часі, тим вище його розмірна стабільність в умовах експлуатації та тривалого зберігання. Показники опору мікропластичним деформаціям матеріалів та сплавів характеризують стабільність розмірів.

В інженерній практиці основні характеристики розмірної стабільності металів – прецизійна границя плинності або опір мікроплинності. Ці показники визначають за величиною напруження, при якому після розвантажування зразка залишкова деформація становить  $(1...2) \cdot 10^{-6}$  мм/мм (0,0001...0,0002%), рис.3.1.

Прецизійна границя плинності та опір мікроплинності – характеристики опору на початкових стадіях пластичної деформації при короткотривалому навантаженні. Але при нестабільному структурному та фазовому станах ці параметри недостатньо характеризують опір матеріалу мікропластичним деформаціям в умовах експлуатації виробів (при релаксації напружень або повзучості). Кореляція між показниками опору мікропластичним деформаціям при короткотривалому та довготривалому навантаженнях може бути відсутня.

В табл.3.1 наведено значення границь мікроплинності  $\sigma_{0,0001}$ , величини деформації повзучості у співставленні зі значеннями умовної границі плинності для деяких сплавів та металів, що використовуються в приладобудуванні.

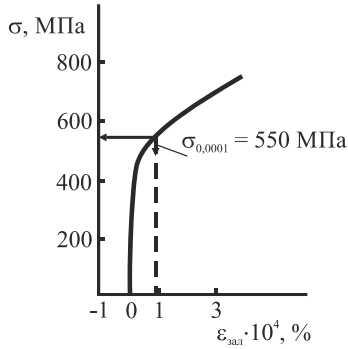


Рисунок 3.1 – Крива деформації

Таблиця 3.1 – Опір мікропластичним деформаціям різних сплавів та металів

Марка сплаву	Режим ТО	Короткотривалі випробування		Довготривалі випробування	
		$\sigma_{0,0001}$	$\sigma_{0,2}$	Напруження повзучості	Середня деформація повзучості (%) при $\tau = 1400$ год
		МПа (при 20 °С)			
Сплав Fe-Ni	Г., 980°C, 1,25 год, в. + В., 680°C, 21 год, пов.	281	731	141	12 (1000 год)
Сталь 11X18М	Г., 1040°C, 30 хв, олива, потім N <sub>2</sub> + В., 270°C, 1 год, пов.	492	611	236	0 (1000 год)
АК7ч (АЛ9)	Т5: Г., 540°C, 16 год, в. + С., 160°C, 4 год, пов.	53	155	28	20 (1000 год)
АМг6	Від., 205°C, 1 год, пов.	141	197	77...105	38...45
Д16	Т1: Г., 500°C, в. + С., 205°C, 1 год, пов.	367	422	127	5
АД33	Г., 520°C, 1 год, в. + С., 170°C, 12 год + Від. стабіліз., 205°C, пов.	183	288	127...169	5...8
МА2	Від., 230°C, 1 год, пов.	24	49	18...21	7...10
Молібден	Кування + Від., 1205°C, 1 год, в атмосфері Н <sub>2</sub> , пов.	372	843	260	Менше 2
Берилій	Гаряче пресування, + Від., 595°, 1 год, у вакуумі, пов.	49	422	41	5

Примітка: Г. – гартування; В. – відпускання; Від. – відпал; в. – охолодження у воді; пов. – охолодження на повітрі; Т1, Т5 – позначення режиму термічної обробки.

Із наведеної табл. видно, що за винятком сталі 11Х18М та молібдена, усі матеріали мають значну деформацію повзучості при кімнатній температурі.

У загальному випадку розмірну стабільність металевих матеріалів слід характеризувати показниками опору мікропластичним деформаціям при тривалому навантаженні – тобто критеріями релаксації напружень або мікроповзучості.

Фізична природа процесів мікроповзучості та релаксації напружень загальна. Проте характеризувати розмірну стабільність металів критеріями релаксації напружень краще, тому що випробування при напруженнях, що зменшуються в часі, в більшій мірі відповідає умовам експлуатації.

Кількісною характеристикою розмірної стабільності може також бути максимальна величина напруження, що не релаксує в умовах випробувань. Відомо, що крива релаксації напружень характеризується наявністю двох ділянок: інтенсивної релаксації у початковому періоді випробувань та уповільненою швидкістю процесу на другій стадії (рис.3.2).

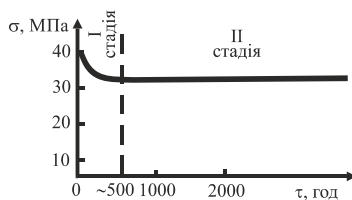


Рисунок 3.2 – Релаксація напружень в сплаві АК7ч (АЛ9)

Відповідно релаксаційну стійкість слід характеризувати величиною максимального напруження, що релаксує не вище припустимої межі (по величині залишкової деформації) окремо по першому та другому періоду випробувань. З'ясовано, що період пришвидшеної релаксації в більшості сплавів при температурі 20...150 °С не перевищує 500 год. Максимальне напруження  $\sigma_1$  (I стадія), що релаксує при цьому до рівня не вище заданого (останній, як правило, визначається роздільною здатністю метода), при температурі 100...150 °С та нижче зазвичай корелює із прецизійною границею пружності. Вищевикладене показує, що цей показник не є вичерпною характеристикою розмірної стабільності ма-

теріалу і може свідчити про здатність зберігати постійність розмірів на період виготовлення, складання та регулювання виробів, котрий у виробничих умовах зазвичай складає декілька сотень годин.

Найбільш повною характеристикою розмірної стабільності в часі є величина максимального напруження, що не релаксує в часі в другому періоді випробувань (500...350 год). Цю величину умовно називають границею релаксації. Значення цього показника особливо важливо для сплавів кольорових металів, в яких при 100...150°C під впливом температури та напружень активуються дифузійні процеси. Цю величину і слід використовувати як основну характеристику розмірної стабільності сплавів в приладо- та машинобудуванні.

### **3.2. Методи визначення розмірної стабільності металів та сплавів**

Прецизійну границю пружності та опір мікроплинності визначають методом послідовного навантаження із фіксацією залишкової деформації після розвантаження зразка. Для цього використовують випробувальні машини обладнані гідравлічною системою навантаження із точністю 0,1%. Для забезпечення точного центрування зразка відносно осі навантаження використовують затискувачі (захоплювачі), що забезпечені кульовими опорами. Для вимірювання залишкової деформації на рівні  $1 \cdot 10^{-6}$  використовують дротові, фольгові датчики, датчики ємності, оптичні інтерферометри. При цьому застосовують спеціальні заходи щодо віброізоляції випробувальних пристроїв та стабілізації температури в межах  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Необхідність останнього засобу очевидна, тому що коефіцієнт термічного розширення конструкційних металів та сплавів сягає  $(10 \dots 20) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , що значно перевищує залишкову деформацію  $1 \cdot 10^{-6}$ . Особливу увагу приділяють питанням вибору клею та технології приклеювання датчиків до зразків із метою запобігання повзучості клейового прошарку.

Визначення границі пружності при розтягуванні із залишковою пластичною деформацією  $1 \cdot 10^{-6}$  утруднено із необхідністю стабілізації температурних та інших умов експерименту. Тому отримують розповсюдження методи випробувань на згин. При цьому для вимірювання границі пружності із залишковою деформацією  $10^{-7} \cdot 10^{-6}$  визначають залишковий прогин із чутливістю близько 1 мкм, що зробити простіше. Для цього використовують методи повздовжнього згину тонких пластин та метод чистого згину для зразків товщиною 0,5 та 2 мм. У випад-

ку використання електроконтактної головки для вимірювання границі пружності при чистому згині зразка із консольною схемою навантаження, роздільна здатність по залишковій деформації складає  $6 \cdot 10^{-8}$ .

Випробування різними методами на згин показали, що границя пружності при згині в умовах кімнатної температури та інтервалі залишкових деформацій  $5 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-5}$  практично не залежить від розмірів та форми зразків, а також схеми навантаження. У зв'язку із тим, що виникнення залишкової деформації за порогом пружності обумовлене реакціями між генерованими дислокаціями та вихідною сіткою дислокацій. Ці результати можуть бути пояснені експериментально доказаним ефектом полегшення генерування дислокацій в поверхневих шарах матеріалу.

Метод випробування на релаксацію напружень при розтягу засновано на компенсаційному принципі: навантаження автоматично знижується при зростанні деформації на величину, котра визначається чутливістю тензометра. За період часу між послідовними зниженнями навантаження розмір зразка збільшується на величину  $\Delta \epsilon_{пл}$ , тобто в цьому методі відтворюється не релаксація, а сходинкова повзучість при зменшенні напруження.

Найбільше відповідають меті випробувань релаксаційні випробування на згин: кільцевих зразків (метод Одінга); тонких пластин (метод А.Г. Рахштаута).

Робоча частина кільцевого зразка Одінга має форму бруса різного опору згину, котрий навантажується завдяки клину, що вставляється в прорізі зразка. Величину напруження, що релаксувало, визначають по різниці між розмірами прорізі після розвантаження та у вихідному стані (до навантаження).

При релаксаційних випробуваннях тонких пластин зразки 0,5/10/100 мм згинаються навколо оправы, радіус котрої пропорційний величині навантаження.

### **3.3. Загальна характеристика основних методів стабілізації обробки**

Основною задачею стабілізаційної обробки є підвищення опору матеріалів виробів мікропластичним деформаціям.

Показники опору мікропластичним деформаціям, котрі інколи називають мікроеластичностями, не корелюють із макроскопічною границею плинності. Для високого опору мікропластичним деформаціям при

короткотривалому та довготривалому навантаженню необхідно забезпечити високу стабільність дислокаційної структури та фазового стану в усіх мікрооб'єктах металу, в той час як для досягнення високих характеристик міцності достатньо високого опору руху дислокацій в макрооб'єктах або в середньостатистичній кількості мікрооб'єктів металу.

В основу методів підвищення опору металів та сплавів мікропластичним деформаціям покладено принцип забезпечення стабільності їх структурного стану в умовах експлуатації. Рішення указаної задачі може бути досягнуто на основі наступних методів стабілізаційної обробки:

- термічного та термомеханічного зміцнення сплавів, що забезпечує створення при тривалому впливі напружень та температури стійких дислокаційних утворень, концентраційних неоднорідностей із сегрегацій розчинених атомів, рівномірно розповсюджених по об'єму високодисперсних вторинних фаз;

- термоциклічного впливу, що забезпечує формування стабільної дислокаційної структури із мінімальним рівнем мікронапружень;

- дорекристалізаційного відпалу матеріалів та виробів із наклепанним поверхневим шаром від механічної обробки різанням, що забезпечує отримання стабільної слабкорозорієнтованої субструктури;

- термічна обробка в напруженому стані, котра забезпечує стабільну орієнтовану структуру в мікрооб'єктах;

- механо-термічна обробка, що підвищує стійкість структури завдяки блокуванню дислокацій за механізмом деформаційного старіння;

- поряд із структурним станом релаксаційна стійкість залежить і від величини діючих напружень. Тому зниження залишкових внутрішніх напружень є важливою задачею стабілізаційної обробки.

Як відомо, загальний напружений стан в деталях визначається взаємодією конструкційних та залишкових внутрішніх мікронапружень, різних за походженням: термічних, структурних, усадкових, від механічного наклепу (при обробці різанням), через обробку тиском, від хімічного впливу на поверхню виробу (гальванічні покриття) тощо.

Найбільш повне усунення мікронапружень досягається при нагрівання до температурного інтервалу початку рекристалізації. Зазначене нагрівання призводить до, практично, повного (суттєвого) знеміцнення матеріалів і відповідно, до зниження його опору мікропластичним деформаціям. Тому максимально можливе зниження залишкових внутрішніх напружень не вирішує проблему забезпечення постій-

ності розмірів виробів у часі, тому що не досягаються оптимальні значення характеристик розмірної стабільності матеріалу.

Зменшення залишкових внутрішніх напружень у виробках досягається також підбором раціональних гартівних середовищ, вібрацій та ін..

Нормативні документи передбачають використання технологічних методів для забезпечення розмірної стабільності. Методи стабілізації розмірів деталей:

- стабілізаційний нагрів для стабілізації фазового та структурного стану, що забезпечує оптимальний опір мікропластичним деформаціям та зниження внутрішніх напружень;
- обробка холодом (-80...-50)°C після гартування перед відпусканням на заданий рівень твердості;
- термоциклічна обробка (ТЦО) (для сплавів із фрезами, що суттєво відрізняються за значенням ТКЛР  $\alpha$ ).
- ефективність ТЦО значно збільшується по мірі зниження температури охолодження;
- число циклів охолодження на нагрівання при ТЦО повинно бути не менше трьох;
- ТЦО в усіх випадках завершальна операція нагрівання.

Приклад стабілізаційної термічної обробки для деталей із деформівних сплавів наведено в табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Стабілізаційна термічна обробка

Марка сплаву	Термічна обробка
АМг2	Відпал, 180...200°C, 2...3 год, повітря
В95	Гартування, 465...480°C, вода + Старіння, 120...125°C, 24 год
30ХГСА	Гартування, 890...910°C, масло + Високотемпературний відпуск, 620...640°C, 1,5...2 год, масло
38Х2МЮ	ТЦО + Гартування, 930...950°C, масло + Високотемпературне відпускання, 570...610°C, 1,5...2 год, масло Гартування, 930...950°C, масло + Високотемпературне відпускання, 570...610°C, 1,5...2 год, повітря

Зміну властивостей в процесі зберігання надзвичайно важливо враховувати при наявності природнього старіння металевих сплавів, полімерних матеріалів, гум, пластичних мас та композиційних матеріалів на їх основі.

В випадку природнього старіння в сплавах на основі Al, рідше Mg, внаслідок утворення зон ГПІ підвищується на декілька відсотків характеристика міцності та знижується характеристика пластичності.

Якщо в процесі зберігання виробів із металевих матеріалів не забезпечується захист від корозії, то це може призводити до зниження при наступній експлуатації опору втомі та циклічній довговічності. Оскільки зони корозійного руйнування є концентраторами напружень.

Під дією середовища, температури, радіаційного опромінення, опромінення сонячним світлом спостерігаються такі негативні явища в полімерах, гумах, пластмасах, як старіння та деструкція. Тому при їх створенні (складанні композицій) вводять антистарителі. Старіння вимагає також щоб в процесі зберігання виробів за частин був зменшений негативний вплив зазначених чинників до мінімуму.

Зміна властивостей в процесі експлуатації відбувається внаслідок дії різноманітних чинників: температура, тиск, напруження, час, робоче середовище, циклічні зміни тощо. Все це приводить до зміни фазового складу, хімічного складу та, особливо, розмірів частинок зміцнювальних фаз, виникнення та розповсюдження тріщин, спрацювання поверхневих шарів. Це не може не позначатися на надійності та довговічності виробів, внаслідок чого вони, поступово зменшуються. Тому в інженерній практиці існує термін *залишкова довговічність* – Тобто довговічність обумовлена попереднім впливом умов та тривалості експлуатації.

Вище наведене означає, що при виборі матеріалів для конкретних виробів та технологій їх виготовлення слід враховувати розмірну стабільність, стабільність хімічного складу, фазового складу, мікроструктури, властивостей і особливо – темпи зміни зазначених характеристик в процесі зберігання та експлуатації в залежності від температури, середовища та часу.

## **4. КОМПЛЕКСНІ МЕТОДИ ТА КРИТЕРІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБУ ТА ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ**

Зниження матеріалоемності деталей, вузлів, машин, зменшення витрат матеріалу на одиницю отриманого ефекту, або продукції при збереженні, або підвищенні якості продукції було і залишається важливою задачею розвитку машинобудування. В багатьох випадках це важливо не лише із економічних міркувань, але й необхідний захід здійснення нових технічних рішень.

Як відомо, матеріалоемність виробів в значній мірі визначається вибором матеріалу при їх виготовленні. Вірність вибору зазвичай обґрунтовується співставленням властивостей матеріалів та оцінкою їх можливою зміною в умовах експлуатації. Це початковий захід, необхідний, але недостатній. Такий підхід необхідно доповнити кількісними оцінками оптимальності вибору матеріалу при одночасному урахуванні виду термічної обробки. Це можливо на основі системного розгляду питання із представленням об'єкта у вигляді функціональних елементів і відповідних зв'язків. Системний підхід відносно до виробу, що характеризується певним призначенням, дозволяє вибрати варіант, що забезпечує найвищу ступінь його ефективності (корисності при виготовленні). Що стосується матеріалу, який відрізняється багатозначним призначенням, то його використання буде доцільним лише у випадку забезпечення максимальної ефективності відповідного виробу за якимось із показників якості, наприклад, надійності.

### **4.1. Оптимізація вибору матеріалу із врахуванням надійності виробу**

Під надійністю виробів розуміють складну властивість, що характеризується безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю, здатністю до тривалого зберігання. В більшості випадків надійність оцінюється імовірнісними характеристиками. Безвідмовність, наприклад, визначається як імовірність того, що можлива в процесі експлуатації дія, що може викликати відмову (механічна, теплова, електрична, інші навантаження) не перевищує здатності виробу протистояти появі відмови:

$$P = \text{імов}(R > Q) = \text{імов}[(R - Q) = z > 0],$$

де  $R$  – несівна здатність (навантаження руйнування або навантаження, що характеризує межовий стан виробу);

$Q$  – експлуатаційне навантаження;

$z$  – функція роботоспроможності ( $z \geq 0$  – обов'язкова умова роботоспроможності) виробу.

Несівна здатність (нести навантаження) – це здатність об'єкту під час навантаження зберігати стан, котрий характеризує його функціональне призначення.

В більшості випадків несівна здатність та експлуатаційне навантаження залежать від багатьох факторів і в загальній постановці питання вони мають випадковий характер. Вони можуть характеризуватися: випадковими величинами; функціями випадкових величин; випадковими функціями. Крім того, межовий стан може також характеризуватися повною постійною величиною.

Навантаження виробів безумовно пов'язане із властивостями матеріалів. Узагальнена схема для визначення несівної здатності в межах моделі надійності наведена на рис.4.1.

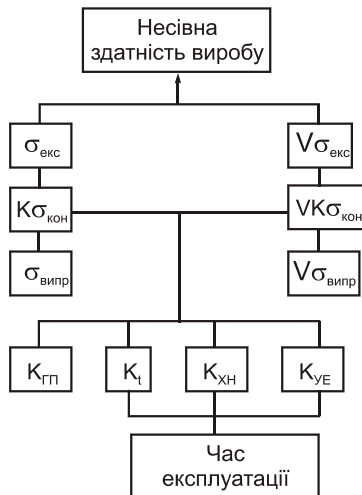


Рисунок 4.1 – Чинники, що впливають на несівну здатність виробів

На схемі:  $\sigma_{\text{випр}}$ ,  $\sigma_{\text{кон}}$ ,  $\sigma_{\text{екс}}$  – значення напружень при стандартних випробуваннях, в конструкції та експлуатаційних навантаженнях;  $K$  – коефіцієнт (ступінь) впливу;  $\Gamma\Pi$  – характеристика геометричних параметрів температури випробування;  $\text{ХН}$  – характеристика наванта-

ження;  $UE$  – умови експлуатації (вологість повітря, радіація тощо);  $V$  – коефіцієнт варіації відповідних напружень.

Коефіцієнт варіації визначається на підставі статистичної обробки експериментальних даних:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (4.1)$$

де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;

$\bar{X}$  – середнє значення параметра.

При цьому прийнято значення характерного параметра – показника, що визначає роботоспроможність виробу.

Приклад. У відповідності із приведеною схемою, із урахуванням фізики явища, здатність нести навантаження можна представити випадковою функцією часу експлуатації виробу або його використання за призначенням із врахуванням, наприклад, маси виробів або їх вартості. Потім, із використанням співставлення здатності нести навантаження із навантаженнями що діють, визначають функцію працездатності. Отриману функцію потрібно дослідити на екстремумі із отриманням:

- мінімум маси (вартості) при постійній надійності;
- максимум надійності при постійній масі;
- мінімум вартості та маси при постійній надійності;
- максимум надійності та мінімум вартості одночасно при постійній масі.

Різницю в технології виготовлення виробів та деталей із різних матеріалів враховують при складанні функції працездатності, тому вона відображається при оптимізації по критерію, що включає вартість.

При вирішенні цієї задачі співставляють отримані результати для різних матеріалів та обирають той, що забезпечує необхідний оптимум та найкращу ефективність його використання.

Запропонований метод оптимізації показано на прикладі оптимального вибору матеріалу для труби, що навантажена внутрішнім тиском. Для цієї труби необхідно вибрати матеріал, що забезпечує отримання мінімальної маси при збереженні безвідмовності на постійному (заданому) рівні.

Здатність ( $R$ ) тонкостінної труби нести навантаження при умові що  $r \ll h$  визначається з рівняння:

$$R = (\sigma \cdot h) / r \quad (4.2),$$

де  $\sigma$  – напруження, що відповідає втраті роботоспроможності (для металевих матеріалів це границя міцності, для композиційних матеріалів – границя плинності);

$h$  – товщина труби, мм;

$r$  – радіус труби, мм.

Якщо припустити, що випадкові значення навантаження та здатність нести навантаження (тобто і функції роботоспроможності) розподіляються за нормальним законом, а кореляцій між ними немає, то для визначення імовірності слід використовувати таблиці нормального розподілу. Тоді імовірність:

$$P = F_0(Y) \quad (4.3),$$

$$\text{при } Y = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\bar{R} - V\sigma} \quad (4.4),$$

де  $F_0$  – табульована функція нормального розподілу;

$\bar{R}$  та  $\bar{Q}$  – середні значення здатності нести навантаження та навантаження труби відповідно;

$V\sigma$  – коефіцієнт варіації напруження.

Коефіцієнт варіації напружень визначається за наслідками статистичної обробки результатів випробувань генеральної вибірки  $N$  певного матеріалу. На жаль, в більшості довідників щодо властивостей матеріалу надається одне значення. При вирішенні постанови задачі необхідні:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}; \quad V_x = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100\%$$

Враховуючи сформульовану вище умову оптимізації – мінімум маси при однаковій надійності (безвідмовності) рівняння (4.2) та (4.4) перетворимо в залежність для отримання значення еквівалентної товщини труби, мм:

$$Y \cdot \bar{R} \cdot V\sigma = \bar{R} - \bar{Q};$$

$$\bar{Q} = \bar{R} \cdot (1 - Y \cdot V\sigma); \quad \bar{R} = \frac{Q}{(Y \cdot R \cdot V\sigma)}$$

$$\frac{Q}{Y \cdot \bar{R} \cdot V\sigma} = \frac{\sigma h}{r}; \quad h = \frac{(Q \cdot r)}{\sigma (1 - Y \cdot V\sigma)}$$

Застосуємо наведені рівняння для вирішення прикладу за наступних вхідних умов: радіус труби  $r = 250$  мм; внутрішній тиск  $Q = 5,0$  МПа ( $50$  кгс/см<sup>2</sup>); імовірність безвідмовної роботи  $P = 0,999$ ;

$Y = 3$ . Матеріали для виготовлення труби: сталі 30ХГС та 30ХГСН2МФ; сплави Д16 і ОТ4; скловолокнистий анізотропний матеріал СВАМ.

Результати проведених за зазначеними умовами розрахунків еквівалентних товщин, маси та відносної маси для безвідмовної експлуатації труби із різних матеріалів наведено в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Результати проведених розрахунків

Матеріал	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Допустиме напруження, МПа	Коефіцієнт варіації, %	Еквівалентна товщина, мм	Маса, кг	Відносна маса
30ХГС	7800	500	0,035	2,8	34,2	3,26
30ХГСН2МФ	7800	700	0,035	0,82	10,2	1,9
Д16	2800	195	0,035	7,2	31,2	2,97
ОТ4	4400	295	0,035	4,7	32,6	3,1
СВАМ9 (1:1)	1800	235	0,11	3,97	11,1	2,1
СВАМ (1:10)	1800	440	0,08	3,8	10,5	1

Примітка. Відносна маса визначається як відношення  $m/m_{min}$ , де  $m_{min}$  – маса найлегшого виробу.

Таким чином, оптимізацію в даному прикладі можна провести співставленням отриманих даних. Доцільніше використати для виготовлення труби за наявних вимог композиційний матеріал СВАМ (1:10). Слід підкреслити, що легкі сплави Д16 та ОТ4 не забезпечують створення оптимального варіанту даної конструкції, вони поступаються усім матеріалам, крім сталі 30ХГС.

Для прийняття остаточного рішення слід проаналізувати поведінку конструкції із врахуванням особливостей її експлуатації (нагрівання, охолодження, кліматичне старіння та пов'язаних із ними зміни властивостей). При цьому в залежності від специфіки об'єкта як параметр оцінки слід використовувати і інші властивості, наприклад, деформаційні характеристики.

В умовах небезпеки виникнення раптових відмов (крихкого руйнування) слід враховувати характеристики в'язкого руйнування та вводити відповідні обмеження в модель надійності.

Аналогічно вирішують задачі вибору матеріалів для деталей із поверхневим зміцненням. Різниця властивостей по перетину буде врахована при визначенні здатності нести навантаження, наприклад, по опору втомі або зношенню.

Всебічна та об'єктивна оцінка ефективності використання матеріалу можлива лише на основі рішення порівняно складних оптимізаційних задач, що виправдано у випадку особливо відповідальних виробів, наприклад, лопаток, дисків ГТУ, матеріалів обшивки та каркаса літаків, камер згорання ракетних двигунів, обичайок котлів, труб для нафтових свердловин тощо.

Разом із тим, ефективність використання матеріалів у багатьох випадках можна оцінити без рішення зазначених задач оптимізації. Це пояснюється ще і тим, що матеріали, як правило, мають багатоцільове призначення. Наприклад, 12X18H10T – жаростійка та помірно жароміцна сталь; сталь 40XH – як термічно поліпшувальна, так і для поверхневого зміцненні нагрівом СВЧ. Тоді може для їх характеристики бажано використовувати критерії, що не пов'язані із виробами. При виборі таких, знову ж таки, слід виходити із зазначеного вище підходу при одночасному врахуванні специфіки відповідних класів виробів. До числа оціночних необхідно віднести показники маси та вартості у взаємозв'язку із відповідним характерним показником.

#### **4.2 Оцінка ефективності використання вибору матеріалів із врахуванням їх фізичних та механічних властивостей**

У кожному конкретному випадку ця оцінка повинна проводитись за характерним показником. Для конструкційних матеріалів найбільш типовими в цьому плані є характеристики міцності.

Наприклад, розглянемо оцінку ефективності з врахуванням границь міцності та плинності.

Рівень властивостей конкретного матеріалу сам по собі не в повній мірі визначає доцільність використання цього матеріалу, тому що він не обумовлює отримання мінімальної маси виробу. Масова характеристика пов'язана із матеріалоемністю і тому є найважливішою запорукою зниження вартості виробу та непродуктивних енергетичних затрат в процесі експлуатації. В деяких випадках маса виробів впливає на ефективність використання матеріалу (наприклад: матеріали літаків, двигунів тощо).

У зв'язку із цим оцінку ефективності використання матеріалів слід проводити за питомими показниками. В даному випадку це відношення границі плинності та міцності до густини. Ця характеристика відома під

назвою питома міцність:  $K_o = \sigma_b / \rho \cdot g$  або  $K_o = \sigma_b / \rho \cdot g$ . Для розглянутих вище матеріалів наведено показники питомої міцності в табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Показник  $K_o$  для матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$V\sigma_b$ , %	$K_o$ , км	$K_p$ , км	
					P=0,997; Y=2	P=0,999; Y=3
30ХГС	7800	1080	0,035	12,8	11,9	11,5
30ХГСН2МФ	7800	1700	0,035	21,8	20,3	19,5
Д16	2800	412	0,035	13,9	12,9	12,4
ОТ4	4400	686	0,035	13,4	12,5	12,0
СВАМ (1:1)	1800	470	0,11	26,1	20,4	17,5
СВАМ (1:10)	1800	880	0,08	48,9	41,1	37,2

Порівняння даних табл.4.1 та 4.2 свідчить, що отримане в табл.4.1 розподілення за відносною масою відрізняється від розподілу за питомою міцністю.

Ця різниця пояснюється тим, що модель надійності враховує неоднорідність матеріалу, а показник питомої міцності – ні. Із цього слід зробити важливий висновок: необхідно враховувати при визначенні питомої міцності та порівнянні різних матеріалів інтервал властивостей та рівень надійності відповідних виробів.

У випадку нормального характеру розподілення даних властивостей матеріалів вид оціночного критерію визначається рівняннями:

$$R = \frac{\sigma_i}{r}$$

$$h = \frac{Qr}{\sigma(1 - Y \cdot V\sigma)}$$

Із співставлення цих рівнянь видно, що ефективним показником, що визначає роботоспроможність виробу є не  $\sigma$ , а  $\sigma(1 - Y \cdot V\sigma)$ . Внаслідок цього питома значення міцності повинно визначатися за рівнянням:

$$K_{p_i} = \sigma_i(1 - Y \cdot V\sigma_i) / (\rho_i \cdot g) = K_{o_i}(1 - Y \cdot V\sigma_i)$$

Оцінка матеріалів за питомою міцністю без урахування надійності справедлива лише за умови повної однорідності, тобто  $V - \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = 0$ ,

звідси  $\sigma = 0$ ,  $(\bar{X} - x_i) = 0$  для усієї генеральної вибірки. А це означає  $\bar{X} = x_i$ , що неможливо.

Для оцінки  $K_p$  із урахуванням надійності (1 варіант:  $P = 0,997$  та  $Y = 2$ ; 2 варіант:  $P = 0,999$  та  $Y = 3$ ) виконані відповідні розрахунки за рівнянням (6), результати в табл.4.2.

Дані таблиці свідчать, що розподіл матеріалів за  $K_p$  (при  $P = 0,999$ ) співпадає із розподілом за надійністю. Оцінка матеріалів за питомою міцністю без врахування неоднорідності приводить до отримання різних результатів.

Таким чином, співставлення матеріалів за питомими показниками механічних властивостей необхідно проводити із врахуванням розкладу діапазону розсіяння та рівня надійності виробів. Це в нашому випадку важливо при співставленні полімерних матеріалів, композиційних матеріалів із матеріалами на металевій основі. При співставленні по оцінці ефективності використання матеріалів із однаковим розкидом властивостей, наприклад, конструкційних сталей, є можливість орієнтуватися на показники питомої міцності без урахування  $V_{\sigma_b}$ . Необхідно пам'ятати, що в процесі експлуатації виробів можливі зміни властивостей матеріалів (границя міцності, границя плинності та твердість) і при оцінці таких матеріалів необхідно враховувати ці зміни.

При розробці технологій виробництва матеріалів, заготовок, напівфабрикатів необхідно прагнути не лише підвищення характерного показника, але й розкиду властивостей. При проведенні приймально-здаючих випробувань необхідно визначити не тільки середні значення, а і робити оцінки розкиду відповідних властивостей.

### **4.3 Оцінка ефективності використання матеріалів із урахуванням їх вартості**

Вартість матеріалів визначається багатьма факторами (хімічний склад, наявність шкідливих домішок, розмір напівфабрикату, стан поверхні та ін.), серед яких важливе значення має технологія його отримання у вигляді напівфабрикатів. По відношенню до споживача вартість характеризується станом ринку та його кон'юнктурою.

Технічні матеріали по зростанню вартості слід розташувати у наступному порядку:

- чавуни, вуглецеві сталі звичайної якості;

- вуглецеві якісні та високоякісні сталі;
- мало- та середньолеговані якісні та високоякісні сталі;
- сплави із кольорових металів;
- термопласти, реактопласти;
- високолеговані сталі, високоміцні сталі, сталі спеціального призначення;
- сплави на основі нікелю;

Однієї вартості недостатньо, тому що матеріали відрізняються за властивостями. Тому більш об'єктивною оцінкою буде вартість, віднесена до характерного показника, безпосередньо пов'язаного із роботою виробу в умовах експлуатації. Це буде питома вартість. Для конструкційних сталей, наприклад, слід використовувати характеристики питомої вартості по міцності ( $C/\sigma_B$  та плинності  $C/\sigma_{0,2}$ ). Для тих матеріалів, що розглядалися раніше у табл.4.3 наведені ці характеристики.

Таблиця 4.3 – Характеристики питомої вартості

Матеріал	Ціна, грн./кг	Міцність, МПа		$C/\sigma_{0,2} \cdot 10^3$	$C/\sigma_B \cdot 10^3$	$C \cdot \rho / \sigma_B$	Ціна 1 м труби, грн
		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$				
30ХГС	5,12	870	1000	3,586	5,12	24,3	175
30ХГСН2МА	4,80	1350	1700	3,555	2,802	-	48,96
Д16	15,30	290	390	52,76	39,23	109,9	477
ОТ4	35,2	420	590	83,80	59,66	262,5	1147
СВАМ (1:1)	66,3	-	470	-	141,06	-	735,93
СВАМ (1:10)	66,3	-	880	-	75,3	135,6	696

Безсумнівно, що із точки зору вартості вигідніше використовувати сталі термічнозміцнені, ніж відпалені. При порівнянні матеріалів із різною густиною відношення  $C/\sigma_B$  – недостатнє, тому що вартість відноситься до 1 кг маси матеріалу. Для таких випадків краще використовувати  $(C \cdot \rho) / \sigma_B$ .

Слід зазначити, що оцінка матеріалів із різною густиною буде відрізнятися. Так, по питомій вартості по міцності без врахування густини сплав ОТ4 – дорожчий, а із врахуванням густини – дешевший ніж сплав Д16.

Врешті решт визначається вартість матеріалу для одного виробу із врахуванням однакових вимог до надійності.

Як і при оцінці доцільності використання матеріалів за питомими характеристиками механічних (фізичних) властивостей, при оцінці

по питомим характеристикам вартості необхідно враховувати особливості експлуатації виробів та зміни властивостей матеріалів.

В попередніх табл.4.1 та 4.2 використані дані щодо  $\sigma$  у вигляді  $\sigma(1 - Y \cdot V\sigma)$ . При розрахунках даних до табл.4.3 використане  $\sigma$ , тому що розкид в оцінках вартості (остання колонка) значно незрівнянно більше розкладу властивостей матеріалів (різниця в ціні значно вища за різницю в  $V\sigma_B$ ).

## 5. СТАТИСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ (СКРЯ)

### 5.1. Класифікація та основні функції систем СК та РЯ виробів

В загальному вигляді система СК та РЯВ – це декотра сукупність вимірювальних приладів, датчиків для отримання необхідної інформації, перетворювачів для приведення її до ЄСФВ (єдина система фізичних величин), статистичних аналізаторів (СА) або спеціалізованих обчислювальних пристроїв, виконавчих механізмів, а також різного роду пристроїв, що сигналізують, реєструють та запам'ятовують.

Впровадження статистичних методів (СМ) регулювання, як окремих параметрів, так і в цілому операцій процесів в машинобудуванні і, зокрема, в термічному виробництві дозволяє вирішити наступні задачі:

- здійснити аналіз технологічних операцій процесів з метою виявлення операцій, що безпосередньо впливають на якість;
- визначити головні параметри контролю та регулювання, розробити математичні моделі, що пов'язують ці параметри із технологічними режимами;
- обґрунтувати найбільш ефективні методи статистичного регулювання;
- виконати розрахунки основних параметрів для введення попереджувального та приймального статистичного контролю на вибраних операціях;
- розробити алгоритми контролю та принципів побудови одно- та багатоканальних статистичних аналізаторів (СА);
- здійснити технічну реалізацію СА;
- впровадити СА та обґрунтувати економічну ефективність від використання СА у виробництві.

Важливе місце в системі СК та РЯВ займають статистичні аналізатори (СА). Вони здійснюють обробку інформації, що відображає фізичну сутність регульованого технологічного процесу або операції, і на основі отриманих результатів виробляють сигнали керування конкретних параметрів або об'єктом в цілому.

Функції системи СК та РЯВ виконусь:

- автоматичне вимірювання контрольованого параметру оброблених виробів;
- автоматичне оброблення результатів вимірювання на основі методів математичної статистики – розрахунки статистичної оцінки середнього значення контрольованого параметру для партії виробів і оцінку зони природнього розсіювання параметрів партій виробів;
- формування сигналів, що керують корекцією налаштування обладнання;
- формування сигналів, що в крайніх випадках блокують процес обробки партії виробів.

Статистичні методи управління якістю призначені для: статистичного аналізу стабільності та точності технологічного процесу; статистичного регулювання технологічного процесу; статистичного приймального контролю.

Статистичний аналіз стабільності та точності технологічного процесу – це визначення статистичними методами характеристик точності та закономірностей протікання в часі технологічного процесу.

Статистичне регулювання технологічного процесу – корегування параметрів технологічного процесу за результатами вибіркового контролю параметрів виготовленої продукції для забезпечення необхідного рівня її якості та попередження появи браку.

Статистичний приймальний контроль – вибіркового або стовідсотковий контроль якості продукції, при якому використовують статистичні методи для обґрунтування плану контролю або корегування цього плану.

Раціональні статистичні методи слід обирати в залежності від задач, що вирішуються. Поряд із використанням автоматичних засобів статистичного контролю, що використовують теорії імовірності та математичної статистики досить ефективними та дієвими в умовах термічного виробництва вважаються найпростіші методи та засоби статистичного контролю: різноманітні діаграми, таблиці, гістограми, графіки, контрольовані карти. Зазначені документи доступні усім технічним працівникам термічних підрозділів.

Постійне або періодичне заповнення цієї документації дозволяє накопичити досить цінний статистичний матеріал, на основі якого здійснюється корекція (корегування) параметрів технологічних процесів.

Так, наприклад, діаграми використовують для виявлення переважних видів браку, його причин; причин відмов виробів при експлуатації; економічних втрат від кожного виду браку із врахуванням його кількості.

Схеми, контрольні листи, графіки використовують для якісної оцінки впливу та визначення ступеню (послідовності) впливу окремих чинників на показник, що досліджується. При цьому можливе виділення проблемного питання, рішення котрого вимагає цілеспрямованих змін технології, матеріалу, обладнання тощо.

У вітчизняній промисловості (у зв'язку із низьким рівнем комп'ютеризації) найбільш розповсюдженим є спосіб статистичного регулювання за допомогою контрольних карт. Контрольна карта дозволяє наочно, в графічній формі відобразити як характер протікання технологічного процесу, так і результати його регулювання.

Для реалізації статистичного регулювання в автоматичному режимі використовують регулювання обладнання, які автоматично контролюють параметри виробів після їх обробки. Якщо параметр виходить за межі допуску, то видається сигнал на регулювання обладнання або параметрів технології. Наприклад, відомо, що легованість і теплостійкість мартенситу залежить від температури гартування та тривалості витримки, і між теплостійкістю та кількістю залишкового аустеніту загартованої сталі існує кількісний зв'язок. Тому можливий статистичний контроль та регулювання якості виробів в автоматичному режимі саме за кількістю залишкового аустеніту, намагніченістю насичення тощо.

Слід виділити два типи систем СК та РЯВ: перший – це системи, в котрих регулювання здійснюється без зміни циклу випуску виробів (для підвищення теплостійкості сталі необхідно підвищити температуру або час гартування; це здійснюється в автоматичному режимі без зміни циклу випуску виробів); другий – для здійснення регулювання необхідна зупинка технологічного процесу. Наприклад, при гартуванні в заневоленому стані (в штампі) кільця внутрішній розмір діаметра виходить за межі допуску. Корегування можливе лише за рахунок перешліфування штампа і без зупинки технології гартування не обійтись.

Більш простою формою впливу є блокування, тобто тимчасова зупинка технологічного процесу обробки виробів, якщо значення контрольованих параметрів вийшли за межі допуску. Цей вид після операційного контроль по своїй сутності є пасивним. Наприклад, при пе-

ріодичному контролю інструментів зі сталі 13X на знеуглецювання в ванні  $\text{BaCl}_2$  виявлено знижений вміст вуглецю у фользі. Процес гартування блокується, приймаються заходи по вилученню із ванни даних осадів, окалини, здійснюється обробка ванни  $\text{MgF}_2$  для її розкислення. Інший приклади блокування процесу: при отриманні різних властивостей деталі в одній садці із метою вирівнювання температури у всіх точках робочого простору; при заниженому номері зерна в швидкорізальних сталях для перевірки температури та часу витримки.

Незважаючи на пасивність цей вид контролю дозволяє фіксувати досягнутий рівень якості, виявляти та усувати причину розладу технологічного процесу, удосконалювати технологічний процес, конструкцію виробів та його якість.

У випадку використання статистичних методів активного контролю перевіряють якість продукції; стан технологічного процесу; із більшою достовірністю виявляють причини браку та відмов, кількісно (за зміною частки дефектних виробів) оцінюють ефективність корегування; своєчасно виявляють та усувають причини розлагодження технологічного обладнання та попереджають появу браку.

В пристроях активного статистичного приймального контролю та регулювання для вимірювання параметрів виробів використовують прямі та непрямі методи. При прямому методі, наприклад, контролюють твердість. При цьому забезпечується більш висока точність контролю. При непрямому методі контролюють не твердість, а, скажемо, фізичну характеристику (коерцитивна сила). Перевагою є те, що цей вид контролю не впливає на стан поверхні виробу, може бути мобільним.

При побудові систем СК та РЯВ можливі два підходи: розробка децентралізованих систем; розробка централізованих систем.

Найбільше розповсюдження у вітчизняному машинобудуванні отримали децентралізовані системи СК та РЯВ. Зважаючи на те, що статистичне регулювання кожного технологічного процесу здійснюється автономно, то загальний аналіз стану виробництва в термічному цеху ускладнений. Централізовані системи СК та РЯВ – це якісна нова ступінь статистичного регулювання технологічного процесу. Ця система – це підсистема АСУ ТП.

## **5.2. Використання системи СК та РЯВ в машинобудуванні**



робки інформації порівнює отримані від ВП дані із заданими значеннями і через БЧЗ видає імпульси на блок виведення керуючих імпульсів, а той, в свою чергу, видає команду виконавчому механізму.

У зв'язку із тим, що будь-яка реальна система автоматичної регулювання має певний час запізнення, імпульс на регулювання необхідно подавати до того моменту, коли параметр регулювання ще не вийшов за межі технологічного допуску. Для цього вводять сигнальні зони К та М, відстань між якими дорівнює максимально можливому інтервалу варіювання (регулювання).

Наявність двох сигнальних зон необхідна при зміні напрямку регульованого впливу в залежності від зміни напрямку «обурення». Зона регулювання описує розсіяння вихідного параметру і її ширина залежить від стійкості технологічного процесу (його параметрів), відстані регулювання та прийнятого алгоритму контролю.

Звузити зону регулювання можна:

- зменшенням тривалості регулювання (підналагодження малими імпульсами);
- вибором відповідного алгоритму контролю, що виключає перерегулювання процесу при грубих розсіяннях вихідного параметра.

Прийнятий алгоритм контролю реалізується блоком логічної обробки інформації.

## **6. ПОРЯДОК РОЗРОБКИ ТА ПОСТАЧАННЯ ПРОДУКЦІЇ НА ВИРОБНИЦТВО**

Створення технічних систем, машин, матеріалів, приладів, продукції машинобудування слід представляти як єдиний процес, що включає в себе цілий ряд етапів, що пов'язані із проектуванням, виготовленням та випробуванням.

Основні із цих етапів:

- науково-дослідні роботи. Ескізне та технічне проектування;
- експериментально-дослідні роботи;
- виготовлення дослідних зразків, приладів, машин тощо;
- проведення випробувальних робіт дослідних зразків в лабораторних умовах та на спеціалізованих випробувальних стендах;
- випробування виробів в натурних умовах. Державні випробування. Перевірка експлуатаційно-технічної документації та підготовка до серійного виробництва. Передача конструкторської контрольної, технологічної, експлуатаційно-технічної документації в серійне виробництво.

Перелічені етапи взаємозв'язані між собою і в певній ступені послідовні. Результати робіт попереднього етапу вихідні для розгортання робіт на наступному етапі. Так, наприклад, проектуванню пристрою машини, двигуна передують пошукові дослідження (роботи), в ході яких аналізують характер та особливості функціонування пристрою, машини, двигуна.

На основі цього визначають технічні вимоги до виробу. При подальшому виконанні науково-дослідних робіт досліджують можливі принципи побудови (конструкції) системи із урахуванням рівня та перспектив розвитку науки, техніки даної галузі, вибирають попередній варіант конструкції та порівнюють його із раніше розробленими вітчизняними та світовими аналогами. Враховують економічні показники, терміни створення та експлуатаційну ефективність.

На етапі ескізного проектування обирають оптимальний варіант системи (конструкції), що відповідає передбаченим (заданим) технічним вимогам, розробляють структурні схеми, визначають складові вузли конструкції, прилади, попередньо оцінюють економічну ефективність розробки.

В ході технічного проектування, проводять детальну розробку технічної документації конструкції та технологій, що необхідні для виготовлення дослідних зразків.

Вірність вибраних принципів побудови машини, конструкції, двигуна та основних технічних рішень, прийнятих при конструюванні, перевіряють виконанням великого обсягу експериментально-дослідних робіт на макетах та лабораторних зразках створюваного пристрою. Окрім використання принципу фізичного моделювання на різних макетах, широко використовують математичне модулювання. По результатам експериментально-дослідних робіт уточнюють вихідні дані для проектування, виявляють можливі конструктивні помилки та дефекти, здійснюють корекцію технічної документації.

Після виконання указаних робіт приймають рішення про виготовлення та випуск дослідних зразків.

Дослідні зразки піддають різноманітним за складом та задачами дослідженням, що допомагає здійснити експериментальну доробку конструкції. При цьому вирішуються наступні основні задачі:

- оцінка досконалості конструктивно-схемних рішень із метою визначення оптимального за масовим, енергетичним, економічним, експлуатаційно-технічним показником варіанту конструкції, що забезпечує виконання заданих вимог;

- виявлення помилок допущених при проектуванні конструкції і виборі матеріалу, виробничих дефектів, конструктивних відмов, доробка у відповідності з цим конструкції;

- оцінка дійсних, а не прогнозованих, значень показників, досягнутих на певний момент опрацювання, прогнозування змін цих показників в процесі експлуатації із метою прийняття рішення щодо можливості використання виробу за призначенням;

- уточнення характеристик окремих пристроїв, агрегатів як об'єктів регулювання та зовнішніх впливів із метою корегування вихідних даних, технічного завдання, проєктованої конструктивно-технологічної документації;

- розробка рекомендацій по експлуатації системи (машини, механізму).

Для вирішення перерахованих задач проводять різноманітні випробування як окремих вузлів, так і всієї машини в цілому. Ці випробування проводять як і в заводських (стендових, полігонних), так і в натурних умовах.

Державні випробування проводять, як правило, в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації. Їх мета – всебічна перевірка конструкції, її складових частин та прийняття рішення щодо прийомки виробу та передачі для впровадження в серійне виробництво. Перевіряють повноту та ефективність виконання доробок; оцінюють експлуатаційні якості конструкції та її ремонтпридатність; розробляють рекомендації щодо складу та кваліфікаційного рівня персоналу для обслуговування.

Система державних випробувань продукції, в тому числі і машинобудування, базується на нормативних документах. Охарактеризуємо сутність декотрих видів випробувань.

Дослідницькі випробування – випробування, що проводять для вивчення певних характеристик властивостей об'єкта.

Контрольні випробування проводять для контролю якості об'єкта.

Порівняльні випробування – випробування аналогічних за характеристиками або однакових об'єктів в ідентичних умовах для порівняння характеристик їх властивостей.

Державні випробування – випробування визначених найважливіших видів продукції, що проводяться головною організацією по державним випробуванням або державною комісією.

Міжвідомчі випробування – випробування, що проводять під наглядом комісії із представників декількох відомств.

Відомчі випробування – випробування, що проводяться комісією із представників зацікавленого представництва або відомства.

Приймальні випробування – контрольні випробування дослідних зразків, дослідних партій продукції або виробів одиничного виробництва.

Кваліфікаційні випробування – контрольні випробування установчої серії чи промислової партії, які проводять для оцінки готовності підприємства до випуску продукції даного типу в заданому обсязі.

Приймально-здаточні випробування – контрольні випробування продукції при приймальному випробуванні.

Атестаційні випробування – випробування, що проводять для оцінки рівня якості продукції при її атестації по категоріям якості.

Типові випробування – контрольні випробування виготовлюваної продукції, які проводять з метою оцінки ефективності та доцільно-

сті впроваджуваних змін у конструкцію, рецептуру чи технологічних процес.

Сертифікаційні випробування – контрольні випробування продукції, що проводять із метою визначення відповідності характеристик властивостей національній або міжнародній нормативно-технічній документації.

Лабораторні випробування – випробування об'єкту в лабораторних умовах.

Стендові випробування – випробування об'єкту на випробувальному обладнанні, оснащеному необхідними пристроями, приладами, технікою та комп'ютерами.

Полігонні випробування – випробування об'єкту на випробувальному полігоні.

Натурні випробування – випробування об'єкту в умовах, котрі відповідають умовам його використання за прямим призначенням, із безпосередньою оцінкою та контролем властивостей об'єкта.

## **7. МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ, ЩО ФОРМУЄ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ**

### **7.1. Технологічний процес, технологічна операція, їх структура. Класифікація операцій термічної (хіміко-термічної) обробки**

Технологічний процес – частина виробничого процесу, що вирішує дії по зміні та наступному визначенню стану предмета виробництва.

Технологічна операція – завершальна частина виробничого процесу термічної (хіміко-термічної) обробки (Т/ХТ/О), що обмежена проміжками часу, впродовж котрих предмет виробництва не зазнає теплового впливу, тобто знаходиться в атмосферній або близькій до неї температурі, може зберігатися, піддаватися механічній обробці, контролю, додатковим операціям.

Технологічний перехід – завершальна частина (елемент) технологічної операції Т/ХТ/О, відокремлена від решти частин за яким-небудь основним критерієм, наприклад, за напрямком зміни температури, швидкістю нагрівання (охолодження). Приклади переходів: нагрівання, витримка, охолодження. Як правило, режим переходу закріплений і технологічно зв'язаний із суміжними елементами операції і виконати перехід відокремлено не можна.

Класифікація операцій Т/ХТ/О:

- відпал без фазових перетворень (дифузійний, графітизаційний, рекристалізаційний (повний, неповний, дорекристалізаційний), для зняття напружень);

- відпал з фазовими перетвореннями (повний, неповний, ізотермічний, сфероїдизаційний);

- гартування без поліморфного перетворення (із природнім охолодженням, із примусовим охолодженням, від субкритичних температур, сходинкове);

- гартування із поліморфними перетвореннями (при природному охолодження, при примусовому охолодження (ізотермічне, сходинкове, в одному охолоджувачі, в двох охолоджувачах, в штампах), із самовідпусканням, із обробкою холодом);

- відпуск (високотемпературний (знеміцнювальний, зміцнювальний), середньотемпературний, низькотемпературний, сходинковий);

- старіння (штучне (повне, неповне, без попереднього гартування), природне, пом'якшувальне (перестарювання), стабілізаційне);

- хіміко-термічна обробка. Дифузійне насичення неметалами (просте та комплексне). Просте – цементация, азотування, сульфидування, борування. Комплексне – нітроцементация, азотонавуглецювання, сульво-вуглець азотування. Дифузійне насичення металами (однокомпонентне та комплексне насичення). Однокомпонентне насичення – алітування, хромування, міднення, лужіння. Комплексне – хромоалітування, алюмосиліціювання. Дифузійне вилучення елементів (прості процеси – зневуглецювання, зневоднення; комплексні).

Технологічний процес виготовлення (ТПВ) виробів включає вирішення задач, що ґрунтуються на наступних основних функціях:

- забезпечення технологічності конструкції виробу;
- розробка технологічних процесів;
- проектування та виготовлення засобів технологічного оснащення;
- організація та управління процесом ТПВ.

Задачі, їх рівень рішення та основні документи, що забезпечують (регламентують) рішення задач надано в табл.7.1.

Таблиця 7.1 – Основні функції ТПВ, загальні задачі та їх рівень вирішення, забезпечувальна документація

Основні функції ТПВ	Загальні задачі	Рівень рішення	Основні документи, що забезпечують рішення загальних задач
1	2	3	4
Забезпечення технологічності конструкції виробу	Розробка типових методів та засобів відпрацювання конструкції виробу на технологічність	Галузевий	Стандарт ЄСТПВ, галузеві стандарти, методичний матеріал
	Розробка базових показників технологічності конструкції виробу	-	-
	Виконання технологічного контролю конструкторської документації	Підприємства	
	Оцінка рівня технологічності конструкції виробу		
	Оцінка рівня забезпечення технічних вимог		

1	2	3	4
Забезпечення технологічності конструкції виробу	<p>Відпрацювання конструкції виробу на технологічність</p> <p>Внесення необхідних змін в конструкцію виробу та документацію</p> <p>Зменшення обсягу робіт по ТПВ завдяки забезпеченню високого рівня технологічності конструкції виробу</p>	Підприємства	-
Розробка технологічних процесів	<p>Розробка і стандартизація типових технологічних процесів на виробі та складальні одиниці галузевого використання</p> <p>Створення галузевих фондів документації на типові технологічні процеси та централізація забезпечення цією документацією підприємств галузі</p> <p>Розробка, стандартизація і використання типових технологічних процесів із використанням методів групової обробки</p> <p>Розробка та використання робочих технологічних процесів на деталі та складальні одиниці</p> <p>Створення заводських фондів бази документації та типові технологічні процеси із використанням методів групового оброблення</p>	<p>Галузевий</p> <p>Підприємства</p>	-
Проектування та виготовлення засобів технологічного оснащення	<p>Розробка та виготовлення типових засобів технологічного оснащення</p> <p>Проведення робіт по спеціалізації проектування, виробництву та створення галузевих баз прокату</p>	Галузевий	Стандарт ЄСТПВ, галузеві стандарти, методичний матеріал

	цих засобів, комплексна стандартизація цих засобів		
1	2	3	4
Проектування та виготовлення засобів технологічного оснащення	Проведення уніфікації та стандартизації засобів технологічного оснащення, використання галузевих баз прокату цих засобів Проектування та виготовлення спеціальних засобів технологічного оснащення	Підприємства	Стандарт ЄСТПВ, галузеві стандарти, методичний матеріал
Організація та управління процесом ТПВ	Перспективне та річне планування розвитку ТПВ на підприємствах галузі Організація та удосконалення структури служб ТПВ. Перспективне планування. Використання сучасних методів рішення	Галузевий Підприємства	Стандарт ЄСТПВ, галузеві стандарти, методичний матеріал

Розробка, оформлення та обіг документації при ТПВ повинні здійснюватися у відповідності із вимогами стандартів уніфікованих систем документації, в т. ч. ЄСКД, ЄСТД (єдина система технологічної документації). Специфічні вимоги до ТП одиничного, дрібносерійного, серійного, крупносерійного та масового виробництва виробів передбачаються галузевими стандартами, що розроблені на основі ЄСТПВ.

Весь комплекс робіт по ТПВ повинен виконуватися у відповідності із вимогами безпеки праці.

## **7.2. Порядок організації науково-технічних розробок в області технологічної підготовки виробництва, приймання та передачі їх у виробництво**

Розробки в області ТПВ спрямовані на використання наукових розробок, науково-технічний прогрес, збільшення ефективності виробництв, раціональне використання виробничих фондів, трудових, матеріальних, енергетичних, фінансових ресурсів, поліпшення умов праці та охорону довкілля.

**Функції замовника, виконавці та споживача при виконанні технологічних та організаційних розробок.** Замовник надає розробнику вхідні вимоги до розробки; узгоджує технічне завдання на розробку; здійснює прийом результатів на розробку і визначає сфери їх використання.

Замовник несе відповідальність за зміст та техніко-економічну обґрунтованість вхідних даних для розробки, за відповідність цих даних сучасному рівню розвитку науки, техніки і виробництва.

Виконавець, на основі досягнень науки, техніки, досвіду в області технологій, розробляє технічне завдання у відповідності із вимогами замовника, узгоджує його із зацікавленими споживачами, розробляє та вносить пропозиції по стандартизації розробок, методів випробувань, розробляє необхідну документацію та відповідає за їх підготовку в повному комплексі, відповідає за виконання розробки в узгодженні терміни та зі її якістю.

Споживач відповідає за обґрунтованість вимог до розробки, забезпечує її використання; приймає участь в проведенні приймальних перевірок; систематично інформує замовника та виконавця про результати використання розробки, а також про розробки аналогічного типу і призначення.

### **7.3. Порядок виконання, прийомки та передачі у виробництво розробок нових технологічних процесів**

**Порядок розробки, узгодження та затвердження технічних завдань.** Технічне завдання (ТЗ) розробляють на основі результатів наукового прогнозування, аналізу передових досягнень та технічного рівня вітчизняної та зарубіжної технології виробництва, вивчення патентної документації, а також на основі вхідних вимог замовника.

В ТЗ, як правило, включають прогнозовані вимоги із урахуванням досягнень в даній галузі, повного забезпечення потреб виробництва, мінімізації затрат на виконання та впровадження результатів розробки.

Технічне завдання, як правило, розробляє (складає) виконавець розробки. ТЗ не повинно обмежувати ініціативу виконавця при пошуку та виборі оптимального рішення. ТЗ узгоджується із замовником (він не може бути і споживачем), із співвиконавцями, із споживачем та із іншими зацікавленими організаціями (в майбутньому вони можуть бути споживачами).

Технічне завдання затверджується організацією–виконавцем.

Для внесення змін або доповнень в ТЗ на останніх стадіях виконання розробок випускається доповнення до нього. Узгодження та затвердження доповнень до ТЗ – аналогічні.

***Розробка ПТД (проекту технологічної документації).***

***Порядок проведення експертизи проектів технологічної документації (ЕПТД).*** Експертизу ПТД проводять із метою визначення відповідності розробленого ТП технологічному завданню. При проведенні експертизи в загальному випадку перевіряють:

- відповідність показників точності, стабільності, надійності, установлених в технологічній документації (ТД), вимогам ТЗ;
- комплектність виконання ТД у відповідності із вимогами ТЗ;
- дотримання стандартів (ЄСТД);
- відповідність розробленого ТП вимогам безпеки та санітарно-гігієнічним нормативам.

Експертизу розробки виконує головна організація по проблемі, до якої відноситься розробка.

Стадії розробки, на яких проводять експертизу, перелік технологічних процесів, документів, які піддають експертизі, перелік показників, за якими проводиться експертиза, порядок та місце проведення, перелік організацій, що проводять експертизу визначають провідні відомства, головні галузеві інститути або замовник.

За результатами експертизи складають експертне заключення.

***Порядок прийомки результатів технологічних розробок.*** Контроль якості розроблених технологічних процесів для одиничного виробництва та їх прийомку здійснюють на етапах виготовлення та випробування перших зразків виробів.

Контроль якості розроблених ТП для серійного та масового виробництва та їх прийомку здійснюють на наступних етапах освоєння випуску виробів: виготовлення та випробування установочної серії виробів; виготовлення та випробування головної серії виробів.

При випробуванні установочної серії виробів визначають підготовленість розробленого ТП до випуску виробів в обсязі передбаченому для даного етапу, та можливість використання цього процесу для виготовлення головної (контрольної) серії виробів.

При випробуванні головної серії виробів перевіряють точність, стабільність, надійність, повністю оснащеного ТП, якість і надійність виробів, виготовлених із використанням розробленого ТП.

Кількість виробів в установчій та головній серіях, порядок проведення відповідних випробувань, кількість випробуваних зразків повинні відповідати вимогам стандартів, технічним умовам або технічній документації на виріб.

За результатами випробувань приймальна комісія складає протокол випробувань, а на його основі складає акт приймання результатів розробки ТД.

***Порядок передачі розробки ТП у виробництво.*** По завершенню науково-технічних розробок ТП приймається рішення про терміни і обсяги освоєння та впровадження результатів розробок у виробництво.

Організаційні виконавці розробок ТП здійснюють передачу документів ТП, надають підприємствам допомогу у використанні досвіду, здійснюють інформаційну роботу. Слід пам'ятати, що при представлення, виборі та оцінці матеріалів для публікацій в науково-технічній літературі необхідно керуватись наступними положеннями:

- матеріали повинні представляти інтерес для ряду підприємств галузі або для інших галузей;
- результати розроблених ТП повинні бути відтворені на різних підприємствах;
- патентна захищеність матеріалів, що публікуються;
- матеріали, що надані для публікацій, повинні включати обґрунтування по раціональному впровадженню результатів розробок ТП, дані про їх техніко-економічну ефективність.

## **8. ЄДИНА СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА (ЄСТП)**

ЄСТП – це встановлена державними (міждержавними, ГОСТ) стандартами система організації та управління процесом підготовки виробництва, що передбачає широке використання типових перспективних технологічних процесів, стандартних видів оснащення та обладнання, засобів механізації та автоматизації, інженерно-технічних та управлінських робіт.

Основне призначення ЄСТП полягає в розробці системи організації та управління процесом технологічної підготовки виробництва, що забезпечує:

- єдиний для усіх підприємств та організацій системний підхід щодо вибору і використанню методів та засобів технологічної підготовки виробництва (ТПВ), що відповідає сучасним досягненням науки, техніки, виробництва;

- освоєння виробництва та випуск виробів високої категорії якості в мінімальний термін, при мінімальних трудових та матеріальних затратах на ТПВ на усіх стадіях створення виробів, в тому числі дослідні зразки та вироби одиничного виробництва;

- організацію виробництва високого ступеня гнучкості, що допускає можливість неперервного удосконалення та швидке переналагодження на випуск нових виробів;

- раціональну організацію механізованого та автоматизованого виконання комплексу інженерно-технічних та управлінських робіт;

- взаємозв'язки системи ТПВ із другими системами, підсистемами та управління нею.

Документацію на конкретні методи та засоби ТПВ розробляють у відповідності із вимогами стандартів Державної системи стандартизації, ЄСТПВ та інших нормативних документів:

- ЄСКД;

- ЄСТД;

- єдиної системи класифікації та керування техніко-економічної інформації;

- єдиної системи державного управління якістю продукції;

- системи розробки та постачання продукції на виробництво (СРПП);

- державної системи забезпечення єдиних вимірювань;

- планової та організаційно-розпоряджувальної документації, що регламентує та регулює ТПВ;

- нормативно-технічної документації на: типові та інші прогресивні технологічні процеси і методи їх стандартизації, засоби технологічного оснащення та методи їх уніфікації, агрегування та стандартизації, методи проведення розрахункових та експериментальних робіт в області ТПВ, методи нормування та нормативно-довідникові дані, методи організації та управління процесом ТПВ щодо конкретних видів виробів та типів виробництва;

- документації щодо механізації та автоматизації обробки інформації, що використовується при ТПВ та управлінні нею;

- системи стандартів безпеки праці (ССБП);

- системи управління промисловим підприємством.

ТПВ повинна забезпечити повну технологічну готовність виробництва до випуску виробів необхідної якості у відповідності із заданою річною програмою, техніко-економічними показниками, із трудовими та матеріальними витратами.

Нормативна документація передбачає, що під повною технологічною готовністю розуміється наявність на підприємстві повного комплексу технологічної документації та засобів технологічного оснащення, що забезпечують випуск виробів.

ТПВ розпочинається із отримання вхідних документів на розробку та випуск нових виробів, організацію нового або удосконалення існуючого виробництва або виробництва, що діє.

ТПВ повинне здійснюватися на основі використання сучасних методів організації та управління (моделювання процесів, техніко-економічних методів тощо).

## **9. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ**

В машинобудування давно існує тенденція ускладнення конструкцій та розширення їх номенклатури при збільшенні обсягу випуску підприємствами із дрібносерійним та серійним типом виробництва. Це привело до того, що терміни технологічної підготовки при освоєнні нових типів виробів наблизились до терміну зміни самих виробів. Тому перед машинобудівниками висунута задача скорочення часу, трудових та матеріальних витрат при освоєнні нових виробів за умови безперечного забезпечення заданої якості виробів.

Рішення цієї задачі пов'язане із забезпеченням необхідної надійності технологічних процесів. Це вимагає комплексного підходу до вивчення та проектування технологічних процесів та вибору керуючих впливів.

До основних напрямків, що забезпечують підвищення надійності технологічних процесів слід віднести:

- створення прикладної теорії надійності технологічних процесів;
- дослідження типових та уніфікованих технологічних процесів;
- використання передових технологічних процесів термічної (хіміко-термічної) обробки та контролю;
- використання технологічного обладнання, пристосувань, інструментів, що характеризуються високою технологічною надійністю;
- підвищення технологічності конструкції виробів;
- автоматизація процесів виробництва;
- оптимізація технологічних процесів із обов'язковим урахуванням їх надійності.

Із метою вирішення поставлених задач створюють спеціальні автоматизовані системи проектування (САПР) на основі математичних методів та комп'ютерна техніка. В загальному випадку етап технологічної підготовки виробництва умовно розділяється на дві частини.

Перша частина – проектування технологічних процесів із усіма необхідними доробками та корегуванням. САПР вирішує цю частину, значно зменшуючи (в 2...3 рази) затрати часу на проектування.

Друга частина – впровадження із усіма необхідними доробками. Виконує технолог як при ручному, так і при машинному проектуванні. Ретельне корегування машинних алгоритмів під конкретні виробничі умови може зменшити кількість доробок, але не вирішує проблему у цілому.

Рішення цієї задачі неперервно пов'язане із забезпеченням необхідної надійності технологічного процесу, як на етапі проектування, так і на етапі виробництва.

Результати прогнозування надійності технологічного процесу при технологічній підготовці виробництва повинні бути основою для варіантної та параметричної оптимізації технологічного процесу.

Технологічний процес забезпечується власною технологічною системою, котра включає в себе обладнання, засоби контролю та керування, транспортні та допоміжні пристрої, об'єкти виробництва, конструкторську та технологічну документацію і, нарешті, люди, що керують процесом.

Зважаючи на зазначене, технологічна система відноситься до класу складних систем, розрахунок котрих ведуть із використанням структурних схем. Загальна технологічна система умовно розбивається на ряд технологічних підсистем, що забезпечують здійснення окремих технологічних операцій та характеризуються самостійними вхідними та вихідними параметрами. Це означає, що надійність технологічної системи залежить від: надійності підсистем, що здійснюють технологічні операції; структури системи, що визначає взаємозв'язок та послідовність виконання технологічних операцій.

Розглянемо схему оцінки надійності технологічного процесу, що складається із  $j$ -их послідовних операцій, без урахування надійності контрольних операцій (рис.9.1).

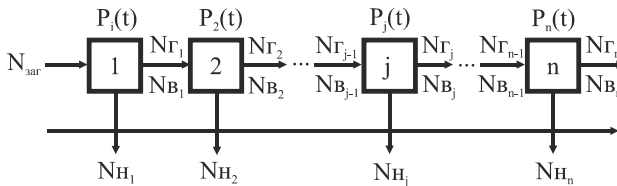


Рисунок 9.1 – Схема оцінки надійності технологічного процесу

На схемі:  $P_j(t)$  – імовірність виконання завдання  $j$ -ої технологічної підсистеми, що в загальному випадку відповідає імовірності безвідмовної роботи технологічної підсистеми;  $N_{\text{заг}}$  – кількість заготовок, запущених у виробництво впродовж установленого часу;  $N_{Г_j}$  – об'єм обробленої на  $j$ -ій операції продукції за час, признаної за результатами контролю годною;  $N_{В_j}$  – об'єм обробленої на  $j$ -ій операції продукції за час, признаної за результатами контролю виправним браком (за рахунок додаткової операції);  $N_{Н_j}$  – об'єм обробленої на  $j$ -ій операції продукції за час, признаної за результатами контролю остаточним браком.

У відповідності зі схемою надійності технологічного процесу:

$$N_{Г_j} = N_{\text{заг}} \cdot P_j \cdot \prod_{j=1}^{n-1} [P_j + a_j(1 - P_j)]$$

$$N_{В_j} = N_{\text{заг}} \cdot a_j(1 - P_j) \cdot \prod_{j=1}^{n-1} [P_j + a_j(1 - P_j)]$$

$$N_{Н_j} = N_{\text{заг}} \cdot \sum_{j=1}^n (1 - a_j)(1 - P_j) \cdot \prod_{j=1}^{n-1} [P_j + a_j(1 - P_j)]$$

$$N_{\text{зад}} = \frac{N_{\text{зад}}}{\prod [P_j + a_j(1 - P_j)]}$$

де  $\alpha_j = \frac{N_{В_j}}{(N_{В_j} + N_{Н_j})}$  – коефіцієнт, що характеризує імовірність появи

виправного браку;

$N_{\text{зад}}$  – заданий обсяг річної продукції, котрий необхідно виготовити.

Змінна частина виробничих затрат не виготовлена  $N_{Г_j}$ , що залежить від варіанту технологічного процесу та умов виконання  $j$ -ої операції:

$$C_{Г_j} = N_{Г_j} (C_{\text{заг}} - C_{\text{від}_j} + C_{Т_j})$$

де  $C_{\text{заг}}$  – затрати на одну заготовку;

$C_{\text{від}_j}$  – вартість реалізованих відходів при виготовлення однієї деталі на  $j$ -ій операції.

$C_{Т_j}$  – технологічна собівартість однієї деталі на  $j$ -ій операції.

Затрати на виготовлення виправного браку:

$$C_{Bj} = N_{Bj} (C_{\text{зсг}} - C_{\text{вд}}_j + C_{\text{т}}_j + C_{\text{випр}}_j + C_{\text{тех}}_j)$$

де  $C_{\text{випр}}_j$  – затрати на виправлення браку одного виробу після  $j$ -ої операції;

$C_{\text{тех}}_j$  – затрати на технічне обслуговування, що не входять в заходи, передбачені нормативно-технічною документацією.

Затрати на виготовлення  $N_{Hj}$ :

$$C_{Hj} = N_{Hj} (C_{\text{зсг}} - C_{\text{вд}}_j - C_{\text{рв}}_j + C_{\text{т}}_j + C_{\text{тех}}_j)$$

де  $C_{\text{рв}}_j$  – вартість реалізуемого матеріалу бракованої деталі після  $j$ -ї операції;

Наведені розрахунки затрат на виготовлення  $N_{Hj}$  та  $N_{Bj}$  не враховують суб'єктивні фактори працівників.

Таким чином затрати, що зв'язані із виготовленням заданого річного обсягу продукції мають вид:

$$\begin{aligned} C &= N_{\text{зсг}} \cdot R_j \cdot \prod_{j=1}^{R-1} [R_j + a_j(1 - R_j)] \cdot \left( C_{\text{зсг}} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{т}}_j \right) + \\ &+ N_{\text{зсг}} \cdot a_j(1 - R_j) \cdot \prod_{j=1}^{R-1} [R_j + a_j(1 - R_j)] \cdot \left( C_{\text{зсг}} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{т}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{рв}}_j + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=1}^n C_{\text{тех}}_j \right) + N_{\text{зсг}} \sum_{j=1}^n \left\{ (1 - a_j) (1 - R_j) \prod_{j=1}^n [R_j + a_j(1 - R_j)] \right\} \times \\ &\times \left( C_{\text{зсг}} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}}_j - \sum_{j=1}^n C_{\text{рв}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{т}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{тех}}_j \right) \end{aligned}$$

Затрати на виготовлення одиниці годної продукції:

$$\begin{aligned} C_{\text{год}} &= \left( C_{\text{зсг}} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{т}}_j \right) + \frac{a_j(1 - R_j)}{R_j + a_j(1 - R_j)} \times \\ &\times \left( \sum_{j=1}^n C_{\text{випр}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{тех}}_j \right) + \frac{\sum_{j=1}^n [(1 - a_j)(1 - R_j) \prod_{j=1}^n [R_j + a_j(1 - R_j)]]}{\prod_{j=1}^n [R_j + a_j(1 - R_j)]} \times \\ &\times \left( C_{\text{зсг}} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}}_j - \sum_{j=1}^n C_{\text{рв}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{т}}_j + \sum_{j=1}^n C_{\text{тех}}_j \right) \end{aligned}$$

Аналіз останнього виразу показує, що підвищення надійності технологічного процесу до відомої межі призводить до зниження затрат на виготовлення продукції. Подальше підвищення надійності не-

доцільне, тому що зростають наведені затрати внаслідок непропорційності віддачі використаним ресурсам.

Визначення оптимального рівня надійності безпосередньо пов'язане з іншими задачами, що вирішуються на етапі технологічної підготовки: вибір технологічного методу обробки, обладнання, пристосування, режиму обробки. Таким чином, задача, що вирішується, є комплексною.

Відомі методики оптимізації технологічних процесів як окремі, так і комплексні, не враховують затрати, що пов'язані із відмовою технологічної системи. Задача оптимізації технологічного процесу із урахуванням його надійності складається із визначення структури та параметрів процесів, при яких змінна частина приведених затрат підприємства залежить від варіанту технологічного процесу та має мінімальне значення:

$$Z_1 = \min E_x \left( \sum_{j=1}^n K_{1j} + \left( C_{12} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}j} x_j + \sum_{j=1}^n C_{\tau j} \right) + \frac{\alpha_j (1 - P_j)}{P_j + \alpha_j (1 - P_j)} \times \right. \\ \left. \times \left( \sum_{j=1}^n C_{\text{вип}j} + \sum_{j=1}^n C_{\text{ст}j} x_j \right) + \frac{\sum_{i=1}^m [(1 - \alpha_i) (1 - P_i) \prod_{j=1}^n (P_j + \alpha_j (1 - P_j))] \right) \times \\ \times (C_{12} - \sum_{j=1}^n C_{\text{вд}j} x_j - \sum_{j=1}^n C_{\tau j} + \sum_{j=1}^n C_{\tau j} + \sum_{j=1}^n C_{\text{ст}j} x_j),$$

де  $K_{1j} = K_{1j}(x_j, U_j)$ ,  $\alpha_j = \alpha_j(x_j, U_j)$ ,

$P_j = P_j(x_j, U_j, t)$ ,  $C_{\tau j} = C_{\tau j}(x_j, U_j)$ ,

$C_{\text{вд}j} = C_{\text{вд}j}(x_j, U_j)$ ,  $C_{\text{вип}j} = C_{\text{вип}j}(x_j, U_j)$ ,

$C_{\text{ст}j} x_j = C_{\text{ст}j}(x_j, U_j)$ ,  $C_{\tau j} = C_{\tau j}(x_j, U_j)$ ,

за умови  $x_j = f(x_j, U_j, t_j)$ ,  $x_j(t) \in U_j$ ,  $j = 1, n$  (А)

$U_j(t) \in U_j$ ,  $i \in I$ ,  $i = 1, m$  (Б)

де  $Z_1$  – приведені затрати на виготовлення одиниці годної продукції за  $i$ -м технологічним процесом;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$K_{1j}$  – питомі капітальні вкладення в виробничі фонди на  $j$ -ій операції  $i$ -го технологічного процесу, що припадають на одну годну деталь;

$x_i$  – множина припустимих значень вектора  $X_{ij}(t)$ ;

$x_{ij}(t)$  – фазовий вектор технологічних параметрів, що визначають стан  $j$ -ої операції в момент часу;

$U_i$  – множина припустимих значень вектора  $U_{ij}(t)$ ;

$U_{ij}(t)$  – вектор керування компонентами контролю  $\epsilon$  технологічних параметри  $j$ -ої операції;

$I$  – множина допустимих варіантів  $i$ -их технологічних процесів.

До фазових технологічних параметрів відносяться показники якості випущеної продукції.

До керуючих технологічних параметрів відносяться температура, тиск, склад атмосфери, швидкість нагрівання (охолодження), час та інше.

Математичну модель технологічного процесу представляють системою рівнянь:  $A$  – рівняння зв'язку;  $B$  – рівняння обмежень.

В загальному випадку накладаються обмеження за якістю продукції, продуктивністю обладнання, за витратами оборотних засобів, на організаційно-технічні та технологічні можливості основних засобів виробництва. Система рівнянь  $B$  виділяє в просторі технологічних параметрів область допустимих значень.

Визначення числових значень технологічних параметрів, при яких цільова функція – змінна частина приведених затрат – прийме мінімальне значення, і є задачею параметричної оптимізації технологічного процесу із урахуванням його надійності.

Варіантна оптимізація дозволяє виявити оптимальний варіант із  $i$ -их технологічних процесів після попередньої параметричної оптимізації кожного із порівнювальних варіантів.

Реалізація зазначеної методики дозволяє вирішити задачу оптимальних технологічних процесів із урахуванням їх надійності. Це дозволить скоротити термін виробничого впровадження спроектованого технологічного процесу та знизити приведені затрати на виготовлення продукції.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Наука про матеріали: досягнення та перспективи: монографія. - К.: "Академперіодика", у 2-х т. – 2018. – 395 с.
2. Інженерне матеріалознавство: Підручник / О. М. Дубовий, Ю. О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедєва, С.М. Самохін. - Миколаїв: НУК, 2009.-444 с.
3. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту [Текст] : монографія / С. А. Клименко [и др.] ; НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля. - К. : ІНМ ім. В.М.Бакуля, 2009. - 172 с.
4. Київська конференція молодих вчених "Новітні матеріали та технології" НМТ- 2006, 16-17 листопада 2006 р., Київ [Текст] / НАН України. - К. : НАНУ, 2006. - 166
5. Конструкционные материалы: справочник / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
6. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштада. – М.: Металлургия, 1980. – 782 с.

## Допоміжна

1. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справочник / под общ. ред. В.Д. Кальнера. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
2. Гиссин В.И. Управление качеством продукции / В.И. Гиссин. – Ростов-на Дону: Феникс, 2000. – 256 с.
3. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения: ГОСТ 16.504-81.
4. Единая система технологической документации. Формы и требования к заполнению и оформлению документов на технологические процессы термической обработки: ГОСТ 3.1405-86.
5. Гуляев А.П. Выбор стали для деталей машин (основные положения) / А.П. Гуляев// МиТОМ. – 1983. - № 1. – С. 54-59.
6. Зоткин В.Е. Методы и критерии оценки эффективности использования материалов / В.Е. Зоткин // МиТОМ. – 1985. - № 7. – С. 46-50.
7. Балашов Е.П. Статистический контроль и регулирование качества массовой продукции / Балашов Е.П. – М.: Машиностроение, 1984. – 231 с.