

## Експлуатаційні та фізичні властивості матеріалів

До експлуатаційних (службових) властивостей відносяться жароміцність, жаростійкість, зносостійкість, радіаційна стійкість, корозійна і хімічна стійкість та ін.

Важливішими деталями сучасного авіаційного двигуна є лопатки газової турбіни, які під час експлуатації двигуна нагріваються до температур порядку 900 – 1000 °С та тривалий час експлуатуються при цих умовах. Тому необхідно, щоб матеріал лопаток був жароміцним.

*Жароміцність* – це здатність металів та сплавів тривалий час чинити опір початку та розвитку пластичної деформації та руйнування під дією постійних навантажень при високих температурах.

Кількісно жароміцність виражається трьома характеристиками: межею короткочасної міцності, межею повзучості та межею тривалої міцності.

Як відомо, міцність металів та сплавів з підвищенням температури зменшується. Зміна міцності заліза в залежності від температури випробовування представлено на рис. 1. Підвищення міцності при температурі 200 – 300 °С, що пояснюється впливом домішок, є характерним для мало вуглецевої сталі.

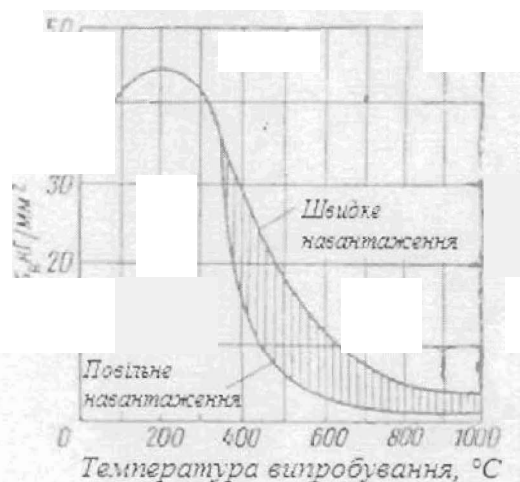


Рис. 1. Залежність межі міцності заліза від температури та швидкості випробовування.

Подальше підвищення температури призводить до різкого зменшення міцності. Вище температури 350 °С, як видно з діаграми, межа міцності заліза залежить від швидкості навантаження. При повільному навантаженні межа міцності падає більш різко, ніж при звичайному (швидкому), статичному навантаженні.

*Короткочасна міцність.* Випробовування на розтяг при високих температурах, що здійснюються при звичайному статичному навантаженні, коли навантаження зростає швидко, протягом короткого проміжку часу, називаються *короткочасними випробовуваннями*, які не характеризують у повній мірі властивості, а надають лише наближені уявлення про їх жароміцність. На основі короткочасних випробувань на розтяг можна отримати уявлення про здатність випробуваного зразка до гарячого оброблення тиском (куванню, штампуванню, прокатуванню), а також про поведінку матеріалу деталей в початковий період їх роботи.

Для короткочасних випробувань застосовують звичайні машини, як для статичних випробувань при кімнатних температурах, але оснащені назріваючими пристроями.

*Повзучість металів.* Повзучість – це властивість металів та сплавів повільно та безперервно пластично деформуватися при високих температурах під дією постійного та тривалого навантаження.

Повзучість виникає лише при умові, якщо прикладене напруження вище межі пружності при даній температурі та якщо температура вище температури рекристалізації, яка викликає знеміцнення пластично деформованого матеріалу (рис. 2).

З діаграми видно, що при температурах вище 400 °С межа пружності  $\sigma_n$  стає нижче прикладеного напруження і матеріал починає пластично деформуватись. При напруженнях, що нижче прикладеного, та при температурі нижче 400 °С буде тільки пружна деформація.

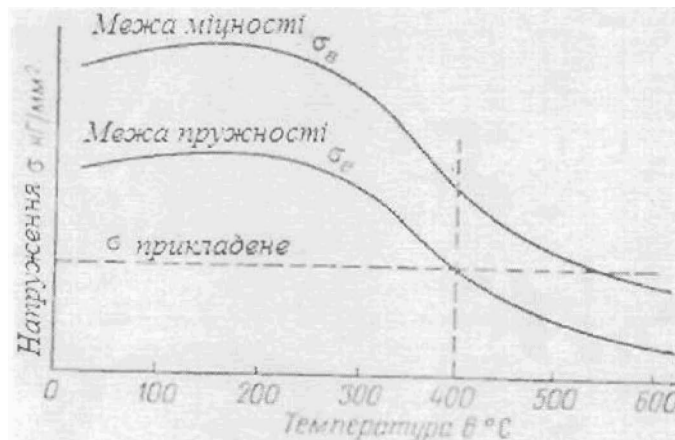


Рис. 2. Схема зміни механічних властивостей вуглецевої сталі при підвищених температурах.

Повзучість супроводжується двома взаємно протилежними процесами: зміцненням та знеміцненням. Зміцнення виникає в результаті пластичного деформування, а знеміцнення – в результаті рекристалізації. Температура рекристалізації є температурною межею, вище якої найбільш проявляється повзучість. *Межею повзучості* називається напруження, яке за проміжок часу викликає при даній температурі задане сумарне видовження або задану швидкість деформації.

Існує ряд випробувань на повзучість: при розтягуванні, крутінні та складно-напруженому стані. Під час випробування температура та навантаження зберігаються постійними.

*Тривала міцність.* Крім короточасних випробувань при високих температурах та випробувань на повзучість, проводять випробування на тривалу міцність. *Межею тривалої міцності* називається напруження, яке викликає руйнування зразка при даній температурі через певний проміжок часу, тобто це характеристика опору руйнуванню.

Випробування на тривалу міцність проводять на тих же машинах, що і випробування на повзучість але додатково обладнаних пристроями для фіксації точного часу розриву зразка, і тривають протягом 100, 200, 500, 1000 і більше

годин, а результати випробувань зображують графічно у координатах «напруження – час до руйнування» (рис. 3).

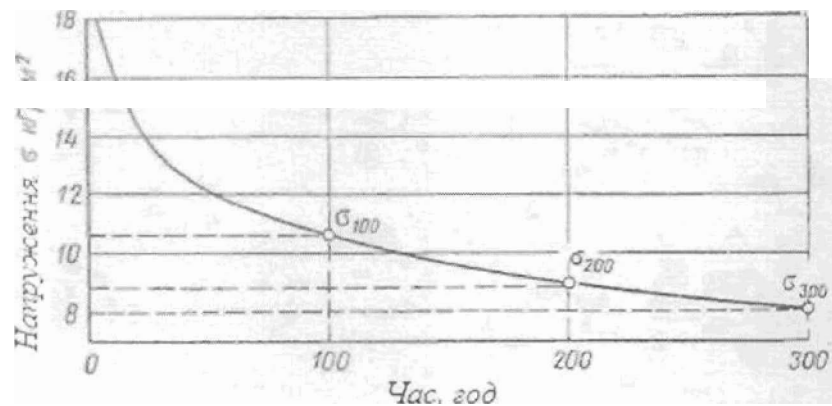


Рис. 3. Крива тривалої міцності.

*Жаростійкість* – здатність матеріалів і конструкцій в умовах тривалої дії високих температур зберігати в необхідних межах свої фізичні і механічні властивості. Межа жаростійкості матеріалів визначається температурою, при якій вони в умовах тривалого нагрівання і наступного охолодження починають руйнуватися або переходити в пластичний стан; при періодичних впливах високої температури мають значення режими нагрівання та охолодження. *Межа жаростійкості* характеризується комплексом показників: вогнетривкістю, температурою, деформацією під навантаженням, міцністю в нагрітому стані, розширенням і усадкою, модулем пружності в нагрітому і холодному стані, повзучістю та ін.

*Зносостійкість* – це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню його поверхневих шарів при терті.

*Радіаційна стійкість* характеризує здатність матеріалу чинити опір дії ядерного опромінення.

*До фізичних властивостей* матеріалів відноситься щільність, температура плавлення, електропровідність, теплопровідність, магнітні властивості, коефіцієнт температурного розширення та ін.

*Щільністю* називається відношення маси однорідного матеріалу до одиниці його обсягу. Ця властивість важлива при використанні матеріалів в авіаційній і ракетній техніці, де створювані конструкції повинні бути легкими і міцними.

*Температура плавлення* – це така температура, при якій метал переходить з твердого стану в рідкий. Чим нижче температура плавлення металу, тим легше протікають процеси його плавлення, зварювання і тим вони дешевші.

*Електропровідністю* називається здатність матеріалу добре і без втрат на виділення тепла проводити електричний струм. В основі електропровідності металів лежить металічний зв'язок. Атоми розташовані в решітці у певних положеннях, а їх електрони частково колективізовані (електронний газ, що складається з вільних електронів в кількості  $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ).

Високою електропровідністю володіють метали і їхні сплави, особливо мідь і алюміній. Більшість неметалічних матеріалів не здатні проводити електричний струм, що також є важливою властивістю, при використанні в електроізоляційних матеріалах.

*Модель потенційної ями.* Модель виходить з уявлення про те, що вільні електрони при прикладенні електричного поля приходять в спрямований рух. Завдяки цьому метали характеризуються електронною провідністю. Відповідно до моделі потенційної ями, електрони в ній знаходяться на постійній глибині (рис. 4).

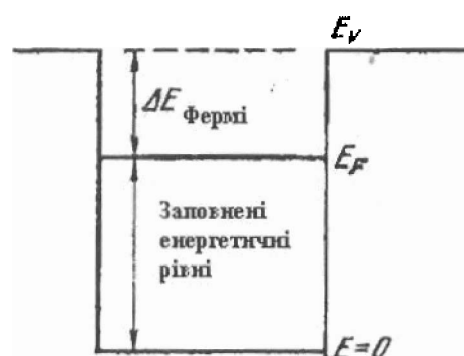


Рис. 4. Схема розташування енергетичних рівнів:  $E_0$  – потенціал у вакуумі;  $E_F$  – рівень Фермі;  $E = 0$  – потенціал решітки металу.

Потенціал решітки металу дорівнює нулю. При абсолютному нулі електронні стани до рівня енергії Фермі заповнені. При збудженні електрони переходять через рівень енергії Фермі.

Електрони в потенційній ямі розглядаються як плоскі хвилі і описуються за допомогою хвильових функцій.

Оскільки електрони знаходяться тільки в дискретних енергетичних станах, кожне з них відповідає певній власній функції (опис за допомогою рівняння Шредінгера).

При абсолютному нулі електропровідність ідеальної решітки нескінченно велика. Дефекти в реальній решітці є причиною появи електроопору. З теорії потенційної ями випливає, наприклад, пояснення таких понять, як контактне напруження, термоелектрика і робота виходу.

Відповідні дані для ряду металів і окислів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 –

Робота виходу для металів та окислів

| Метал або окисел | $\Delta E_F^*$ , eV | Метал або окисел        | $\Delta E_E^*$ , eV |
|------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Al               | 4,20                | Ni                      | 4,91                |
| Ba               | 2,52                | Pt                      | 5,36                |
| Pb               | 4,04                | Ag                      | 4,70                |
| Fe               | 4,63                | W                       | 4,54                |
| Au               | 4,71                | Cs                      | 1,94                |
| Cd               | 4,04                | Zn                      | 4,27                |
| Ca               | 3,20                | Sn                      | 4,39                |
| Co               | 4,25                | BaO з P, Ni             | 1,0                 |
| Cu               | 4,48                | Ba з W, WO <sub>3</sub> | 0,30                |
| Mg               | 3,70                | Th з W                  | 2,63                |
| Mo               | 4,24                | Cs з W, WO <sub>3</sub> | 0,001               |

\* $\Delta E_E$  – робота виходу.

*Питомий електроопір  $\rho$ .* Включає дві незалежні складові: фононну частину (із зростанням температури посилюються теплові коливання) і частина, що обумовлена дефектами решітки (ця складова опору не залежить від температури), тому оцінку дефектів решітки можна проводити за допомогою вимірювання залишкового опору.

*Правило Маттісена.* За допомогою цього правила визначається загальний питомий електроопір (фононна + решіткова складова) металу з дефектами решітки:  $\rho = \rho_{\text{фон}} + \rho_{\text{мат}}$ , де  $\rho_{\text{мат}}$  – складова, що характеризує матеріал і залежить від його кристалічної та електронної структури.

Внаслідок магнітного ефекту в феромагнітних металах спостерігаються відхилення від цього правила.

*Теплопровідність* – це один з видів передачі теплової енергії в твердому тілі, що призводить до вирівнювання температур. Основний закон теплопровідності:

$$dQ / dt = \lambda A (dT / dx), \quad (1)$$

де  $dT/dx$  – градієнт температур;  $A$  – поверхня;  $t$  – час;  $\lambda$  – питома теплопровідність в  $\text{кал} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$  або  $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$ .

Теплопровідність в твердих тілах залежить від складу, виду зв'язку і структури.

Питома теплопровідність деяких матеріалів (20 °C) наведена нижче,  $\text{кал} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$ :

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Ag .....              | 1                   |
| Cu .....              | 0,95                |
| Al .....              | 0,57                |
| Fe.....               | 0,18                |
| Сталь типу 18-8 ..... | $3,9 \cdot 10^{-2}$ |
| Кварцове скло .....   | $5 \cdot 10^{-3}$   |
| Поліхлорвініл .....   | $3,8 \cdot 10^{-4}$ |

*Коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення* характеризують здатність матеріалу розширюватися при нагріванні. Цю властивість важливо враховувати при будівництві мостів, прокладання залізничних і трамвайних колій і т.д.

### ***Сталі й сплави з особливими фізичними властивостями***

#### *Сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення*

Сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення широко застосовую в машинобудуванні та приладобудуванні. Найбільш поширений сплав Fe – Ni, у якого коефіцієнт лінійного розширення при температурах від – 100 до 100 °C зі збільшення вмісту нікелю до 36 % різко зменшується, а при більш низькому вмісті нікелю знову зростає. При температурі 600 – 700 °C такого явища не спостерігається і коефіцієнт лінійного розширення залежно від складу змінюється плавно, що пояснюється переходом сплавів в парамагнітний стан. Таким чином, низьке значення температурного коефіцієнта пов'язане з впливом феромагнітних ефектів. Такий сплав широко використовується в техніці, де необхідна постійність розмірів у широкому інтервалі температур.

#### *Сплави з ефектом пам'яті форми*

При напруженні вище межі пружності після зняття навантаження метал не відтворює первинні розміри і форму. Порівняно недавно були відкриті сплави, що володіють ефектом "пам'яті форми". Ці сплави після пластичної деформації відновлюють свою первісну геометричну форму або в результаті нагрівання (ефект «пам'яті форми») або безпосередньо після зняття навантажень (надпружні). Так якщо дріт закрутити в спіраль при високій температурі і вирівняти при низькій температурі, то при повторному нагріванні дріт знову мимовільно закручується в спіраль.

Термопружне мартенситне перетворення (ефект Курдюмова) супроводжується зміною об'єму, яке носить зворотний характер, забезпечуючи пам'ять. У сплавах з ефектом «пам'яті форми» при охолодженні відбувається зростання термопружних кристалів мартенситу, а при нагріванні їх зменшення або зникнення. Ефект «пам'яті форми» найбільш добре проявляється коли

мартенситне перетворення відбувається при низьких температурах і у вузькому інтервалі температур, іноді порядку декількох градусів.

В даний час відома велика кількість подвійних і більш складних сплавів володіють різною мірою ефектом «пам'яті форми»: Ni – Al, Ni – Co, Ni – Ti, Ti – Nb, Fe – Ni, Cu – Al, Cu – Al – Ni та інші. Найбільш широко застосовують сплав на основі мононікелідатитану, NiTi, що отримав назву нитинол. Ефект "пам'яті форми" у поєднанні NiTi може повторюватися протягом багатьох тисяч циклів. Нитинол має високу міцність, пластичність, корозійну і кавітаційну стійкість. Він широко використовується для виготовлення деталей машин та обчислювальної техніки, в температурночутливих датчиках.