

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ»

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ  
З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
І МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ УСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

Затверджено на засіданні  
кафедри матеріалознавства  
Протокол № 11 від 17.06.2015 р.

Дніпро ДВНЗ УДХТУ 2016

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» для студентів усіх форм навчання / Укл.: Трофименко В.В., Овчаренко В.І. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 40 с.

Укладачі: В.В. Трофименко, канд. техн. наук  
В.І. Овчаренко, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О.Б. Гірін, д-р техн. наук

#### Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» для студентів усіх форм навчання

Укладачі: ТРОФИМЕНКО Віталій Васильович  
ОВЧАРЕНКО Володимир Іванович

Технічний редактор В.П. Синицька  
Комп'ютерна верстка В.П. Синицька

Підписано до друку 06.12.16. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір ксерокс. Друк різнограф.  
Умов. друк. арк. 1,82. Обл.-вид. арк. 1,87. Тираж 100 прим. Зам. № 230.  
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015

---

ДВНЗ УДХТУ, просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005

Редакційно-видавничий відділ

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Загальні принципи вибору матеріалів для деталей машин.....	5
1.1 Технологія виготовлення та матеріаломісткість деталей.....	6
1.2 Механічні властивості матеріалів, надійність і довговічність виробів.....	7
1.3 Економічні аспекти вибору матеріалів.....	8
1.4 Заходи з охорони довкілля й утилізації відходів.....	10
2 Класифікація деталей машин за умовами експлуатації та вибір матеріалів..	11
2.1 Матеріали деталей, що зазнають тертя.....	11
2.1.1 Сталі для виробів, що піддають поверхневому гартуванню.....	12
2.1.2 Сталі для деталей, що цементують та нітроцементують.....	13
2.1.3 Сталі для виробів, що азотують.....	14
2.2 Матеріали деталей, що не працюють в умовах тертя.....	15
2.2.1 Сталі для пружних елементів.....	15
2.2.2 Сталі для відповідальних важконавантажених виробів, що працюють в складнонапруженому стані.....	15
3 Попередня обробка заготовок.....	17
4 Завдання щодо вибору і використанню матеріалів і режимів термічної обробки деталей машин для конкретних умов експлуатації.....	17
4.1 Завдання щодо вибору конструкційних матеріалів загального призначення.....	17
4.2 Завдання щодо вибору інструментальних матеріалів.....	22
4.3 Завдання щодо вибору кольорових металів і сплавів.....	25
5 Приклад вибору матеріалу та призначення термічної обробки деталі.....	27
Список літератури.....	36
Додаток А.....	39
Додаток Б.....	40

## ВСТУП

Один з важливих методів вивчення дисциплін – самостійна робота студента над навчальним матеріалом, що сприяє розвитку логічного мислення та уміння працювати з технічною літературою.

Дисципліна «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» повинна не тільки дати теоретичні знання про основні закономірності, які визначають будову та властивості металевих сплавів і неметалевих матеріалів, а також навчити самостійно користуватися довідковою технічною літературою, INTERNET-ресурсом.

Тому головна мета завдання для самостійної роботи – навчити майбутніх фахівців галузі хімічного та харчового машинобудування обґрунтовано обирати матеріал для деталей машин і конструкцій хімічного апаратобудування залежно від умов їх роботи.

Для обґрунтованого вибору матеріалу студенти користуються створеним на кафедрі банком даних з конструкційних матеріалів. Щоб вибрати оптимальний варіант студенту треба мати знання факторів, що зумовлюють надійність та довговічність виробів, роль матеріалу в їх забезпеченні, кристалічну будову реальних матеріалів, види дефектів та їх вплив на властивості матеріалів, критерії оцінювання конструкційної міцності, процеси формування структури металів, сталей, чавунів, чорних і кольорових сплавів, теоретичні основи легування, технології об'ємної та поверхневої термічної обробки матеріалів. Особлива увага приділяється взаємодії структури та властивостей. Що дозволяє вірно обрати матеріал і призначити термічну або хіміко-термічну обробку для поліпшення властивостей деталі, зазначеної у завданні.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Вибір матеріалу є дуже відповідальним завданням, яке часто зумовлює надійність та довговічність виробу і конструкції в цілому. Наслідком неправильного вибору матеріалу та невірно призначеної обробки є незадовільна якість машин, приладів, обладнання.

Обраний матеріал повинен забезпечувати необхідну конструкційну міцність, мати оптимальні технологічні властивості, а також бути якнайдешевшим, недефіцитним і екологічно чистим.

Існує взаємозв'язок і взаємообумовленість конструкції виробу, матеріалу і технології його виготовлення.

Проектування кожної деталі, вузла, машини проходить через три однаково важливі й залежні між собою стадії:

- конструювання;
- вибір матеріалу;
- розробка технології виготовлення.

Щоб гарантувати високу конкурентоспроможність виробу, необхідно дотримуватися головного принципу: *якнайвища функціональна якість за якнайменшою вартістю*.

На першому етапі проектування, згідно з вимогами до конструкції, її маси та умовами експлуатації, має бути вибраний клас матеріалу, з якого виготовлятимуть виріб. Оскільки одним з головних показників міцності є тимчасовий опір, за цією ознакою найпоширеніші промислові сплави поділяють на три класи (табл. 1).

З таблиці видно, що міцність сплавів різних класів може бути однаковою. Тому для вибору того чи іншого класу необхідно враховувати в першу чергу умови експлуатації. Наприклад, як бажаний матеріал для виготовлення корпусу глибоководного батискафа можна розглядати один з титанових сплавів, які поєднують високі значення питомої міцності й корозійної стійкості у морській воді. При тому ж рівні міцності використання сталі в даному разі не забезпечить потрібної довговічності.

Таблиця 1

Класифікація сплавів за міцністю

Клас сплаву	$\sigma_B$ , МПа		
	сплави на основі заліза	сплави на основі алюмінію	сплави на основі титану
Низької міцності	650	200	400
Середньої міцності	650 – 1300	200 – 400	400 – 800
Високої міцності	> 1300	>400	>800

Наступним етапом є вибір конкретного матеріалу з цього класу сплавів на підставі сертифікованих властивостей, які гарантує фірма-виробник відповідно до державних стандартів (з урахуванням можливих способів поліпшення властивостей для одержання високої конструкційної міцності).

Умови роботи деталей можуть бути різноманітними: статичні, циклічні, динамічні навантаження, деформації розтяганням, стисканням, згинанням, скручуванням, низькі або високі температури, агресивні хімічні середовища, особливості тертя, наприклад, у вакуумі тощо. Проаналізувавши діючі фактори, визначають вимоги до властивостей матеріалу і ранжирують їх за ступенем впливу на надійність машини або механізму. У багатьох випадках деталі працюють в режимі одночасної дії декількох факторів. В такому разі вимоги поділяють на *визначальні* і *менш визначальні* (другорядні).

*Визначальними*, тобто такими, що зумовлюють надійність і довговічність, можуть бути різні властивості. Наприклад, при виборі матеріалу для деталі, яка працює при нормальних температурах, показники жароміцності, жаростійкості не мають значення, і навпаки, вони стають головними для виробів, що працюють при високих температурах. *Визначальні* вимоги мають бути враховані обов'язково, *другорядні* – по можливості.

При серійному та масовому виробництві деталей слід звертати увагу на технологічність матеріалу та економічні показники.

Оптимальний вибір матеріалу деталі здійснюється за такими взаємопов'язаними і взаємозалежними критеріями:

- геометричні параметри;
- матеріаломісткість;
- механічні та технологічні властивості матеріалу;
- надійність та довговічність виробу;
- вартість і доступність матеріалу;
- охорона довкілля;
- утилізація відходів.

## **1.1 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА МАТЕРІАЛОМІСТКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ**

Геометричні параметри – фактор, який в першу чергу зумовлює технологію виготовлення виробу, що впливає на вибір конкретного матеріалу. Технологічні властивості металу мають забезпечити найкращу якість продукції при найменших витратах. Матеріал вважається технологічним, якщо він піддається обробці обраним способом без будь-яких обмежень, спеціальних технологічних засобів, при забезпеченні маловідходної технології та можливості механізації та автоматизації процесу виготовлення виробу.

Деталі складної форми часто одержують литтям. В такому разі з класу сплавів, який задовольняє вимогам за міцністю, вибирають такий, що має добрі ливарні властивості (високу рідкотекучість, незначну схильність до ліквіації, усадки, газопоглинання). Наприклад, неможливо виготовити литтям якісний тонкостінний виріб зі сплаву з низькою рідкотекучістю.

Якщо виріб отримують гарячою чи холодною пластичною деформацією, головною технологічною властивістю металу є здатність до деформування. Слід враховувати, що для холодного деформування придатні маловуглецеві сталі, які мають невисокі показники міцності, але високу пластичність. Однак внаслідок наклепу, що виникає під час такої обробки, пластичність різко

знижується. Тому при необхідності отримання високого ступеня деформації операцію деформування необхідно чергувати з проміжними рекристалізаційними відпалами.

При використанні зварювання враховується можливість окрихчення в зоні термічного відпалу і, як наслідок, виникнення тріщин. Тому, обираючи матеріал, слід звернути увагу на зварюваність, яка погіршується з підвищенням кількості вуглецю і легувальних елементів. Зазвичай рекомендується вибирати сталь з вмістом вуглецю не вищим за 0,25%.

Більшість виробів піддають механічній обробці. У такому разі важливе значення має оброблюваність різанням. Цей показник значною мірою залежить від твердості оброблюваного матеріалу. При ускладненій оброблюваності використовують додаткову термічну обробку для зниження твердості.

Залежно від розмірів визначають і легованість сталей з урахуванням прогартовуваності.

Матеріаломісткість деталі зумовлює не лише первинну вартість матеріалу, а й рентабельність подальшої експлуатації виробу (наприклад, зменшення витрат пального через зниження маси автомобіля).

Сьогодні зменшення матеріаломісткості виробів є одним з найважливіших завдань машинобудування. Тому врахування питомої міцності при виборі того чи іншого сплаву є обов'язковим.

## **1.2 МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ, НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ВИРОБІВ**

Основою вибору матеріалів для створення надійної та працездатної техніки є їх механічні властивості, які характеризують здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню під дією різних видів навантажень, середовищ і температур. До них належать характеристики міцності (тимчасовий опір  $\sigma_b$ , межа текучості  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), межа витривалості  $\sigma_{-1}$ , пластичність (відносне подовження  $\delta$ , відносне звуження  $\psi$ ), твердість, ударна в'язкість, поріг холодноламкості  $t_{кр}$ .

Пластичність та в'язкість не входять в конструкторські розрахунки, однак їх значення для надійності металу і виготовленої з нього конструкції дуже велике. Пластичність характеризує здатність металу до перерозподілу напружень в зоні їх концентрації (піків). Пластична деформація в цих місцях запобігає утворенню різких локальних перенавантажень. У машинобудуванні пластичність конструкційної сталі вважають задовільною, якщо  $\delta \geq 15\%$ .

Слід мати на увазі, що для різних матеріалів співвідношення між пластичністю і в'язкістю може сильно відрізнятись. Наприклад, алюміній має низьку в'язкість при високій пластичності (відносному подовженні  $\delta$ ). Сталь же після покращення характеризується порівняно невеликим відносним подовженням при високому рівні ударної в'язкості.

Для отримання необхідної довговічності дуже важливу роль відіграє стабільність властивостей матеріалу під час роботи. Проблема полягає в тому, що під впливом температури, корозійного середовища, деформаційного

старіння, зміни напруженого стану властивості матеріалу можуть змінюватися, що погіршує умови роботи окремих деталей. Наприклад, внаслідок перерозподілу напружень такі деталі як циліндри автомобільних двигунів, пари тертя вал-підшипник ковзання набувають овальної форми, що зменшує термін їх експлуатації.

Як відомо, довговічність деталі також залежить від технологічних чинників. Наприклад, збільшення точності обробки шийок колінчастого вала з 10 до 6 мкм підвищує термін роботи вкладишів підшипників ковзання в 3–4 рази.

Для виробів, що працюють у режимі циклічного навантаження, на довговічність великою мірою впливає стан поверхні.

Поширеним критерієм працездатності металевих сплавів і зварних з'єднань, особливо у випадку їх експлуатації при низьких температурах, є ударна в'язкість, визначена на зразках з надрізом. У різних країнах прийнятий різний гарантований рівень ударної в'язкості: у країнах СНД це  $KCU \geq 25$  Дж/см<sup>2</sup>, в інших країнах –  $KCV \geq 30$  Дж/см<sup>2</sup>. Температура, при якій гарантується заданий рівень ударної в'язкості, позначається індексом поруч з її показником, наприклад,  $KCV_{-60} = 50$  Дж/см<sup>2</sup>.

Для сталевих виробів з вимогами до значення границі текучості не вище 350 МПа вибирають відповідну марку сталі звичайної якості (ДСТУ 2651-94). При вищому допустимому рівні  $\sigma_{0,2}$ , залежно від необхідних властивостей, розмірів перерізу та складності конфігурації виробу, для вибору марки сталі слід користуватися стандартами, які регламентують властивості після різних видів термічної обробки.

Для виробів з перерізом більше 30 мм<sup>2</sup> вибір марки сталі здійснюється з урахуванням прогартовуваності. При цьому слід мати на увазі, що для деталей складної форми навіть при невеликому перерізі не слід використовувати вуглецеву сталь, оскільки її необхідно гартувати у воді, а це може призвести до виникнення значних внутрішніх напружень і спричинити неприпустимі деформації або утворення тріщин.

Великі вироби складної форми рекомендується виготовляти з легованих сталей не тільки через їх вищу прогартовуваність, а також тому, що такі сталі повільніше знеміцнюються при відпуску. Це дозволяє підвищити його температуру та істотніше знизити внутрішні напруження при збереженні необхідного рівня міцності.

### **1.3 ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ**

Вартість матеріалу залежить від доступності його сировини (величини та локалізації рудних родовищ, обсягу розвіданих сировинних запасів), енергетичних та матеріальних затрат на її видобуток і переробку в матеріал. Економісти вважають, що поріг економічної доцільності використання сировини визначається часом половинного вичерпання її запасів. Після цього настає різке зростання цін на дану сировину, що зменшує доцільність її використання. Оцінюється, що до часу половинного вичерпання родовищ Zn,

Pb, Hg, Ni, W, Ag залишається від 40 до 70 років, родовищ Al, Fe та більшості сировини для виробництва кераміки, скла – кілька сотень років.

Вміст різних матеріалів у земній корі сильно відрізняється. Масова частка алюмінію складає ~ 9 %, заліза – 4,5 %, магнію – 2,5 %, титану 0,6 %, марганцю – 0,1 %, міді – 0,01 %, нікелю – 0,008 %. До того ж якщо в залізних рудах вміст Fe дорівнює 30–70 %, то для кольорових металів цей показник знижується до 5 %, а в деяких випадках до тисячних відсотка (наприклад, для Mo до 0,008 %).

Різними є й енергетичні витрати на отримання металів із руд. В більшості випадків для кольорових металів та сплавів на їх основі вони вищі, ніж для сталей і чавунів. Тому леговані сталі дорожчі за вуглецеві.

З урахуванням перелічених факторів легувальні елементи можна розташувати в такий ряд у порядку *підвищення вартості та дефіцитності*:

### **Mn, Si, Cr, Ti, Ni, Nb, Mo, V, Co, W.**

Обрана марка сталі має містити найменшу кількість дорогих і дефіцитних елементів. Тому високолеговані сталі слід використовувати тільки для забезпечення спеціальних властивостей (корозійної стійкості, жаростійкості, жароміцності).

Важливе значення має також *доступність* матеріалу, тобто можливість придбати швидко і близько від місця використання якісний, стандартизований і сертифікований матеріал.

При визначенні способу виготовлення виробу мало відходність є одним з важливіших показників економічності та рентабельності. В табл. 2 наведені дані про *коефіцієнт використання матеріалу (КВМ)* та *енерговитрати* на 1 кг продукції для різних методів виготовлення виробів.

Таблиця 2

Витрати матеріалу та енергоємність при виготовленні виробів різними методами

Метод виготовлення	КВМ, %	Енерговитрати, МДж/кг
Порошкова металургія	95	29
Точне лиття	90	30–38
Холодне штампування	85	41
Гаряче штампування	75–80	46–49
Обробка різанням	40–50	66–82

Як видно з цієї таблиці, найбільш витратною є обробка різанням. Тому технологія виготовлення виробу має бути розроблена таким чином, щоб обсяг цієї обробки був мінімальним.

## 1.4 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ Й УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ

При виборі матеріалу виробу необхідно дотримуватися вимог безпеки життєдіяльності та охорони довкілля, які зафіксовані законодавчо у вигляді державних стандартів і технічних умов. Мають використовуватися такі матеріали й технологічні процеси, які шкідливо не впливають на довкілля та здоров'я людини. З цієї причини застосування ртуті, берилію, свинцю, радіоактивних елементів потребує спеціального захисту. Слід замінювати ціанування в токсичних розплавах ціанистих солей нітроцементациєю чи іншою хіміко-термічною обробкою. При цьому токсичні реактиви, сполуки, матеріали не можна викидати у ґрунт, каналізацію, атмосферу. Необхідно здійснювати їх безпечне знищення або вторинне використання (утилізацію).

Щодо матеріалів деталей, які відпрацювали свій ресурс, доцільно передбачити їх вторинне використання або самознищення за рахунок біологічного розкладу з мінімальною екологічною шкодою. Схильність матеріалу до біологічного розкладу визначається його взаємодією з довкіллям (дія температури, сонячного світла, мікроорганізмів, природних хімічних реагентів).

Вторинне використання відпрацьованих матеріалів має переваги перед їх знищенням. По-перше, воно зменшує використання природних сировинних ресурсів, які не відновлюються, і запобігає екологічній шкоді, що завдає технологія виробництва матеріалу. По-друге, енергетичні втрати на відновлення вторинних матеріалів і виготовлення з них виробів є суттєво меншими, ніж на їх первинне використання. Наприклад, для добування алюмінію з руд необхідно майже у 30 разів більше енергії, ніж для його вторинної переробки.

Коротко розглянемо можливості *вторинного використання різних матеріалів*.

**Метали.** Вторинна переробка більшості металів та їх сплавів реалізується двома способами: шляхом відновлення функцій відпрацьованої деталі або їх вторинним використанням. За першим способом конструкція виробу повинна передбачати демонтаж деталей для повторного відновлення. У сучасному виробництві широко застосовують різні методи ремонту колінчастих та розподільних валів, корпусних деталей (коробки передач, переднього та заднього мостів машин), блока та головки блока циліндрів, деталей муфт зчеплення тощо. Для реставрації фрикційних поверхонь дисків зчеплення, гальмівних барабанів застосовується електродугове напилення.

Другий спосіб передбачає повторне використання сплавів у вигляді лігатур, металобрухту в металургійному виробництві, видобуток окремих дорогих елементів зі сплаву. Цей вид вторинної переробки застосовують для алюмінієвих сплавів, оскільки вторинні сплави значно дешевші, ніж первинні.

**Пластмаси.** Однією з причин значної популярності полімерів як конструкційних матеріалів є їх хімічна й біологічна інертність. Проте, саме ці властивості роблять їх нездатними до біологічного розкладу. Тому вони становлять значну частину відходів сучасного виробництва. Деякі полімери

горять, не виділяючи токсичних і забруднювальних речовин, тому їх можна знищувати спалюванням.

Термопластичні полімери придатні до вторинної переробки, оскільки їх можна повторно формувати у виробі під час нагрівання. Вторинна пластмаса дешевша за первинну, проте її якість та вигляд погіршуються з кожним циклом переробки. З неї виготовляють невідповідальні деталі: піддони, ручки інструментів тощо.

Вторинна переробка *терморективних* полімерів практично неможлива. Вони повторно використовуються як наповнювачі пластмас.

Існують проблеми зі знищенням чи вторинною переробкою гумових матеріалів. Різні наповнювачі та вулканізація ускладнюють їх утилізацію. Найголовнішим джерелом гумових відходів є автомобільні шини. Вторинне використання автомобільних шин можливе після переробки в автомобільні бампери, брызговики, пальці муфт тощо.

**Композиційні матеріали.** Особливості вторинної переробки композиційних матеріалів зумовлені багатокомпонентністю, специфічним взаємним розташуванням компонентів, що ускладнює їх відокремлення.

Як правило, розв'язання будь-яких екологічних проблем, поєднаних з виробництвом матеріалу, впливає на ціну виробу. Вартість екологічно чистого виробу зазвичай вища за вартість продукту, що не відповідає екологічним вимогам.

## **2 КЛАСИФІКАЦІЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЗА УМОВАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИБІР МАТЕРІАЛІВ**

Виходячи з умов експлуатації (без урахування специфічних особливостей, пов'язаних з температурою, середовищем тощо), всі деталі машин принципово можна поділити на дві великі групи:

- ті, що в процесі роботи зазнають тертя;
- ті, що не працюють в умовах тертя.

Оскільки на сьогодні переважну кількість матеріалів у загальному машинобудуванні складають сталі, ми обмежимося тільки їх розглядом.

### **2.1 МАТЕРІАЛИ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ЗАЗНАЮТЬ ТЕРТЯ**

Прикладом деталей цієї групи є шестірні, різні вали, шкворні, пальці та ін. Для них вирішальним фактором, який зумовлює довговічність, є висока зносостійкість, що великою мірою залежить від твердості поверхні. Серцевина виробу для забезпечення високої конструкційної міцності вимагає значно меншої твердості, але вищих показників пластичності та в'язкості. Таким чином, у деталях, що працюють в умовах тертя, необхідно забезпечити різні властивості поверхні і серцевини.

Підвищення твердості поверхні може бути досягнуто поверхневим гартуванням або хіміко-термічною обробкою (цементациєю, нітроцементациєю, азотуванням). Вид поверхневої обробки вибирають залежно від призначення

деталі, її навантаженості, необхідного рівня твердості поверхні, температури, середовища, в якому працює виріб, а все це в свою чергу зумовлює вибір конкретної марки матеріалу.

Найвищу твердість (1000–1100 HV) забезпечує азотування. В цементованих та нітроцементованих деталях після гартування з низьким відпуском можна отримати твердість поверхні 58-62 HRC. Якщо виріб піддають поверхневою гартуванню, твердість поверхні, як правило, дещо нижча і, що головне, має більший розкид значень (46-56 HRC), хоча при досконалій технології твердість і в цьому разі може бути в межах 56-62 HRC.

При виборі матеріалу поверхнево зміцнюваних деталей дуже важливе значення має загальний рівень навантажень та їх характер, що зумовлює вимоги до властивостей серцевини виробу.

Для деталей, які працюють у важких умовах і підлягають дії ударних і циклічних навантажень, необхідно забезпечити високі показники міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), втомної міцності ( $\sigma_{-1}$ ), пластичності ( $\delta$ ,  $\psi$ ), ударної в'язкості КС, тріщиностійкості ( $G_{1C}$ ,  $K_{1C}$ ,  $K_{Cp}$ ). Такий комплекс властивостей по всьому перерізу деталі може бути досягнутий при наскрізному прогартуванні. В цьому разі марку сталі вибирають з урахуванням критичного діаметра сталі, який має бути не меншим за товщину (діаметр) виробу.

Оскільки критичний діаметр залежить, головним чином, від вмісту легувальних елементів (при охолодженні в однаковому середовищі), то чим більший переріз деталі, тим більш легувану сталь слід вибирати для її виготовлення.

### **2.1.1 Сталі для виробів, що піддають поверхневою гартуванню**

Вибір товщини зміцненого шару зумовлюється експлуатаційними вимогами до деталі. Якщо деталь працює лише в умовах зношування, товщину загартованого шару зазвичай приймають ~1,5–3 мм. В тому ж разі, коли виріб зазнає високих контактних навантажень чи передбачається можливість його перешліфування, загартований шар збільшують до 5 мм, а при особливо великих контактних навантаженнях, наприклад, для валків холодного прокатування – до 10–12 мм.

Площа перерізу загартованого шару має не перевищувати 20 % усього перерізу деталі. Для зубчастих коліс глибина загартованого шару має становити 0,2–0,28 від їх модуля.

Конкретну марку сталі і режим обробки виробу перед поверхневим гартуванням вибирають залежно від вимог до властивостей його поверхні та серцевини. Якщо для деталі необхідна тільки висока твердість поверхні (вироби, для яких вирішальне значення має саме зносостійкість), прогартуваність не є вирішальною вимогою. В цьому разі для деталей призначають вуглецеві або низьколеговані сталі (40, 45, 40Г2, 40Х, 45Х, 40ХН, 40ХС). Перед поверхневим гартуванням ці сталі, як правило, піддають нормалізації. Такого ж типу сталі і таку ж попередню обробку використовують і для об'ємно-поверхневого гартування виробів.

Якщо деталь, крім тертя, піддається дії циклічних та ударних навантажень, то її серцевина повинна мати високий комплекс властивостей, що може бути досягнуто покращенням. Для таких виробів прогартуваність набуває вирішального значення, і марка сталі вибирається за умови забезпечення наскрізної прогартуваності. Вироби спочатку проходять об'ємну термічну обробку – гартування з високим відпуском. Після цього ділянки, що працюють в умовах тертя, для отримання високої зносостійкості піддають поверхневому гартуванню з наступним низьким відпуском (самовідпуском).

Дані, які дозволяють вибрати необхідні технологічні параметри індукційного нагрівання для виробів різного перерізу, наведені в табл. А1 (додаток А).

Слід підкреслити, що поверхнєве гартування приводить до виникнення напружень стиску, які позитивно впливають на експлуатаційні властивості, зокрема, на втомну міцність. Але в місцях, де закінчується поверхневий загартований шар (наприклад, вихід кінця загартованої зони на щоку при гартуванні шийки колінчастого вала), утворюються напруження розтягу, які можуть призвести до виникнення тріщин. Для зменшення негативного впливу цих напружень рекомендується здійснювати поверхневу пластичну деформацію (ППД) галтелей загартованих шийок обкочуванням роликками. Така обробка сприяє підвищенню границі витривалості.

### **2.1.2 Сталі для деталей, що цементують та нітроцементують**

Як вже відзначалося, сталі, які цементують або нітроцементують, залежно від прогартуваності, а отже, від зміцнюваності серцевини, поділяються на три групи: з *незміцнюваною, слабкозміцнюваною та сильнозміцнюваною серцевиною*. До першої належать нелеговані сталі, до другої – сталі з кількістю легувальних елементів ~1 %, до третьої – з вмістом легувальних елементів 2 % та більше. Властивості, які можуть бути отримані в цих сталях після стандартного режиму обробки (цементация, гартування, низький відпуск), наведені в табл. Б1 (додаток Б).

З економічних міркувань для малонавантажених деталей вибирають вуглецеві сталі з *незміцнюваною серцевиною або низьколеговані сталі* (~1% легувального елемента) зі *слабкозміцнюваною серцевиною* (сталі першої або другої груп). При цьому слід мати на увазі, що вибір сталі другої групи дозволяє здійснювати гартування в маслі, внаслідок чого зменшується можливість короблення. Тому на практиці для таких виробів як шестірні, навіть якщо вони незначно навантажені, використовують леговані сталі другої групи.

Сталі третьої групи із сильно зміцнюваною серцевиною (більше 2 % легувальних елементів) використовують тільки для важконавантажених виробів. Нагадаємо, що в цих сталях завдяки малому вмісту вуглецю мартенсит відпуску, який формується в серцевині деталі після наскрізного прогартування і низького відпуску, поєднує високу міцність і достатню пластичність, що й забезпечує опір серцевини крихкому руйнуванню.

Сталі цієї групи, особливо такі як 25ХГТ, 25ХГМ, часто піддають нітроцементациї, яка має деякі переваги перед цементациєю.

### 2.1.3 СТАЛІ ДЛЯ ВИРОБІВ, ЩО АЗОТУЮТЬ

Особливістю сталей після азотування є збереження високої твердості до температур 500-550°C. До того ж азотування захищає виріб від корозії. Тому цей вид поверхневої обробки використовують для виробів, які працюють при підвищеній температурі, в агресивних середовищах (наприклад, вставки гільз циліндрів, плунжери, деталі насосів), або для важконавантажених деталей, від яких вимагається висока контактна міцність.

Перед азотуванням виріб піддають покращенню для забезпечення високого комплексу властивостей серцевини. Оскільки структура сорбіту відпуску, одержана після покращення, добре оброблюється різанням, це дозволяє виконати перед азотуванням практично повністю всі операції механічної обробки (після азотування здійснюють лише тонке шліфування на глибину 0,05–0,1 мм).

Режим азотування вибирають, враховуючи товщину шару, яку необхідно отримати для забезпечення потрібних властивостей за даних умов експлуатації, та вплив температури азотування на швидкість процесу (рис. 1,а) і твердість азотованого шару (рис. 1,б).

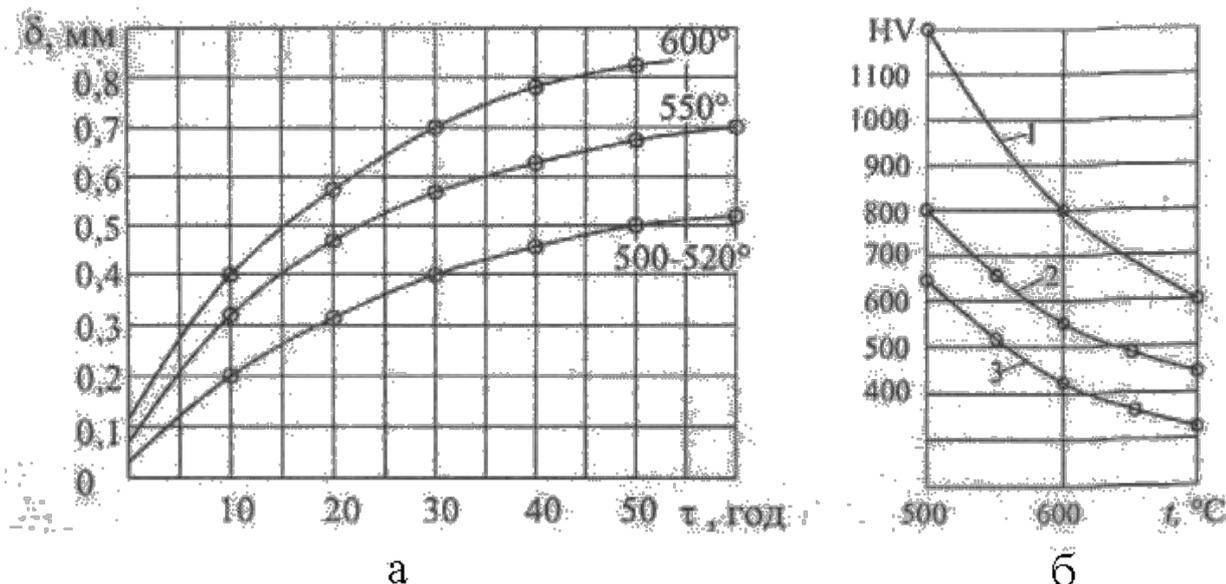


Рис. 1. Залежність товщини азотованого шару сталі 38Х2МЮА (а) та його твердості (б) від температури азотування сталей:  
1 – 38Х2МЮА; 2 – 40Х; 3 – 18Х2Н4ВА

Азотування є завершальною операцією. Відсутність гартування після азотування виключає можливість короблення і дозволяє використовувати цей вид ХТО для деталей складної конфігурації з високими вимогами до точності їх форми і розмірів.

Азотування, як і цементация та нітроцементация, супроводжується виникненням напружень стиску, що підвищує втомну міцність.

## 2.2 МАТЕРІАЛИ ДЕТАЛЕЙ, ЩО НЕ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ТЕРТЯ

Як правило, такі деталі повинні мати однакові властивості поверхні та серцевини. Залежно від умов експлуатації їх можна поділити на пружні елементи та важконавантажені вироби, що працюють під дією високих напружень, в тому числі циклічних, ударних. Вимоги до властивостей матеріалу цих двох груп виробів відрізняються.

Основними вимогами до матеріалів пружних елементів, які працюють при циклічних навантаженнях, зазнаючи великих пружних деформацій, є:

- висока границя текучості ( $\sigma_B/\sigma_{0,2} \rightarrow 1$ ) при певному рівні ударної в'язкості для виключення можливості крихкого руйнування;

- висока границя витривалості ( $\sigma_{-1}$ );

До матеріалів другої групи виробів (шатуни, осі, корпусні деталі тощо) вимоги такі:

- високі показники міцності ( $\sigma_B, \sigma_{0,2}$ );

- висока втомна міцність ( $\sigma_{-1}$ );

- високі пластичність ( $\delta, \psi$ ) і ударна в'язкість (КС);

- високі показники тріщиностійкості ( $G_{1C}, K_{1C}, K_{IC}$ ).

Якщо деталі обох груп працюють при низьких температурах, до цих вимог додається низький поріг холодноламкості  $t_{кр}$  та мінімальне допустиме значення ударної в'язкості. У такому разі сталь слід вибирати за умови, щоб  $t_{кр}$  була нижчою за температуру експлуатації виробу.

### 2.2.1 СТАЛІ ДЛЯ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для пружних елементів (ресори, пружини, торсіонні вали, мембрани) використовують вуглецеві та леговані сталі з вмістом вуглецю 0,5–0,7 % (інколи і вище) після гартування і середнього відпуску. Структура сталей після такої обробки – троостит відпуску (феритна основа та дрібні карбідні частинки зернистої форми, кількість яких зумовлюється вмістом вуглецю).

Оскільки від виробів цього типу перш за все вимагається висока межа текучості, більшість ресорно-пружинних сталей легують такими елементами як Mn та Si, які значно зміцнюють ферит. Кількість цих елементів не повинна перевищувати 2 %, щоб запобігти окрихченню сталей. Таке легування не тільки збільшує прогартуваність сталей та дозволяє гартувати вироби в маслі для зменшення гартівних напружень, але й підвищує межу текучості внаслідок зміцнення фериту.

### 2.2.2 СТАЛІ ДЛЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ВИРОБІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В СКЛАДНО-НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

Вироби цієї групи найчастіше виготовляють з середньо-вуглецевих легованих сталей (0,3–0,5% C) після покращення. Саме ця обробка, внаслідок якої формується сорбіт відпуску (феритно-карбідна суміш зернистої будови), забезпечує отримання необхідного комплексу властивостей – високих

показників міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), втомної міцності ( $\sigma_{-1}$ ), пластичності ( $\delta$ ,  $\psi$ ), ударної в'язкості (КС), тріщиностійкості ( $G_{1C}$ ,  $K_{1C}$ ,  $K_{Cp}$ ).

Для досягнення потрібних властивостей у таких виробках вирішальне значення має прогартовуваність. Розподіл твердості за перерізом деталі залежно від її діаметра характеризують U-подібні криві, які для сталей різних марок можна знайти у відповідних довідниках.

Зміна тимчасового опору залежно від перерізу деталі після покращення для сталей різної легуваності з близьким вмістом вуглецю (0,30–0,34 %), тобто від її прогартовуваності, наведена на рис. 2.

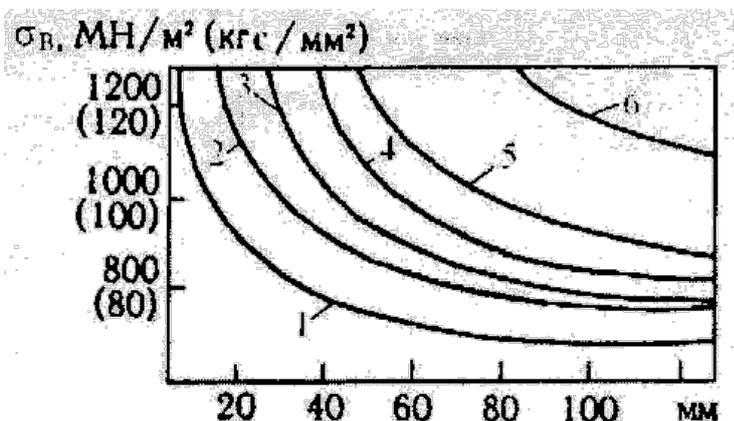


Рис 2. Залежність тимчасового опору від перерізу сталей марок:  
1 – 30; 2 – 30ХН3А; 35СГ; 3 – 33Н3; 4 – 33ХСА; 34ХМА;  
5 – 30ХН3А; 6 – 30ХН3М

З рисунка видно, що при наскрізній прогартовуваності у сталях різних марок, у тому числі й у вуглецевій (крива 1), тимчасовий опір може сягати значення  $\sigma_b > 1200$  МПа. Але через низьку прогартовуваність вуглецевої сталі такий високий тимчасовий опір можна досягти лише в малому перерізі (менше 10 мм). В легуваних сталях такий рівень  $\sigma_b$  можна отримати в значно більшому перерізі (наприклад, в сталі 30ХН3М в перерізі 90 мм).

Залежно від прогартовуваності покращувані сталі поділяють на п'ять груп. Приклади марок наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Критичний діаметр  $D_{кр}$  для сталей різного легування

Група	Приклади марок сталей	$D_{кр}$ , мм
I	40, 45	$\leq 10$
II	40X, 40XP	$\leq 20-25$
III	40XГР, 35XГС	$\leq 30-35$
IV	40XНМ, 40XГНР	$\leq 40-60$
V	38XН3МФ	$\geq 100$

З економічних міркувань слід вибрати найдешевшу сталь, яка при даному перерізі виробу забезпечує рівень міцності, зумовлений конструкторськими розрахунками.

### 3 ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА ЗАГОТОВОК

Як правило, заготовки після кування, штампування або інших операцій перед механічною і заключною зміцнювальною обробкою піддають попередній термічній обробці – відпалу або нормалізації. Мета такої обробки – поліпшити оброблюваність різанням, отримати рівноважну структуру, максимально зняти внутрішні напруження, що утворилися в процесі виготовлення виробу.

При призначенні попередньої обробки слід враховувати, що нормалізація дешевша і потребує менше часу. Тому в більшості випадків термічна обробка полягає в нормалізації. Якщо після нормалізації оброблюваність різанням утруднена, що може бути пов'язано з формуванням структури з вищою твердістю внаслідок більшої швидкості охолодження порівняно з відпалом, виконують високий відпуск, який знижує твердість і забезпечує поліпшення оброблюваності різанням.

Відпал слід використовувати для виробів складної конфігурації з легованих сталей, щоб запобігти утворенню структур з підвищеною твердістю і, головним чином, щоб повніше зняти напруження і одержати однорідну структуру. В тому разі, коли напруження зняті недостатньо повно, при наступному гартуванні підвищується ймовірність короблення виробів, особливо якщо вони мають складну форму або велике відношення діаметра до товщини. До таких виробів належать крупні гіпоїдні шестірні. Найкращим режимом попередньої термічної обробки цих виробів є ізотермічний відпал, який забезпечує найбільш однорідну структуру по перерізу виробу, оскільки розпад переохолодженого аустеніту здійснюється при постійній температурі.

Узагальнені дані про найпоширеніші марки сталей, їх використання та відносну вартість наведені в довідковій літературі.

## 4 ЗАВДАННЯ ЩОДО ВИБОРУ І ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ І РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДЛЯ КОНКРЕТНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### 4.1 ЗАВДАННЯ ЩОДО ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1. **Зубчаті колеса** залежно від умов їх роботи та виникаючих напружень можна виготовляти із сталі *звичайної якості, якісної вуглецевої та легованої* сталі з різним складом легуючих елементів.

Рекомендувати склад і марку сталі, режим термічної обробки, структуру та механічні властивості для зубчастих коліс в умовах підвищених напружень.

2. **Вибрати**, керуючись технічними та економічними міркуваннями, *сталь* для виробництва коліс діаметром 150 мм та висотою 30 мм з рівнем міцності не нижче 360–380 МПа. Указати термічну обробку коліс, механічні властивості і структуру обраної сталі у готовому виробі та для порівняння механічні властивості та структуру сталей 45 та 40ХН після поліпшення термічною обробкою.

3. **Вибрати сталь** для виготовлення валів діаметром 50 мм для двох редукторів. За розрахунками сталь для одного із валів повинна мати рівень текучості не нижче 350 МПа, для другого – не нижче 500 МПа.

Указати склад і марку обраних сталей, рекомендований режим обробки, структуру після кожної операції термічної обробки, механічні властивості у готовому виробі. Чи можна використовувати вуглецеву сталь *звичайної якості* для виготовлення валів заданих перерізу та міцності?

4. **Колінчасті вали** діаметром 80 мм, працюючі с підвищеним напруженням, виготовляють на одному заводі з *якісної вуглецевої сталі*, а на другому – ті ж вали, але діаметром 120 мм – з легованої сталі.

Які сталі слід використовувати для цієї мети? Вказати їх хімічний склад і марки. Рекомендувати режим гартування та відпуску, порівняти механічні властивості, які можуть забезпечити *вуглецева якісна* та *легована* сталі обраних марок для валів указаних діаметрів.

5. **Вибрати сталь** для виготовлення важконавантажених колінчастих валів діаметром 60 мм; рівень міцності повинен бути не нижче 750 МПа.

Рекомендувати склад і марку сталі, режим термічної обробки, структуру та механічні властивості після гартування та відпуску. Указати спосіб виготовлення заготовки колінчастого вала, який забезпечує кращі механічні властивості, та спосіб дослідження, який дозволяє виявити макробудову сталі.

6. **Кузов автомобіля** виготовляють холодною штамповкою з витяжкою сталевого листа.

Вибрати *марку сталі для листа*. Указати хімічний склад та особливості її виробництва, які забезпечують підвищену здатність до значної витяжки.

7. **Ведуча вісь** кранового візка діаметром 70 мм виготовлена зі сталі Ст 5. При конструкції крана з метою підвищення його вантажопідйомності конструктор не змінив діаметр ведучої осі, а замінив матеріал осі іншою сталлю з рівнем текучості в 1,5 разів більше.

Указати марку *вуглецевою та легованої* сталі, з якої можна виготовити вісь візка, рекомендувати режим термічної обробки та зіставити механічні властивості сталі обраних марок з аналогічними властивостями *сталі Ст 5*.

8. На заводі виготовляли **вали двигунів** внутрішнього згорання діаметром 60 мм зі сталі з межею текучості 200–230 МПа та відносним видовженням 20–22%. В подальшому було одержано замовлення на вали такого ж діаметру для більш потужних двигунів. Завод повинен гарантувати рівень текучості у валах одного типу не нижче 600 МПа та ударну в'язкість не нижче 600 кДж/м<sup>2</sup>; в валах іншого типу – не нижче 800 МПа та ударну в'язкість не нижче 800 кДж/м<sup>2</sup>.

Указати сталі, режими термічної обробки, структуру та механічні властивості після остаточної обробки. Визначити, як змінюється відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  у обраних сталей в наслідок виконання поліпшуючої термічної обробки.

9. Завод виготовляє два типи **зубчастих коліс** діаметром 60 мм та висотою 80 мм для роботи в однакових умовах. Рівень текучості повинен бути не нижче 540–550 МПа, але другий тип коліс відрізняється від першого більш складною формою зуба, тому шліфування їх після обробки, яка поліпшує їх міцність, не можливе.

**Вибрати сталь для зубчастих коліс** вказаних двох типів, навести склад і марку, враховуючи технологічні особливості термічної обробки і необхідність запобігти деформацію та утворенню тріщин при гартуванні. Пояснити вибір сталі, вказати механічні властивості у готовому виробі.

10. Верстатобудівельний завод виготовляє **шпинделі токарних верстатів**. Шпинделі працюють з великою швидкістю в умовах підвищеного зносу, тому твердість у поверхневому шарі повинна бути 58 і 62 HRC.

**Вибрати сталь для шпинделів** діаметрів 40–75 мм. Навести склад і марку обраної сталі, рекомендувати режим обробки, який забезпечує одержання заданої твердості у поверхневому шарі в умовах швидкісної термічної обробки. Указати структуру сталі в поверхневих шарах і серцевині шпинделя, механічні властивості серцевини після остаточної термічної обробки.

11. Заводу необхідно виготовити **шпинделі для токарних верстатів**, працюючих в умовах зносу, та для шліфувальних верстатів, які повинні забезпечити високу точність обробки. Тому деформація шпинделів шліфувальних верстатів під час остаточної термічної обробки повинна бути мінімальною, крім цього, шпинделі повинні мати підвищену зносостійкість.

Вибрати сталі для шпинделів обох типів, рекомендувати режим обробки. Указати структуру сталі та твердість поверхневого шару і серцевини після остаточної обробки.

12. **Станини верстатів** виготовляють литтям. Рівень міцності повинен бути 220–250 МПа.

Вибрати марку сплаву, придатного для виготовлення станини з неоднаковою товщиною в різних перерізах, вказати режим термічної обробки станини та структуру сплаву. Під час розв'язання задачі врахувати, що у литій деталі необхідно мати якнайменше напружень, а термічна обробка повинна попередити деформацію станини в процесі обробки та експлуатації верстата.

13. **Колінчастий вал** двигуна легкового автомобіля економічно виготовляти з чавуну, матеріалу, малочутливого також до надрізу та такого, що добре гасить вібрацію. Для цього використовують *чавун підвищеної якості*.

Вибрати клас і марку чавуну з рівнем міцності не нижче 400 МПа та відносним видовженням 2–3%. Указати структуру обраного чавуну та форму виділення графіту, пояснити, які зміни у цьому випадку треба внести в умови виплавки.

14. **Блоки циліндрів** двигуна трактора виготовляють з *чавуну* твердістю 170–241 НВ, підвищеною міцністю та зносостійкістю.

Вибрати марку *чавуну*, навести його структуру та механічні властивості, вказати, яким повинен бути його склад для того, щоб забезпечити одержання заданих властивостей чавуну. Які повинні бути вимоги до хімічного складу та структури чавуну, якщо циліндри нагріваються у роботі до 500–600°C?

15. **Палець шарніру** діаметром 30 мм працює на згин та зріз; він повинен мати високу зносостійкість на поверхні і високий опір крихкому та в'язкому руйнуванню у серцевині.

Вибрати *вуглецеву сталь*, навести її склад та марку, рекомендувати режими хіміко-термічної та термічної обробки. Указати структуру, механічні властивості серцевини та твердість на поверхні після остаточної обробки. Указати бажану товщину твердого поверхневого шару. Пояснити, в яких випадках необхідно вибрати леговану сталь і які механічні властивості можна гарантувати у сталі вказаних різних типів.

16. **Конічні зубчасті колеса** діаметром 50 мм у електровізку працюють в умовах динамічних навантажень та підвищеного зносу. За вимогою конструктора сталь повинна мати високий опір в'язкому та крихкому руйнуванню виробу в серцевині.

Вибрати *вуглецеву сталь, що цементують*, указати склад, рекомендувати режим термічної обробки для одержання максимальної в'язкості у серцевині виробу, якщо цементация виконується у твердому карбюризаторі. Одночасно для порівняння вказати режим термічної обробки для цементации у газовому середовищі. Указати механічні властивості сталі у серцевині виробу і твердість на поверхні та після останньої термічної обробки, пояснити, чи можна використовувати для цієї мети *сталі звичайної якості*.

17. Заводу треба виготовити **зубчасті колеса складної форми** діаметром 50 мм та висотою 100 мм. Вони повинні мати твердість на поверхні не нижче 58–60 HRC і у серцевині рівень міцності не нижче 400 МПа та ударну в'язкість не нижче 500–600 кДж/м<sup>2</sup>. Завод виготовив першу партію зубчастих коліс з *вуглецевої цементованої сталі*, але деякі зубчасті колеса деформувались під час гартування.

Вибрати сталь, рекомендувати режим термічної обробки після цементации для одержання заданих механічних властивостей та попередження браку внаслідок деформації. Указати структуру сталі в серцевині і поверхневому шарі після останньої обробки та причини деформації під час гартування.

18. Завод виготовляє **черв'ячні колеса** діаметром 150 мм та товщиною 40 мм з *сірого чавуну*. У подальшому були вимушені виготовити колеса з чавуну з рівнем міцності у 1,5 разів вище та відносним видовженням не менше 2–3%.

Указати рівень міцності та структуру сірого чавуну з найбільш високими механічними властивостями, які можна отримати у відливку вказаної товщини. Навести спосіб отримання чавуну з міцністю в 1,5 разів більше міцності вказаного сірого чавуну, охарактеризувати його структуру.

19. Для виготовлення **вкладишів підшипників** деяких механізмів замість кольорових металів (латуні та бронзи) успішно використовують більш дешевий *антифрикційний чавун*.

Указати, яка структура металевої основи сірого чавуну та форма виділення графіту є найбільш придатними для того, щоб забезпечити підвищену зносостійкість вкладишу. Навести механічні властивості обраного чавуну, якщо найменша товщина вкладиша складає 15–20 мм.

20. У процесі **лиття тонкостінних виробів** із *сірого чавуну* інколи одержують відливки з поверхневим шаром надто підвищеної твердості, що ускладнює механічну обробку.

Указати причину одержання підвищеної твердості у поверхневому шарі і його структуру та режим термічної обробки для зниження твердості таких відливків. Для яких цілей необхідно одержання у виробках поверхневого шару високої твердості. Указати способи відливки, які забезпечують одержання такого шару.

**21. Ресори** вантажного автомобіля виготовляються із *якісної легованої сталі*; товщина ресори – до 10 мм. Сталь у готовій ресорі повинна мати високий рівень міцності, витривалості та пружності.

Рекомендувати режим термічної обробки, структуру та механічні властивості, які можна одержати при правильному виборі складу сталі та обробки поверхневого шару, який дозволяє підвищити рівень міцності та витривалості.

**22.** Для підвищення зносостійкості **циліндрів потужних двигунів** внутрішнього згорання використовують азотування.

Вибрати *сталь, придатну до азотування*, навести хімічний склад рекомендувати режим термічної обробки та режим азотування. Вказати твердість поверхневого шару і механічні властивості нижче розміщених шарів у готовому виробі. Порівняти: твердість, яку одержують під час азотування та одержаної під час цементації; температури, до яких може бути збережена твердість азотованого та цементованого шарів; при якому з цих процесів менша деформація деталей.

**23. Деталі літака**, які мають порівняно складну форму, виготовляють із сплавів з хорошими литтєвими властивостями та доброю обробкою різанням. Рівень міцності сплаву повинен бути не нижче 220 МПа.

Рекомендувати склад сплаву, а також режим термічної обробки, вказати структуру та механічні властивості у готовому виробі. Порівняти механічні властивості та режим термічної обробки сплаву с аналогічними властивостями та режимом обробки пластично деформованого *сплаву на алюмінієвій основі*.

**24. Деталі холодильних машин** з метою запобігання крихкому руйнуванню виготовляють із сталі та сплавів з пониженим порогом холодноламкості та відповідно підвищеною в'язкістю при низьких температурах.

Рекомендувати склад *сталі для холодильних машин*, працюючих при температурах: до  $-70^{\circ}\text{C}$  та до  $-259^{\circ}\text{C}$  (в середовищі рідкого водню).

Пояснити, які відмінності у структурі та відповідно і в складі повинні бути між цими сталями.

**25. У шестернях**, виготовлених із *сталі 40X* та оброблених на твердість 40–42 HRC, під час експлуатації при підвищених напруженнях, у тому числі динамічних навантаженнях, виникали тріщини при низьких температурах в умовах півночі.

Пояснити причини та рекомендувати марку сталі, в'язкість якої мало зменшується при зниженні температури від  $+20$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ .

**26. Котли теплових електростанцій** працюють при тиску пару 50 МПа та температурі  $600^{\circ}\text{C}$ . У цьому випадку для котлів потрібні сталі з високим опором повзучості.

Указати марку, хімічний склад та структуру сталі, придатної для роботи у вказаних умовах. Порівняти характеристики обраної *сталі* з властивостями іншої сталі, яка використовується для котлів, працюючих при 300–400°C.

27. **Кришки коробки швидкостей, ручки** та інші деталі, на які не діють підвищені механічні навантаження, краще виготовляти з *легких металів* ( $\rho=1500 \text{ кг/м}^3$ ).

Рекомендувати склад матеріалу та зіставити його властивості з аналогічними властивостями *сталі марки Ст 3*, яку широко використовували раніше для аналогічного призначення.

28. Сталь, яка використовується для **пароперегрівачів котлів високого тиску**, повинна зберігати підвищені механічні властивості під час тривалих навантажень при температурі вище 500°C та мати достатньо високу пластичність для виконання холодної деформації, гнбки, завальцьовки при зварюванні котла.

Указати хімічний склад, мікроструктуру і хімічні властивості *сталі* при кімнатній та підвищених температурах (400–500°C). Пояснити основні відміни обраної сталі від *вуглецевої котельної сталі*.

29. **Лопатки реактивних і турбореактивних двигунів** працюють в окисленому середовищі при високих температурах (до 800–900°C). Сплави, з яких виготовляють ці деталі, повинні мати підвищену корозійну стійкість, високий опір повзучості, тривалу міцність при вказаних температурах.

Вибрати склад *сплаву*, указати методи термічної обробки, навести зміни структури та властивостей після основних операцій цієї обробки.

30. Більшість **деталей парових турбін**, наприклад, лопатки, працюють при підвищеній температурі (400–500°C) та в умовах взаємодії пари та вологи. Сталь для їх виготовлення повинна бути протистійкою повзучості та корозії.

Вибрати марку сталі для лопаток, указати її хімічний склад, а також режим термічної обробки та мікроструктуру у готовому виробі. Визначити механічні властивості обраної сталі при 20°C та при 500°C, порівняти їх з властивостями *вуглецевої якісної сталі*, яка має однаковий вміст вуглецю. Указати у якому напрямі треба міняти хімічний склад і мікроструктуру сталі при необхідності підвищення температури роботи деталей до 600–650°C.

## 4.2 ЗАВДАННЯ ЩОДО ВИБОРУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

31. Вибрати сталь для **черв'ячних фрез** для обробки конструкційних сталей с твердістю 220-240 НВ. Пояснити причини за якими недоцільні для цієї мети використовувати *вуглецеву інструментальну сталь У12* з високою твердістю (63-63 HRC). Рекомендувати режим термічної обробки фрез із вибраної *швидкоріжучої сталі*, прийняти, що фрези виготовлені із прокату діаметром 40 мм.

32. Завод виготовляє **протяжки** з *високовольфрамової сталі Р18*. Указати, чи можна використовувати для протяжок менш леговану, а значить біль економічну *швидкоріжучу сталь*. Вибрати марку сталі для протяжок, які обробляють конструкційні сталі з твердістю до 250 НВ. Указати її термічну

обробку, структуру, властивості для випадків, коли протяжки виготовляють із прокату діаметром 40 і 85 мм.

33. Завод виготовляє **черв'ячні фрези** двох розмірів: зовнішнім діаметром 30 і 80 мм із катаної *швидкоріжучої сталі* відповідного профілю.

Вибрати марку *швидкоріжучої сталі* помірної теплостійкості, рекомендувати режим термічної обробки. Указати спосіб хіміко-термічної обробки, який спричиняє додаткове підвищення стійкості фрез. Пояснити, чим відрізняються структура і властивості швидкоріжучої сталі із прокату діаметром 30–32 і 80–82 мм.

34. **Інструменти** із *швидкоріжучої сталі* мають недостатню стійкість при різанні з підвищеною швидкістю (більше 80–100 м/хв).

Вибрати марку *інструментальних сплавів*, придатних для різання з великою швидкістю сталей і чавунів. Указати склад, структуру, властивості вибраних сплавів, зіставити їх з аналогічними властивостями швидкоріжучих сталей. Пояснити причини, за якими для обробки сталі слід вибрати сплав іншого складу, ніж для обробки чавуну.

35. У розпорядженні заводу є швидкоріжучі сталі двох марок: *вольфрамомолібенова Р6М5 і кобальтова Р9М4К8*.

Пояснити, чим відрізняються основні властивості цих сталей, рекомендувати оптимальне призначення кожної із них. Указати термічну обробку цих сталей, їх структуру і властивості в готових **інструментах** 20 і 60 мм.

36. Цех виконує токарну обробку *чавунних і сталевих деталей з великою швидкістю різання*.

Вибрати *сплави* для **різців**, які забезпечили б високу продуктивність обробки сталі і чавуну. Навести хімічний склад, структуру, твердість, міцність, теплостійкість і спосіб виготовлення цих сплавів, порівняти їх з аналогічними характеристиками швидкоріжучої сталі.

37. При обробці сталі з твердістю більш 280–300 НВ **різці** із *швидкоріжучої сталі* не мають достатньої стійкості.

Указати склад сплаву з більш високими ріжучими властивостями. Внаслідок високої вартості і великої крихкості такого сплаву навести спосіб виготовлення складових різців. Указати *метал*, з якого слід виготовляти **державки різця**. Зіставити структуру, твердість, теплостійкість і спосіб приготування вибраного сплаву з аналогічними характеристиками швидкоріжучої сталі.

38. Машинобудівельний завод виготовляє деталі при різних умовах різання: **різцями** з великою швидкістю різання обробляється *легована сталь* з твердістю 300–350 НВ; **різьбовими фрезами** з помірною швидкістю – *сталі* з твердістю 200–220 НВ; **плашками** діаметром 60 мм з невеликою швидкістю нарізується різьба на *сталі* з твердістю 120–140 НВ.

Підібрати *марку сплаву* (сталі) для кожного з цих інструментів, обґрунтувати зроблений вибір, порівняти мікроструктуру і головні властивості вибраних матеріалів.

39. Вибрати марку *легованої інструментальної сталі* для виготовлення круглих **плашок** для обробки м'якої *низьковуглецевої сталі*. Указати режим термічної обробки і способи захисту від втрати вуглецю і окислення при нагріванні для гартування. Порівняти хімічний склад, мікроструктуру, основні властивості, галузь застосування вибраної і швидкоріжучої сталей.

40. **Вимірювальні інструменти** (калібри, вимірювальні плитки) повинні мати не лише високу твердість і хороший опір зносу, але і не повинні змінювати свої розміри в майбутньому. Однак вироби після гартування і низького відпуску інколи не значно змінюють свої розміри під час експлуатації, що недопустимо для вимірювальних інструментів великої точності.

Указати причини, які визивають ці зміни (старіння), навести марку *сталі* і режим термічної обробки вимірювальних інструментів, значно зменшуючи ефект старіння.

41. На машинобудівельному заводі виготовляють **зубчасті колеса** із прутків *сталі 40X*, які постачає металургійний завод, із твердістю 160–180 НВ. Одна плавка сталі, доставлена на завод, мала твердість 230–250 НВ. Для обробки сталі підвищеної твердості виникла потреба знизити режим різання, прийнятий на заводі.

Указати спосіб і режим термічної обробки, що сприяє покращенню обробки різанням *сталі* цієї плавки. Навести хімічний склад, структуру і режим термічної обробки сталі для фрез, придатних для обробки *сталі 40X*.

42. Отримання заготовок гарячою деформацією є продуктивним способом обробки.

Вибрати марку сталі для виготовлення великого **молотового штампу** (розміром 500×400×400 мм); рекомендувати режим термічної обробки штампу указати мікроструктуру і механічні властивості після відпуску. Пояснити, чому подібні штампи не слід виготовляти із *вуглецевої сталі*.

43. **Стальні стакани циліндрів двигунів внутрішнього згорання** виготовляють штамповкою у гарячому стані. Внутрішня порожнина утворюється шляхом прошивки – вдавлювання пуансону у нагрітий метал, який встановлюється у спеціальну матрицю. Пуансон працює в умовах поперемінного нагрівання (при прошивці) та охолодження (після прошивки).

Указати температуру штамповки (прошивки) заготовок, якщо їх виготовляють із *сталі 50*. Вибрати марку сталі для виготовлення пуансону діаметром 40 мм, обґрунтувати вибір, указати режим термічної обробки і структуру сталі у готовому виробі (пуансоні).

44. Для **пуансонів гарячого видавлювання** – операції, під час якої штамп протягом довгого часу знаходиться у стиканні з нагрітим металом, що деформується, необхідно *теплостійкі штамповані сталі*.

Вибрати сталь для пуансонів видавлювання жаростійких сплавів; за цих умов обробки штампова сталь повинна зберігати підвищені властивості міцності при нагріванні до 700–720°C. Рекомендувати режим термічної обробки штампів і структуру сталі у готовому штампі.

45. **Штampi** складної форми, особливо з внутрішнім отвором, сильно деформуються при гартуванні.

Рекомендувати температуру гартування штампів з *високохромистої сталі X12Φ*, при виготовленні яких значно зменшується деформація. Указати структуру сталі після гартування, пояснити причини, які сприяють зменшенню деформації.

46. Вироби з пластмас виготовляють пресуванням при невисокому нагріванні (~150°C). Матеріал **пресформи**, в яку пресується пластмаса, повинен мати високу зносостійкість.

Вибрати марку сталі і режими обробки для пресформ; врахувати, що обробка сталі різанням повинна бути хорошою; крім того деформація пресформи при термічній обробці повинна бути мінімальною

### 4.3 ЗАВДАННЯ ЩОДО ВИБОРУ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

47. **Черв'як редуктора** для зменшення коефіцієнта тертя часто виготовляють із *сталі*, а **вінець коліс** – із *сплаву на мідній основі*.

Указати марку і склад сплаву для вінця колеса з високим антифрикційним властивостями і межами міцності  $\sigma_b$  не нижче 250 МПа. Пояснити, як змінюються механічні властивості сплаву залежно від умов лиття (в кокіль чи в землю). Указати для порівняння склад, термічну обробку, структуру і механічні властивості сталі для виготовлення черв'яка редуктора діаметром 30 мм, якщо межа міцності повинна бути не нижче 700 МПа.

48. Деякі **гвинти, болти, гайки** та інше виготовляють із *латуні* на верстатах-автоматах з великою швидкістю. Латунь має високу в'язкість і пластичність і не дає достатньо чисту поверхню при обробці різанням.

Вибрати латунь, застосування якої дає можливість отримати чисту поверхню і високу продуктивність праці при обробці сплавів різанням. Порівняти механічні властивості і структуру вибраного сплаву з аналогічними характеристиками латуні високої в'язкості і пластичності.

49. *Нержавіючі сталі*, у тому числі *високолеговані аустенітного класу*, не мають достатньої стійкості в соляній кислоті.

Вибрати метал з  $\rho=4500$  кг/м<sup>3</sup> для **баків і трубопроводів**, який мав висоту стійкості в указаних умовах і порівняти механічні властивості вибраного сплаву з аналогічними властивостями нержавіючої сталі 12X18H10T.

50. **Зварні бензинові і масляні баки**, від матеріалу яких не вимагають високих механічних властивостей, виготовляють в авіапромисловості з *легких листових сплавів* з підвищеними стійкістю проти корозії, пластичністю, властивістю добре сприймати зварювання.

Рекомендувати склад сплаву для даної мети, указати його структуру і механічні властивості. Для порівняння навести хімічний склад, а також режим термічної обробки і структуру сталі, стійкої проти корозії у наведених середовищах.

51. Зменшення маси **поршня у двигуні внутрішнього згорання** дає підвищення потужності.

Рекомендувати склад сплаву з мінімальною твердістю для виготовлення поршнів. Указати хімічний склад сплаву, його механічні властивості і режим обробки. Зіставити твердість і механічні властивості вибраного сплаву з аналогічними характеристиками *сплавів на алюмінієвій основі*, які використовують для виготовлення поршнів.

52. Багато **деталей приладів і обладнання**, на які діє морська вода, виготовляють з *кольорового славу* шляхом холодної деформації протягом декількох операцій.

Підібрати сплав, стійкий проти дії морської води, навести його хімічний склад. Указати режим проміжної термічної обробки обраного сплаву і навести його механічні властивості після деформації і термічної обробки. Порівняти склад сталі, стійкої проти дії морської води; навести режим її термічної обробки, механічні властивості і структуру.

53. **Деталі коліс, агрегатів і приладів літаків**, які мають складну форми і не підлягають великим механічним навантаженням, виготовляють литтям із *легких сплавів* ( $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$ ), які мають хороші литтєві властивості.

Вибрати склад сплаву, указати його мікроструктуру, а також способи підвищення механічних властивостей (у процесі плавки) та зміни будови сплаву і механічних властивостей, які відбуваються при цьому.

54. Запропонувати *жаростійкий матеріал* у вигляді дроту для **електронагрівачів** з робочою температурою до  $950^\circ\text{C}$ . Указати властивості і технологію виготовлення.

55. Вибрати *жаростійкий матеріал* стрічки для **електронагрівачів** з робочою температурою до  $1400^\circ\text{C}$ . Указати склад, властивості та технологію виготовлення.

56. Запропонувати матеріал і технологію зміцнювальної термообробки для немагнітних і корозійностійких **сильфонів** з високою технологічною пластичністю.

57. Запропонувати марку *дисперсійнотвердіючого пружинного сплаву ніобію*. Які фази забезпечують зміцнення? Указати термообробку.

58. Запропонувати декілька *сплавів еливарного типу* для **точних пружинних елементів**. У чому особливості термозміцнювальної обробки?

59. Обґрунтувати застосування і режим прискорення відпалу для *деформаційнозміцнювальних пружинних сплавів*.

60. Описати **методи одержання композиційних матеріалів** (пресування, зварювання, спікання, направлена кристалізація евтектичних сплавів).

## 5 ПРИКЛАД ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ТА ПРИЗНАЧЕНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ

**Завдання 1.** Вибрати марку сталі та призначити зміцнювальну обробку вала барабана екскаватора з канатно-блочним приводом, який експлуатується в умовах Крайньої Півночі.

Вихідні дані:

- межа текучості матеріалу не менше 750 МПа;
- діаметр вала 100 мм;
- твердість на поверхні шийок не менше 55 HRC.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

1. *Вибір класу матеріалу.* Для вирішення цього питання користуємося табл. 1. В ній наведені значення тимчасового опору  $\sigma_b$  в завданні ж указана межа текучості  $\sigma_{0,2}$ . Відомо, що для більшості конструкційних матеріалів  $\sigma_{0,2}$  складає 0,75–0,90 від  $\sigma_b$  (залежно від конкретного матеріалу та режиму обробки). Тільки для дуже м'яких сталей, які використовуються для холодного штампування, відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  близько до 0,5. Для нашого прикладу ( $\sigma_{0,2} = 750$  МПа) тимчасовий опір має дорівнювати 850–1000 МПа, що за табл. 1 відповідає залізобетонним сплавам середньої міцності.

Конкретний матеріал для деталі можна обрати лише після всебічного аналізу умов експлуатації.

2. *Аналіз умов експлуатації.* Вал працює у складнонапруженому стані під дією згинальних, циклічних, динамічних навантажень. Для надійної роботи за таких умов матеріал вала повинен мати високі показники міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), втомної міцності ( $\sigma_{-1}$ ), пластичності ( $\delta$ ,  $\psi$ ) та ударної в'язкості, особливо роботи розвитку тріщини ( $K_{Cp}$ ), тобто високу конструкційну міцність.

Як відомо, таке поєднання властивостей можна отримати у сталях після гартування з високим відпуском (покращення), при якому формується структура сорбіту відпуску. Чавун для заданих умов роботи непридатний. Отже, слід вибрати сталь з групи покращуваних.

Необхідно підкреслити, що потрібний високий рівень властивостей буде досягнутий тільки за умови наскрізної прогартуваності. Оскільки діаметр вала 100 мм. прогартуваність стає визначальним показником – вибрана сталь повинна мати  $D_{кр}$  не менше 100 мм.

Оскільки виріб має працювати при низьких температурах, ще однією визначальною вимогою до сталі є низький поріг холодноламкості. Тому, вибираючи марку легованої сталі, слід звернути увагу на елементи, які знижують  $t_{кр}$ .

3. *Вибір марки сталі.* Користуючись [18] знаходимо марки покращуваних сталей, які прогартовуються в діаметрі 75–120 мм. У таблиці наведені дві марки – 30ХН3А та 40ХН2МА. Обидві сталі леговані нікелем, який, як відомо, знижує  $t_{кр}$ . Порівняємо їх властивості після покращення (табл. 4)

Таблиця 4

Властивості сталей 30ХН3А та 40ХН2МА після покращення  
(гартування 820–850°C, масло, відпуск 600°C) [14]

Сталь	Властивості							
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\Sigma_{-1}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСU <sub>+20</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	КСU <sub>-60</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	D <sub>кр</sub> , мм
30ХН3А	780	890	420	21	64	157	130	~100
40ХН2МА	860	960	400	20	62	147	73	>100

З таблиці видно, що необхідний рівень межі текучості забезпечують обидві сталі. Сталь 40ХН2МА має дещо вищі показники міцності при тому ж рівні пластичності. Ударна в'язкість цієї сталі нижча, ніж у сталі 30ХН3А, але її значення при –60°C залишається достатньо високим, що гарантує запобігання крихкому руйнуванню. Таким чином, як з точки зору міцності, так і порога холодноламкості, обидві сталі для даної деталі рівнозначні. Але існує ще один визначальний показник – твердість поверхні шийок, яка має бути не нижче 55 HRC для забезпечення зносостійкості.

Зміцнення шийок для середньовуглецевих сталей досягається поверхневим гартуванням з індукційним нагріванням. У сталі 30ХН3А через знижений вміст вуглецю максимальна твердість після гартування з низьким відпуском сягає 49–50 HRC, у сталі ж 40ХН2МА твердість вища – 54–56 HRC. Таким чином, враховуючи такі визначальні показники як механічні властивості, прогартовуваність, поріг холодноламкості та поверхнева твердість шийок вала, вибираємо для вала екскаватора сталь 40ХН2МА.

4. *Метод виготовлення та попередня термічна обробка заготовки.* Вибір сталі як матеріалу деталі зумовлює і технологію її виготовлення – гаряча обробка тиском. Для нашої деталі раціонально виготовити заготовку куванням або гарячим штампуванням, після чого провести необхідну механічну обробку з припуском на наступні операції термічної обробки. Для поліпшення оброблюваності різанням та отримання рівноважної структури заготовку необхідно піддати нормалізації з високим відпуском або ізотермічному відпалу. Після таких обробок твердість сталі дорівнює 216–236 НВ, що забезпечує задовільну оброблюваність різанням.

5. *Вибір конкретних режимів термічної обробки.* Знаючи критичні точки ( $A_{c1} = 730^\circ\text{C}$ ,  $A_{c3} = 820^\circ\text{C}$ ) [19], призначаємо режими гартування та відпуску.

Температура нагріву під гартування 870°C ( $A_{c3} + 50^\circ\text{C}$ ), видержка виробу при цій температурі 1,5 год (1 хв/мм перерізу), гартувальне середовище – масло. Мікроструктура – мартенсит.

Температура відпуску 600°C, видержка ~2 год, охолодження на повітрі (завдяки молібдену відпускна крихкість відсутня). Структура – сорбіт відпуску.

Технологічні параметри індукційного гартування вибираємо, користуючись табл. 1. Товщина загартованого шару 4–5 мм, твердість – 55–57 HRC.

**Завдання 2.** Заводу потрібно виготовити вал діаметром 70 мм для роботи з великими навантаженнями. Сталь повинна мати межу текучості не менше 75 кгс/мм<sup>2</sup>, межу витривалості не менше 40 кгс/мм<sup>2</sup> і ударну в'язкість не менше 9 кгс/см<sup>2</sup>.

Завод має сталі трьох марок: Ст 4; 45; 20ХН3А. Яку з цих сталей належить використати для виготовлення вала? Чи потрібна термічна обробка вибраної сталі? Якщо потрібна, то яка? Дати характеристику мікроструктури, указати механічні властивості після закінчення термічної обробки.

#### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Сталі марок Ст 4; 45; 20ХН3А мають хімічний склад, наведений у таблиці 5.

Таблиця 5

Хімічний склад сталей, %

Марка сталі	С	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Ст 4	0,18–0,27	0,40–0,70	0,05–0,17	0,3	0,3	0,05	0,04
45	0,45–0,5	0,5–0,8	0,17–0,37	0,25	0,25	0,04	0,035
20ХН3А	0,17–0,24	0,3–0,6	0,17–0,37	0,6–0,9	2,75–3,15	0,025	0,025

Сталь марки Ст 4 має такі властивості у стані постачання (після прокатки чи кування  $\sigma_b = 42\text{--}54$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} \geq 24\text{--}26$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\delta \geq 21$  %).

Сталь 45 у стані постачання (після прокату й відпалювання) має твердість не більше 207 НВ. При твердості 190–200 НВ сталь має межу міцності не вище 60–62 кгс/мм<sup>2</sup>, а при твердості менше 180 НВ межа міцності не перевищує 55–60 кгс/мм<sup>2</sup>. Для відпаленої вуглецевої сталі відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  складає приблизно 0,5. Отже, межа текучості сталі 45 у цьому стані перевищує 27–32 кгс/мм<sup>2</sup>.

Сталь 20ХН3А у стані постачання (після прокату і відпалювання) має твердість не більше 250 НВ. Отже, межа міцності (при твердості 230–250 НВ) не перевищує 67–75 кгс/мм<sup>2</sup> і може бути менше 60 кгс/мм<sup>2</sup> для плавки з більш низькою твердістю.

Тоді межа текучості складає 35–40 кгс/мм<sup>2</sup>, тому що  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  для відпаленої легованої сталі складає 0,5–0,6.

Таким чином, для заданого значення межі текучості вал необхідно піддати термічній обробці.

Для низьковуглецевої сталі Ст 4 покращуючий вплив термічної обробки незначний. Крім того Ст 4 як сталь звичайної якості має підвищений вміст сірки й фосфору, які зменшують механічні властивості й особливо опір ударним навантаженням.

Для такого відповідального виробу, як вал двигуна, поломка якого порушує роботу машини, використання більш дешевої за складом сталі звичайної якості нерациональне.

Сталь 45 належить до якісної вуглецевої, а сталь 20ХН3А – до класу високоякісної легованої сталі. Вони складаються відповідно з 0,42–0,50 й 0,17–0,23% С і приймають гартування.

Для підвищення міцності можна використовувати нормалізацію або гартування з великим відпуском.

Останній варіант обробки складніший, але він дозволяє отримати не тільки більш високі характеристики міцності, але й більш високу в'язкість. У сталі 45 мінімальне значення ударної в'язкості КСУ після нормалізації складає 2–3 кгс/см<sup>2</sup> а після гартування й відпуску з нагріванням до 500°C досягає 6–7 кгс/см<sup>2</sup>.

Через те, що вал двигуна сприймає динамічні навантаження, а також і вібрацію, більш доцільно використовувати гартування і відпуск.

Після гартування у воді вуглецева сталь 45 має структуру мартенситу. Але внаслідок невеликого прогартування вуглецевої сталі ця структура у виробках з діаметром більшим 25 мм утворюється тільки в порівняно тонкому поверхневому шарі товщиною до 2–4 мм. Наступний відпуск приводить до перетворення мартенситу і троститу у сорбіт тільки у тонкому поверхневому шарі, але не впливає на структуру і властивості перліту і фериту в основній масі виробу.

Найбільше напруження від загину, кручення і повторно змінних навантажень сприймають поверхневі шари які й повинні мати підвищені механічні властивості. Але в опорі динамічним навантаженням, які сприймає вал, приймають не тільки поверхневі, але і ті шари металу, які знаходяться нижче. Таким чином, вуглецева сталь не буде мати потрібних властивостей у розрізі вала діаметром 70 мм (рис. 3).

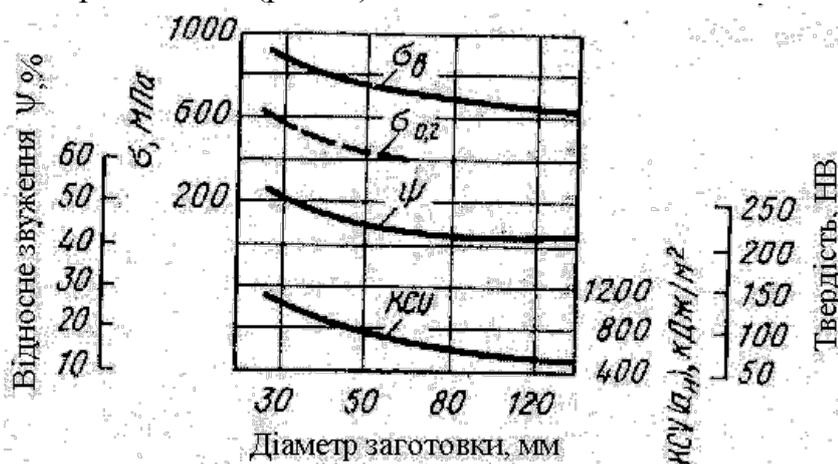


Рис. 3. Механічні властивості вуглецевої сталі з 0,45% С після гартування і відпуску залежно від діаметру заготовки

Сталь 20ХН3А легована нікелем і хромом для підвищення прогартуваності та загартуваності. Вона має після гартування достатньо однорідну структуру і механічні властивості в розрізі діаметром до 75 мм.

Для сталі 20ХН3А рекомендована термічна обробка:

– **гартування при 820–835°C у маслі.** При гартуванні з охолодженням у маслі виникають менші напруження, а, відповідно, і менша деформація. Після гартування сталь має структуру мартенситну й твердість не менше 50 HRC;

– **відпуск при 520–530°C.**

Для попередження крихкості відпуску, до якої чутливі сталі з хромом і марганцем, вал після нагрівання необхідно охолоджувати у маслі.

Механічні властивості сталі 20ХН3А у виробі з діаметром 75 мм після термічної обробки:

Межа міцності $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	90–100
Межа текучості $\sigma_{0,2}$ кгс/мм <sup>2</sup>	75–80
Межа витривалості $\sigma_{-1}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	40–43
Відносне видовження $\delta$ , %	8–10
Відносне звуження $\psi$ , %	45–50
Ударна в'язкість КСУ, кгс/см <sup>2</sup>	0,9

Таким чином, ці властивості забезпечують вимоги, сформульовані у задачі, для вала 70 мм.

**Завдання 3.** Стійкість свердел і фрез, виготовлених із швидкоріжучої сталі нормальної теплостійкості марки Р12 та Р6М5, якими обробляли конструкційні сталі твердістю 180–200 НВ, була задовільною.

Але все ж таки стійкість цих свердел різко знизилась при обробці жаростійкої аустенітної сталі.

Запропонувати швидкоріжучу сталь підвищеної теплостійкості, придатну для ефективного різання жаростійких сталей, указати її марку і хімічний склад, термічну обробку і мікроструктуру у готовому інструменті. Порівняти теплостійкість сталі Р12 та Р6М5 і вибраної сталі.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Ріжучі інструменти для продуктивного різання виготовляють із швидкоріжучих сталей, тому ці сталі мають теплостійкість. Вони зберігають мартенситну структуру й високу твердість при підвищеному нагріванні (500–650°С), яке з'являється на ріжучій брівці.

Але стійкість інструментів, виготовлених з швидкоріжучої сталі, після оптимальної термічної обробки визначається не тільки хімічним складом, структурою і режимом різання, але і дуже залежить від властивостей обробленого матеріалу.

Під час різання сталей і сплавів з аустенітною структурою, які мають широке використання в хімічній промисловості, стійкість інструментів і гранична швидкість різання можуть дуже знизитися у порівнянні з отриманими під час різання звичайних конструкцій сталей і чавуну з відносно низькою твердістю (до 220–250 НВ). Це пов'язано головним чином з тим, що теплопровідність аустенітних сплавів знижена. В результаті цього тепло, яке виділилося під час різання, лише в невеликій кількості поглинається стружкой і деталлю, а головним чином – ріжучою брівкою. Крім того, ці сплави дуже зміцнюються під ріжучою брівкою під час різання, із-за чого збільшується зусилля різання.

Для різання подібних матеріалів, які мають назву важкообробних, непридатні швидкоріжучі сталі нормальної теплостійкості, які зберігають

високу твердість (58 HRC) і мартенситну структуру після нагрівання не вище 615–620°C. Для обробки аустенітних сплавів необхідно вибрати швидкоріжучі сталі підвищеної теплостійкості. Кобальт сприяє виділенню при відпуску, поряд з карбідами, також часток інтерметалідів, більш стійких до коагуляції, і затримує процеси дифузії при температурах нагріву ріжучої брівки. Кобальтові сталі зберігають твердість 58 HRC після більш високого нагріву до 640–645°C. Крім того, кобальт помітно (на 30–40%) підвищує теплопровідність швидкоріжучої сталі, а відповідно знижує температуру ріжучої брівки через кращий відвід тепла в тіло інструмента.

Сталі з кобальтом мають більш високу твердість (до 68 HRC) у сталі P9M4K8.

Для свердел і фрез, які використовують для різання аустенітних сплавів, рекомендуються кобальтові сталі марок P12Ф4К5 або P9M4K8.

Термічна обробка кобальтових сталей принципово не відрізняється від обробки інших швидкоріжучих сталей.

Інструменти гартують з дуже високих температурах 1240–1250°C для сталі P12Ф4К5 і 1230°C для сталі P9M4K8, що необхідно для розчину великої кількості карбідів і насичення аустеніту (мартенситу) легуючими елементами: вольфрамом, молібденом, ванадієм і хромом. Більш високе нагрівання, яке підсилює перехід карбідів у розчині, недопустиме: воно сприяє росту зерен, що знижує міцність і в'язкість. Структура сталі після гартування: мартенсит, залишковий аустеніт (15–30%) і залишкові карбіди, які не розчиняються при нагріванні й здержують ріст зерна. Твердість 60–62 HRC.

Потім інструменти відпускають при 550–560°C (3 рази по 60 хвилин).

Відпуск спричиняє:

а) виділення дисперсних карбідів і інтерметалідів із мартенситу (дисперсне затвердіння), що підвищує твердість до 66–69 HRC;

б) перетворює м'яку складову – залишковий аустеніт в мартенсит;

в) знімає напруження, виконане мартенситними перетворюваннями.

Після відпуску інструмент шліфують, а потім піддають ціануванню з витримкою 15–30 хв.

Твердість ціанованого шару на глибині 0,02–0,03 мм досягає 69–70 HRC; збільшується й теплостійкість. При нагріванні для ціанування також знижується й напруження, викликане шліфуванням. Ціанування підвищує стійкість інструментів на 50–80%.

Після гартування доцільне короткочасне нагрівання при 450–500°C в атмосфері пари й з охолодженням у маслі; поверхня інструменту набуває синього кольору й кращу стійкість проти повітряної корозії.

**Завдання 4.** Багато виробів виготовляють із латуні витяжкою із листа в холодному стані. Інколи у виробках з'являються тріщини, які виникають без дії зовнішніх навантажень (так зване сезонне розтріскування). Підібрати марку латуні, на яку не впливає сезонне розтріскування, крім того, описати структуру, механічні та технологічні властивості  $\alpha$ - і  $(\alpha+\beta)$ -латуней.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Латуні залежно від складу цинку і структури можна розділити на три класи:

- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. $\alpha$ -латуні        | до 39,5 % Zn          |
| ( $\alpha+\beta'$ )-латуні | від 39,5 до 45,7 % Zn |
| $\beta'$ -латуні           | від 45,7 до 51 % Zn   |

Збільшення вмісту цинку змінює структуру і властивості латуней (рис. 4).

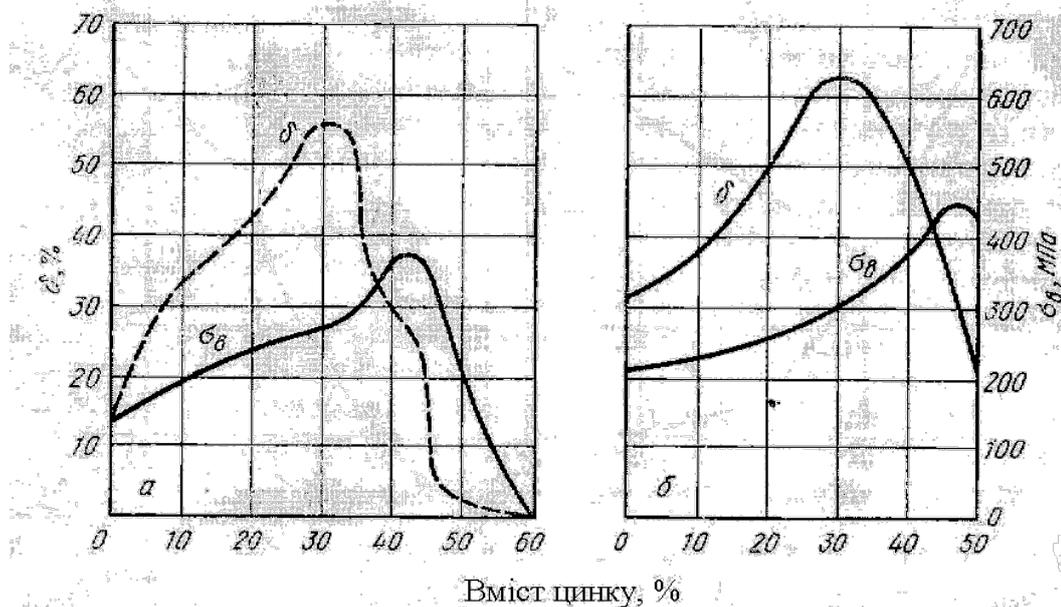


Рис. 4. Механічні властивості латуні в залежності від вмісту цинку:  
а – лита латунь; б – катана і відпалена латунь

Збільшення вмісту цинку до конкретної межі підвищує пластичність і міцність. Пластичність досягає максимальних значень при 30–32% Zn, міцність – при 40%. При подальшому підвищенні вмісту цинку міцність і пластичність знижуються.

Ці зміни визначаються властивостями відповідних фаз, які утворилися при додаванні цинку.

$\alpha$ -фаза – твердий розчин типу заміщенні, пластичність і міцність якої збільшується зі збільшенням вмісту цинку;

$\beta'$ -фаза – твердий розчин на основі електронного з'єднання з об'ємноцентрованою кубічною решіткою та узгодженим розміщенням атомів. Ця фаза відрізняється підвищеною крихкістю й твердістю, тому утворення  $\beta'$ -фази знижує в'язкість і підвищує твердість.

При нагріванні вище 450°C  $\beta'$ -фаза перетворюється в незлагоджений твердий розчин, який відрізняється більшою пластичністю, ніж  $\beta'$ -фаза. З діаграми стану видно, що ( $\alpha+\beta'$ )-латуні набувають при такому нагріванні однорідну структуру  $\beta$ -твердого розчину, відповідно, й більшу пластичність (рис. 5).

Ці властивості фаз визначають технологічний процес виготовлення виробу з різних сортів латуней, а також їх призначення.

Вироби з  $\alpha$ -латуней виготовляють, головним чином, холодною або гарячою деформацією і обробка різанням не дає достатньо чистої поверхні. Вироби із  $(\alpha+\beta')$ -латуней виготовляють гарячою (пресування або штамповка) або холодною деформацією або обробкою різанням.

Вироби із  $\alpha$ - або  $(\alpha+\beta')$ -латуней використовуються у відпаленому або наклепаному стані, тому що термічна обробка (гартування та відпуск) не дають помітного ефекту. В наклепаному стані (після холодної деформації) латунь відрізняється великою міцністю при пониженій в'язкості.

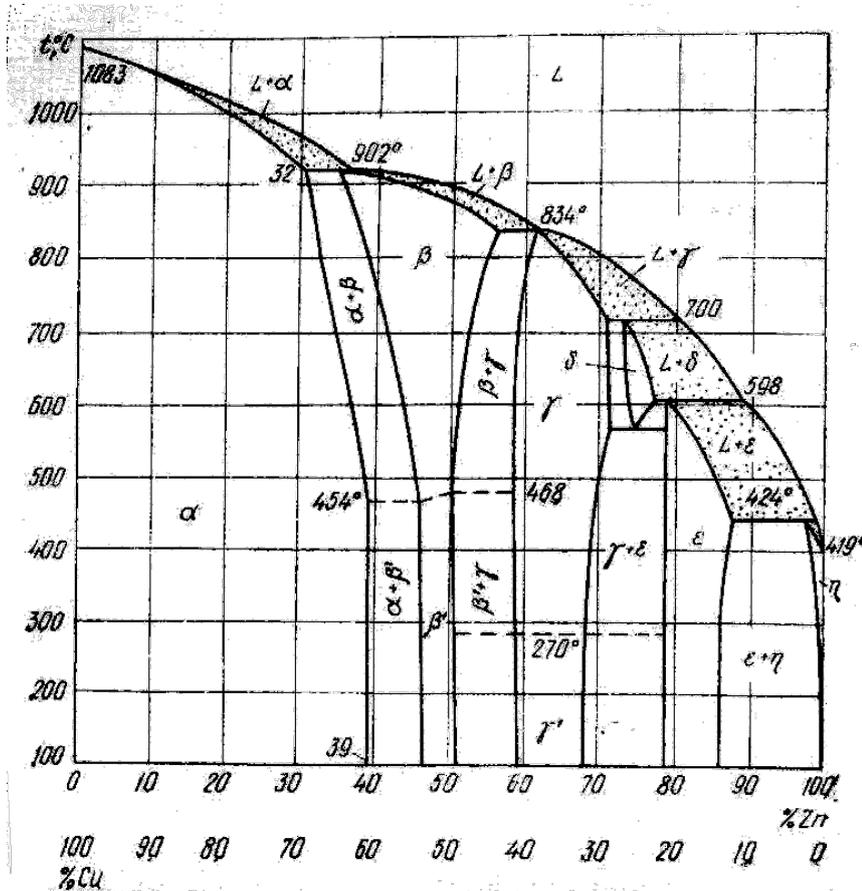


Рис. 5. Діаграма стану Cu-Zn

В результаті подальшого відпалювання міцність сплавів знижується, але пластичність зростає (рис. 6).

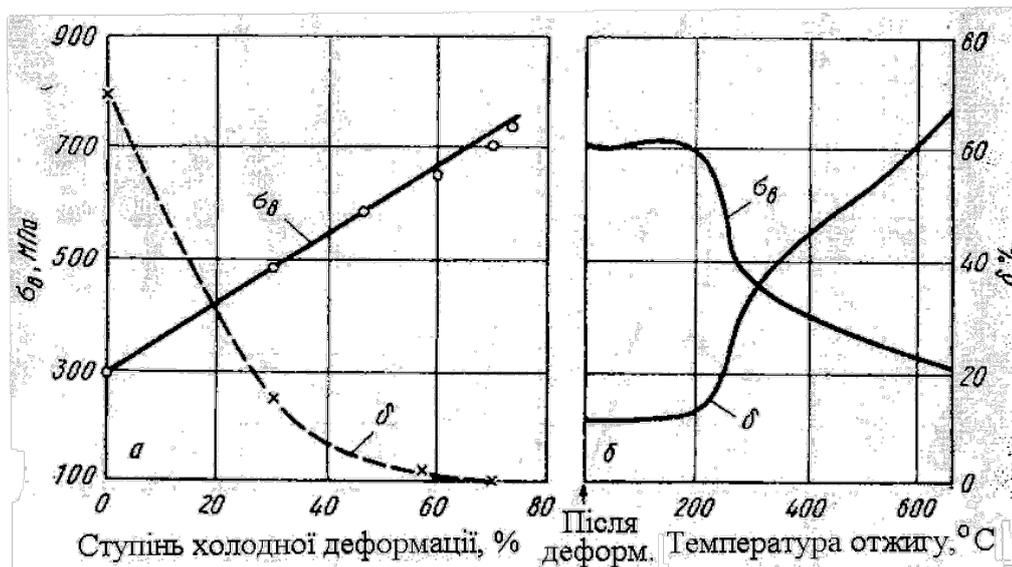


Рис. 6. Механічні властивості латуні Л68 залежно від:  
а – від ступеня деформації; б – від температури відпалювання

Холодна деформація латуней створює у виробі залишкові напруження, вони з'являються і в результаті місцевої холодної деформації (при згинанні деталей, чеканці, розвальцюванні тощо). Під час експлуатації у виробках з латуні інколи виникають тріщини. “Сезонне старіння” спостерігається, головним чином, у латуней з вмістом цинку більше 20 %, його чітко видно у пустотілих виробках. “Сезонне старіння” посилюється в хімічно активних середовищах, особливо в парі аміаку, ртутних солях, ртуті, мильній воді.

Виникнення тріщин є результатом спільних дій залишкових напружень, створених холодною деформацією (найбільш небезпечні розтягувальні напруження) і хімічно активних середовищ.

Для запобігання сезонному розтріскуванню потрібний відпуск з нагріванням до 200–300°C; це знімає більшу частку залишкових напружень і незначно знижує міцність.

Але в умовах виготовлення і монтажу конструкцій з використанням розвальцювання, гнуття та ін. не завжди вдається запобігти виникненню місцевих, навіть незначних деформацій, а відповідно і сезонному розтріскуванню. У таких випадках використовують більш дорогі (які мають меншу міцність) але здатні до сезонного розтріскування латуні – Л 96, Л 90.

Механічні властивості і склад латуней, а також широко використовувані латуні ЛС 59-1 наведені в табл. 6.

Склад і механічні властивості латуней

Структурний клас сплаву	Марка	Хімічний склад		Механічні властивості	
		Cu, % (решта Zn)	домішки (Fe, Si та ін., %)	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
$\alpha$ -латунь	Л 96	96	0,30	23	35
	Л 90	90	0,30	27	38
	Л 80	80	0,30	28	45
	Л 68	68	0,30	30	55
$(\alpha+\beta')$ -латунь	ЛС 59-1	58-61, Pb 0,8-1,9	0,75	35 40*	30 15*

Примітка: \* для відпалених стрічок, листів і пресованих прутків латуні Л 96 і Л 90

Латуні можна замінити алюмінієвою бронзою, яка не здатна до сезонного розтріскування і яка має аналогічні значення міцності та пластичності

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### Навчально-методична література

1. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение [Текст]: Уч-к для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова. – 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.
2. Солнцев, Ю.П. Материаловедение [Текст]: Уч-к для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784.
3. Солнцев, Ю.П. Спеціальні конструкційні матеріали [Текст]: Підручник для вищих навчальних закладів / Ю.П. Солнцев, С.Б. Беліков, І.П. Волчок, С.П. Шейко. – Запоріжжя: «ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ», 2010. – 536 с.
4. Гольдштейн, М.Н. Специальные стали [Текст]: Уч-к для вузов / М.Н. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «МИСИС», 1999. – 408 с.
5. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали [Текст]: Монография / Ю.А. Геллер. – 4-е изд. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
6. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст]: Уч-к для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
7. Бялік, О.М. Металознавство [Текст]: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – 2-ге вид. перероб. і доп. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2008. – 384 с.
8. Гарнец, В.М. Матеріалознавство [Текст]: підручник / В.М. Гарнец. – К.: Кондор, 2009. – 386 с.

9. Геллер, Ю.А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи [Текст]: учебн. пособие / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 384 с.

10. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов [Текст]: Уч-к для вузов / Ю.М. Лахтин. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1993. – 447 с.

11. Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізовуглецевих сплавів [Текст]: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів I–III курсів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2014. – 46 с.

12. Вплив деформації та термічної обробки на структуру та властивості матеріалів, частина I (Вплив пластичної деформації на властивості металів і полімерних матеріалів) [Текст]: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2013. – 27 с.

13. Вплив деформації та термічної обробки на структуру та властивості матеріалів, частина II (Основи термічної обробки сталі) [Текст]: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2014. – 36 с.

14. Вивчення структури, властивостей та призначення конструкційних легованих сталей загального застосування [Текст]: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, В.І. Овчаренко. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 31 с.

15. Вивчення структури, властивостей та призначення спеціальних сталей і сплавів хімічного машинобудування [Текст]: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, В.І. Овчаренко. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 40 с.

### *Довідкова література*

1. Ануфриев, И.С. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст]: справ. изд. / Под ред. И.Н. Жестковой. В 3т. Т.1.-8-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.

2. Гжиров, Р.И. Краткий справочник конструктора [Текст]: справочник / Р.И. Гжиров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. – 464 с.

3. Справочник по конструкционным материалам [Текст]: справ. изд. / Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.

4. Марочник сталей и сплавов [Текст]: справочник / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

5. Тылкин, М.А. Справочник термиста ремонтной службы [Текст]: справ. изд. / М.А. Тылкин. – М.: Metallургия, 1981. – 648 с.

6. Марочник сталей и сплавов [Текст]: справочник / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др.; Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.

7. Журавлев, В. Машиностроительные стали [Текст]: справочник, изд. 3-е, перераб. и доп / В.Н. Журавлев, О.И. Николаева. – М.: Машиностроение, 1981. – 391 с.

## Додаток А

Таблиця А.1

Взаємозв'язок між частотою струму, товщиною загартованого шару  
і діаметром виробу

Частота струму, Гц	Глибина нагріву, мм	Мінімальний діаметр виробу, мм
50	15–80	100–200
1000	3–17	22–44
2400	2–11	14–28
4000	1,5–9	11–22
8000	1–6	8–16
10000	0,9–5,5	7–14
70000	0,3–2,5	2,7–5,4
400000	0,2–1,0	1,1–2,2

Гартування з індукційним нагріванням застосовується як для сталевих, так і для чавунних виробів (колінчасті та розподільні вали, гільзи циліндрів тощо).

Така обробка поліпшує властивості виробів:

- практично не відбувається короблення деталей, окислення поверхні і вигорання вуглецю та інших елементів;
- утворюється дрібне зерно аустеніту, а отже, і мартенситу, що сприяє підвищенню  $\sigma_B$  до 1200–1300 МПа при збереженні досить високих показників пластичності ( $\delta - 20\%$ );
- значно (на 40–50%) підвищується опір втомному руйнуванню завдяки виникненню у поверхневому шарі залишкових напружень стиску.

Технологічними перевагами методу є:

- значно менші витрати електроенергії, оскільки нагрівається тільки тонкий поверхневий шар деталі (не більше 5 % загального об'єму металу);
- висока продуктивність (тривалість циклу  $\approx 30$ );
- точне і легке регулювання глибини загартованого шару, можливість автоматизації процесу;
- здійснення гартування безпосередньо у потоковій лінії механічної обробки без переривання технологічного циклу виробництва;
- поліпшення умов праці робітників.

Однак слід мати на увазі високу вартість обладнання для поверхневого гартування, тому застосування цього методу рентабельне лише в умовах масового і серійного виробництва.

## Додаток Б

### Сталі, що цементуються

Сталі цієї групи призначені для виготовлення деталей, що підлягають цементації. До них належать сталі з кількістю вуглецю  $\leq 0,3\%$ .

Як відомо, сталі після цементації піддають гартуванню і низькому відпуску. Ступінь зміцнення серцевини обумовлюється прогартуваністю сталі, що в свою чергу залежить від легування.

Залежно від ступеня зміцнення серцевини внаслідок термічної обробки ці сталі поділяються на 3 групи: з незміцнюваною серцевиною, зі слабо зміцнюваною серцевиною, із сильно зміцнюваною серцевиною.

Приклади марок сталей і властивості, які вони отримують після термічної обробки, наведені в табл. Б.1.

Таблиця Б.1

Властивості сталей різних груп після цементації, гартування і низького відпуску

Група	Приклади сталей	Властивості			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
I. З незміцнюваною серцевиною	15, 20, 25	470	300	30	60
II. Зі слабкозміцнюваною серцевиною	20Г, 20Х, 20ХН	850	700	15	55
III. Із сильнозміцнюваною серцевиною	18ХГТ, 20ХГР, 25ХГМ, 18Х2Н4ВА	1300	1160	14	55

У сталях першої групи після кінцевої термообробки структура в серцевині внаслідок малої прогартуваності залишається феритно-перлітною, а їх властивості відповідають рівню незагартованого стану.

З підвищенням легування в серцевині з'являються ділянки з мартенситною структурою. При легуванні, що забезпечує наскрізну прогартуваність виробу, у серцевині отримати чисто мартенситну структуру. Однак у зв'язку з тим, що мартенсит в серцевині виробу є мало вуглецевим, при високій міцності він не втрачає своєї пластичності –  $\Psi$  залишається на рівні 55% (табл. Б.1).

Конкретну марку сталі для тієї чи іншої деталі вибирають з урахуванням умов і вимог до виробу: легконавантажені деталі, основною вимогою до яких є висока зносостійкість поверхні, виготовляють з вуглецевих і низьколегованих сталей (групи I і II, табл. Б.1). Для важко навантажених виробів використовують сталі групи III.