

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПРАКТИКУМ З ТЕОРІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ТА ПРОЦЕСІВ

Навчальний посібник

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів, які навчаються
за напрямом підготовки «Інженерна механіка»*

Запоріжжя • ЗНТУ • 2013

УДК 621.74.01 (075.8)

ББК 34.61-01я73

П 69

*Гриф надано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України
(лист № 1 / 11-5795 від 26.04.2012)*

Колектив авторів:

Г. А. Бялік, канд. техн. наук – розділи 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8;

В. В. Наумик, доктор техн. наук, професор – розділи 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8;

Е. І. Цивірко, доктор техн. наук, професор – розділи 9, 10, 11, 12;

О. Ф. Кузовов, канд. техн. наук, доцент – розділи 9, 10, 11, 12;

В. В. Луньов, доктор техн. наук, професор – розділи 9, 10, 11, 12

Рецензенти:

В. К. Заблоцький доктор техн. наук, проф., завідувач кафедри технології та обладнання ливарного виробництва Донбаської державної машинобудівної академії;

С. А. Воденніков доктор техн. наук, проф., декан металургійного факультету, завідувач кафедри чорної металургії Запорізької державної інженерної академії;

В. В. Гіржон доктор физ.-мат. наук, проф., завідувач кафедри фізики металів Державного вищого навчального закладу «Запорізький національний університет».

Практикум з теорії ливарних сплавів та процесів : навч.
П 69 посіб. / [Бялік Г. А., Наумик В. В., Цивірко Е. І. та ін.]. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013. – 98 с.

ISBN 978-617-529-069-9

В книзі наведено набір лабораторних робіт з теорії ливарних сплавів та процесів в основі яких полягають розробки кафедри «Машини та технологія ливарного виробництва» Запорізького національного технічного університету.

Книга призначена для викладачів та студентів вищих навчальних закладів, які вивчають курси «Теорія ливарних сплавів», «Теоретичні основи ливарного виробництва», «Ливарна гідравліка» та інші подібні спеціальні дисципліни.

УДК 621.74.01 (075.8)

ББК 34.61-01я73

©Бялік Г. А., Наумик В. В.,
Цивірко Е. І., Кузовов О. Ф.,
Луньов В. В.

©Запорізький національний
технічний університет (ЗНТУ),
2013

ISBN 978-617-529-069-9

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Лабораторна робота № 1. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ НА ЇХ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА РОЗТЯГНЕННЯ	6
2. Лабораторна робота. № 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	14
3. Лабораторна робота № 3. ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНОЇ ГУСТИНИ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	31
4. Лабораторна робота № 4. ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА У ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЯХ	38
5. Лабораторна робота № 5. ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЛАМІВ СТАЛІ	46
6. Лабораторна робота № 6. ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І МІКРОСТРУКТУРУ ЛИТОЇ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ	51
7. Лабораторна робота № 7. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ ФЕРИТНИХ ЗЕРЕН НА МЕЖУ ТЕКУЧОСТІ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ	63
8. Лабораторна робота № 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ НА РОЗМІР ЗЕРЕН ПЕРВИННОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	67
9. Лабораторна робота № 9. ВПЛИВ ПЕРЕГРІВУ РОЗПЛАВУ НА КРИТИЧНІ ТЕМПЕРАТУРИ ЛИВАРНОГО СПЛАВУ	73
10. Лабораторна робота № 10. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЛИВКИ НА РІДИНОТЕКУЧІСТЬ ЛИВАРНОГО СПЛАВУ	79
11. Лабораторна робота № 11. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВИТРАТИ ЛИВНИКОВОЇ СИСТЕМИ	84
12. Лабораторна робота № 12. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВИТРАТИ ЛИВНИКОВОЇ СИСТЕМИ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОЗОРОЇ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ	90
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	94
АЛФАВІТНО-ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	95

ВСТУП

Ливарне виробництво – основна заготівельна база сучасного машинобудування. За допомогою ливарних процесів можна одержати машинобудівні деталі будь-якої форми. Деякі галузі машинобудування, наприклад, будівництво авіадвигунів, взагалі не можуть існувати без ливарного виробництва.

Для виготовлення відливок використовують переважно не чисті метали, а сплави. Теорія ливарних сплавів та процесів передбачають вивчення основних механізмів зміцнення сплавів, методів визначення їх основних фізико-механічних та технологічних властивостей, створення науково обґрунтованих методів розрахунку режимів заливки форм, що забезпечує отримання якісних виливків, опанування основними методами розробки нових і удосконалення існуючих ливарних сплавів.

Лабораторний практикум призначений для закріплення теоретичних знань і набуття практичних навичок щодо визначення деяких важливих властивостей найбільш розповсюджених ливарних сплавів, вивчення впливу мікроструктури на механічні властивості металу.

Передбачено, що лабораторні роботи виконуються бригадами з трьох або чотирьох студентів.

Роботи виконуються послідовно. При виконанні конкретної роботи кожна з бригад студентів отримує свої зразки. Одна з бригад працює безпосередньо на обладнанні, інші бригади у той же час займаються обробкою дослідних результатів і оформленням звіту. Потім на обладнанні працюють інші бригади.

Після того, як усі бригади виконали експериментальні дослідження, вони обмінюються результатами цих досліджень. Потім кожен студент у звіті повинен виконати аналіз і узагальнення експериментальних даних.

На першому лабораторному занятті протягом 2 годин студент повинен вивчити зміст лабораторної роботи, повторити деякі теоретичні обґрунтування до даної роботи і написати короткий конспект. На наступних заняттях виконується експериментальна частина, обробляються результати експериментальних досліджень і оформлюється звіт.

Після виконання лабораторної роботи студент складає письмовий звіт, де зазначає короткі теоретичні відомості до даної роботи, перелік матеріалів, обладнання та інструменту, технологічні параметри основних процесів, схеми установок і приладів, результати обробки експериментальних даних і висновки.

В методичних вказівках використані розробки кафедри «Машини та технологія ливарного виробництва» Запорізького національного технічного університету. Розвиток теорії ливарних процесів, в тому числі її такого розділу, як ливарна гідравліка, сприяє підвищенню якості та зниженню вартості виливків.

1. Лабораторна робота № 1

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ НА ЇХ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА РОЗТЯГНЕННЯ

Мета роботи

Засвоїти методику випробування на розтягнення, визначити вплив хімічного складу ливарних сплавів на межі міцності, текучості, пластичні властивості, модуль пружності, теоретичну міцність.

Матеріали, обладнання та інструмент

Розривна випробувальна машина для статичних випробувань металів Р-10, зразки металів і ливарних сплавів для випробувань на розтягнення, папір для запису діаграм розтягнення, штангенциркуль.

Загальні відомості

Випробування на розтягнення – найбільш поширений метод статичних механічних випробувань. За допомогою цього методу можна визначити важливі механічні властивості сталі та чавуну як конструкційних матеріалів. До цих властивостей належать:

– межа пропорційності (умовна) $\sigma_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{F_0}$ – напруження, за яким

порушується пропорційне навантаженню зростання деформації. Коли $P < P_{\text{п}}$, то, якщо зняти навантаження, деформація зникає. Така деформація зветься пружною;

– межа пружності $\sigma_{0,01}$ або $\sigma_{0,05}$ – напруження, що відповідає залишковій деформації 0,01 або 0,005 відсотка від початкової довжини зразка;

– межа текучості (фізична) $\sigma_{\text{т}}$ – найменше напруження, за якого зразок деформується без явного збільшення розтягуючого навантаження;

– межа текучості (умовна) $\sigma_{0,2} = \frac{P_{\text{п}}}{F_0}$ – напруження при якому по-

довження досягає 0,2% від розрахункової довжини зразка. У деяких випадках можливі значення цієї величини $\sigma_{0,01}$;

– межа міцності (тимчасовий опір) $\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}}}{F_0}$ – напруження, відповід-

не найбільшому навантаженню в момент руйнування проби або зразка;

– дійсний опір розтягуванню $S = \frac{P}{F_k}$;

– відносне подовження $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$ – відношення

приросту довжини зразка в момент руйнування до початкової довжини зразку;

– відносне звуження $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta F}{F_0} \cdot 100\%$;

– відношення зменшення площини перерізу зразку в місці руйнування до початкової площини перерізу.

Машини для випробувань на розтягнення мають спеціальний пристрій, який фіксує на папері діаграму розтягнення. Типова діаграма розтягнення наведена на рис. 1.1.

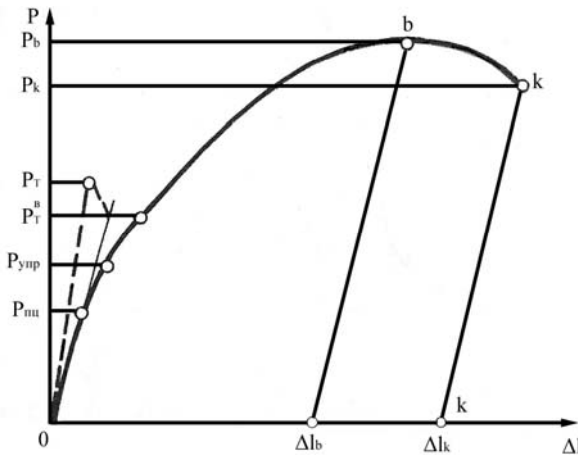


Рисунок 1.1 – Типова діаграма розтягування пластичних ливарних сплавів

Згідно стандарту температура при випробуванні на розтягнення повинна дорівнювати 20_{-5}^{+10} °C.

Зразки для випробування на розтягування виготовляються циліндричними або плоскими з розрахунковою довжиною $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{F_0}$ (короткі) або $l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{F_0}$ (довгі). Литі зразки і зразки з крихких матеріалів можна виготовляти з розрахунковою довжиною $l_0 = 2,82 \cdot \sqrt{F_0}$.

Для циліндричних зразків як основні беруть зразки діаметром $d_0 = 10$ мм, розрахунковою довжиною $l_0 = 50$ мм і 100 мм (рис. 1.2). Для визначення межі міцності при розтягуванні сірого чавуну основними є проби діаметром 20 мм. Під час виготовлення зразків на металорізальних верстатах температура зразків не повинна перевищувати $100\text{--}120^\circ\text{C}$, не допускається наклеп поверхневого шару. Припуск на останній прохід перед шліфуванням має дорівнювати не більше 0,3 мм, припуск на шліфування – 0,1–0,3 мм, шліфування виконують в умовах інтенсивного охолодження рідиною. Шорсткість R_a робочої частини зразка повинна бути не більше 0,63, а головок R_z – не більше 20 мкм.

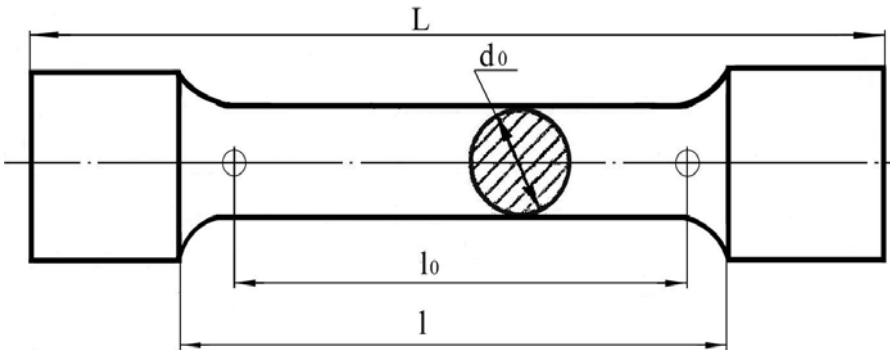


Рисунок 1.2 – Циліндричний зразок для випробувань на розтягнення

Машина Р-10 призначена для випробувань на розтягнення (рис. 1.3) і складається із навантажуючого пристрою і пульта керування. Навантажуючий пристрій призначений для деформування і руйнування зразку. Навантаження зразка здійснюється переміщенням траверси 2, яка пов'язана за допомогою тяг 3 і поперечини 4 із толоком гідравлічного циліндру 5. Навантаження на зразку визначається за тиском мастила у робочому циліндрі 5 за допомогою спеціального торсійного силівимірювача 1, розміщеного в пульта керування.

Пульт керування призначений для керування процесом навантаження зразку і контролювання за величинами навантаження і деформацій.

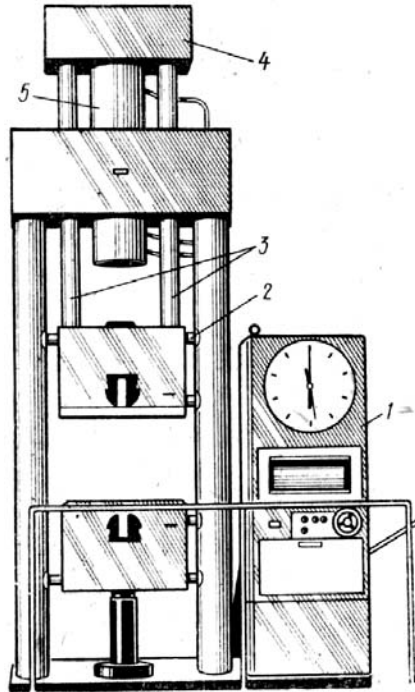


Рисунок 1.3 – Машина для випробувань металів і сплавів на розтягнення Р-10

До складу пульту керування входить помповий пристрій з системою керування, вимірювач навантаження і діаграмний пристрій для запису діаграми «навантаження – деформація».

Навантажуючий пристрій і пульт керування монтуються на міцному фундаменті і з'єднуються трубопроводами.

Технічні дані машини Р-10.

Найбільше навантаження – 100 кН.

Число діапазонів навантаження – 3.

Діапазон вимірювання навантаження: від 4 до 20 кН; від 10 до 50 кН; від 20 до 100 кН.

Масштаби діаграмного запису деформації: 5:1, 50:1.

Діапазон швидкостей руху захвату без навантаження від 0 до 200 мм / хв.

Методика проведення роботи

На головках зразків клеймами позначити марку сплаву, на робочій довжині навести поділки через кожні 5 або 10 мм керном. Можна позначити довжину двома поділками, виконаними за допомогою керна. Вимірити початкову розрахункову довжину l_0 з точністю до 0,1 мм за допомогою штангенциркуля.

Для визначення робочого перерізу F_0 виміряти в трьох місцях робочої частини зразку (по кінцях і всередині) діаметр d_0 , обчислити площину перерізу для кожного вимірювання і в табл. 1.1 занести найменші значення. Обчислені величини площини перерізу заокруглити відповідно до табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Величини заокруглення площини перерізу зразків

Площина перерізу, мм ²	Заокруглення, мм
від 2 до 10	до 0,01
від 10 до 20	до 0,05
від 20 до 100	до 0,1
від 100 до 200	до 0,5
більше 200	до 1,0

Внести в журнал випробувань маркірування і результати вимірів.

Закріпити зразок у пристосуванні машини і розтягнути його із записом діаграми. Визначити зусилля P_B і P_K за шкалою вимірювача навантаження на пульті керування машиною. Межу міцності, а також зусилля P_B і P_K можна визначити по діаграмі розтягування (див. рис. 1.1).

Коли на діаграмі «навантаження – деформація» є, так звана, платформа текучості – горизонтальна лінія, P текучості визначається безпосередньо (див. рис. 1.1).

Коли на діаграмі розтягнення немає платформи текучості, то треба визначити навантаження $P_{0,2}$ умовної межі текучості, для чого на діаграмі проводиться пряма ОА, яка збігається з прямолінійною частиною діаграми розтягнення (рис. 1.4). Через точку О проводиться вісь ординат ОР. Від точки О відкладається відрізок ОВ, який дорівнює завданому залишковому подовженню, тобто 0,2% від початкової розрахункової довжини зразка, збільшеному з урахуванням масштабу діаграми розтягнення. З точки В треба провести пряму, паралельну прямій ОА. Точка Д пересічення прямої ВС з кривою розтягування визначить навантаження $P_{0,2}$, яке відповідає умовній межі текучості.

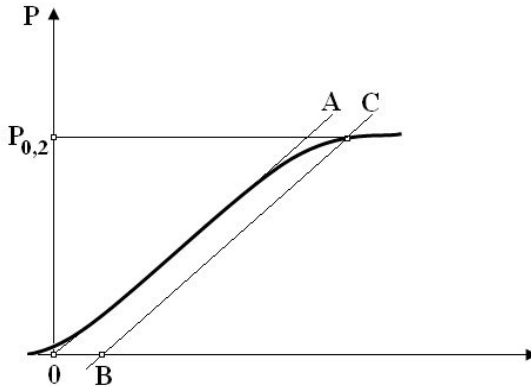


Рисунок 1.4 – Визначення по діаграмі розтягування навантаження умовної межі текучості

Для визначення розрахункової довжини зразку після руйнування l_0 половинки останнього складають, щільно притиснувши одну до одної. Довжину поміж кернами вимірюють з точністю 0,1 мм. Далі за наведеною вище формулою розраховується відносне подовження.

Для визначення відносною звуження вимірюють у круглому зразку найменший діаметр (у двох взаємно перпендикулярних напрямках) з точністю до 0,1 мм. Визначають середній діаметр d_k .

Обчислити площину перерізу F_k . За результатами визначення P_T , P_B , P_K та розмірами l_0 , l_k , F_0 , F_k обчислити за наведеними вище формулами σ_T , σ_B , S_k , δ , ψ і занести результати в табл. 1.2.

Модуль пружності визначається за формулою:

$$E = \frac{\sigma_{II}}{\varepsilon}, \quad (1.1)$$

Вихідні дані для обчислення P_{II} і ε визначають по діаграмі розтягування (рис. 1.5). На ділянці діаграми, що знаходиться в галузі пружної деформації, наноситься точка E. З цієї точки треба провести пряму, перпендикулярну вісі ординат і визначити зусилля P_{II} .

Пряма, проведена з точки E перпендикулярно вісі абсцис, дозволяє (з урахуванням масштабу) визначити пружну деформацію, що відповідає навантаженню P_{II} . Для цього треба вимірити довжину відрізка ОК.

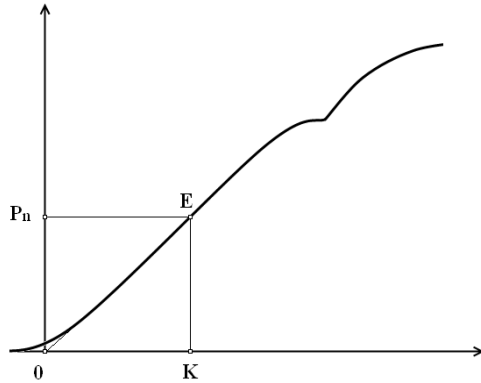


Рисунок 1.5 – Визначення навантаження і відповідної цьому навантаженню деформації на ділянці пружної деформації

Тоді, $\varepsilon = \frac{OK}{M} \cdot l_0$ (M – масштаб деформації на діаграмі).

Напруження $\sigma_n = \frac{P_0}{F_0}$.

Теоретична міцність металів і сплавів визначається за формулою:

$$\sigma_{Th} = \frac{E}{10}. \quad (1.2)$$

Контрольні запитання

1. Дати визначення основним міцнісним властивостям сплавів.
2. Пластичні властивості сплавів.
3. Вимоги щодо зразків, призначених для механічних випробувань на розтягування.
4. Будова машини для випробування сплавів на розтягування.
5. Визначення механічних властивостей сплавів по діаграмі «навантаження – деформація».
6. Визначення модулю пружності і теоретичної міцності сплавів.
7. Порівняння механічних властивостей чистих металів і сплавів на їх основі.

2. Лабораторна робота № 2 ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ

Мета роботи

Вивчити теоритичні відомості та освоити практичні навички щодо визначення твердості ливарних сплавів.

Матеріали, обладнання та інструмент

Для проведення роботи треба мати прилади ТШ, ТК, ПМТ-3, зразки сталі, кольорових металів і сплавів, мікроскоп МПБ, калькулятор.

Загальні відомості

Твердість – це опір матеріалу місцевій пластичній деформації, яка виникає при втіленні в нього більш твердого тіла – індентора.

Твердість можна вимірювати різними засобами: вдавлюванням індентора під дією статичних і динамічних навантажень, дряпанням поверхні, а також за відскоком індентора, що вільно падає.

Найбільше використання мають методи, засновані на вдавлюванні. При вдавлюванні з досить великим навантаженням поверхневої шари металу під індентором і поблизу від нього одержують пластичну деформацію. Після зняття навантаження на зразку залишається відбиток. Особливість цієї деформації в тому, що вона відбувається тільки в невеликому об'ємі, оточеному недеформованим металом.

Малий об'єм деформованого металу дозволяє проводити випробування на поверхні тіл різної форми і розмірів, в дуже тонких шарах металу, без руйнування готового виробу визначати властивості матеріалу внаслідок існування кількісної залежності між твердістю пластичних сплавів і межею міцності.

Розрізняється два засоби визначення твердості вдавлюванням: визначення твердості (макротвердості) і мікротвердості. Основні засоби визначення твердості – за Роквелом, Брінелем і Вікерсом, для визначення мікротвердості використовується різновид методу Вікерса.

Випробування твердості за Брінелем відбувається вдавлюванням у зразок сталевий кульки певного діаметра під дією певного навантаження протягом заданого часу.

Схема випробування на твердість за Брінелем наведена на рис. 2.1, а. В результаті вдавлювання кульки на поверхні зразка

утворюється відбиток. Відношення навантаження P до площини поверхні одержаного відбитка (кульового сегмента) дає число твердості, що позначається HB .

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (2.1)$$

Поверхня F кульового сегмента обчислюється за формулою:

$$F = \pi \cdot D \cdot h, \quad (2.2)$$

де D – діаметр кульки, мм;

h – глибина відбитку, мм.

Глибину відбитка визначити важко. Значно простіше вимірити діаметр відбитка і величину HB виразити через діаметри кульки D і відбитка d . У цьому випадку число твердості за Брінелем визначається такою формулою:

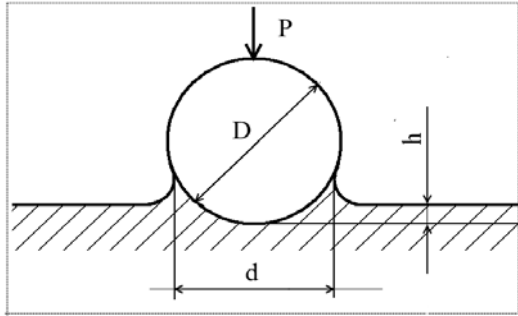
$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (2.3)$$

Найбільш розповсюдженим приладом для випробування твердості за Брінелем є автоматичний важільний прес (рис. 2.1, б). Зразок встановлюється на столі 22 у нижній частині нерухомої станини 17. За допомогою маховика 20 стіл приладу підіймають гвинтом 21 до підпори 23. Потім кнопкою 19 вмикають електродвигун 12, який через редуктор 16 і систему важелів 13, 9, 7 опускає великий вантажний важіль 6 і поступово через важілі 6 і 4 виконує навантаження шпинделя 2 і, відповідно, вдавлювання кульки, закріпленої в оправці 1 у метал під дією підвішених до вантажного важеля за допомогою підвіски 10 набором вантажів 11. Набір вантажів з підвіскою має власну вагу 75 кгс. (735 Н), але завдяки важелям 4 і 6 із співвідношенням 1:40 зусилля на кульці діаметром 10 мм складає 3000 кгс. (29430 Н). Це навантаження зберігається певний час, після чого двигун за допомогою перемикача 18 змінює напрям обертання і знімає навантаження. Після автоматичного вимкнення двигуна маховиком 20 опускається стіл приладу і знімають зразок.

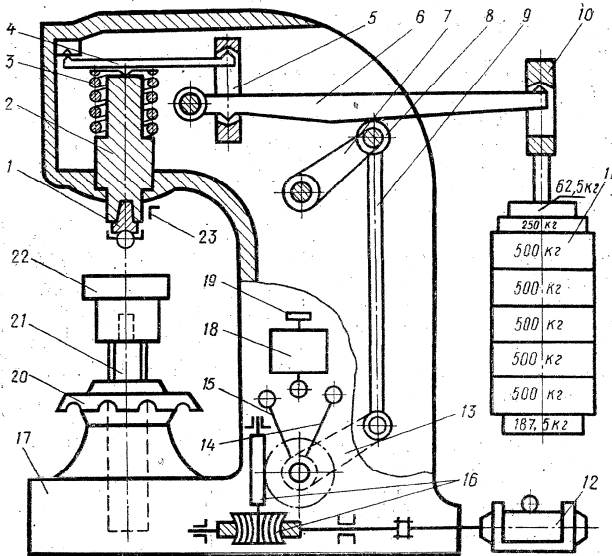
Діаметр відбитку вимірюють спеціальним мікроскопом МПБ-2, (рис. 2.2, а) окуляр якого має шкалу з поділками, які відповідають деся-

тим долям міліметра (рис. 2.2, б).

Мінімальна товщина зразка повинна бути не меншою за 10-ти кратну глибину відбитку. Відстань від центра відбитку до краю зразка повинна бути не меншою за 2,5, а між центрами двох сусідніх відбитків – не меншою за 4 їх діаметри.



а



б

Рисунок 2.1 – Прилад для випробування твердості за Брінелем
а – схема випробування твердості за Брінелем;

б – схема приладу ТШ з механічним приводом.

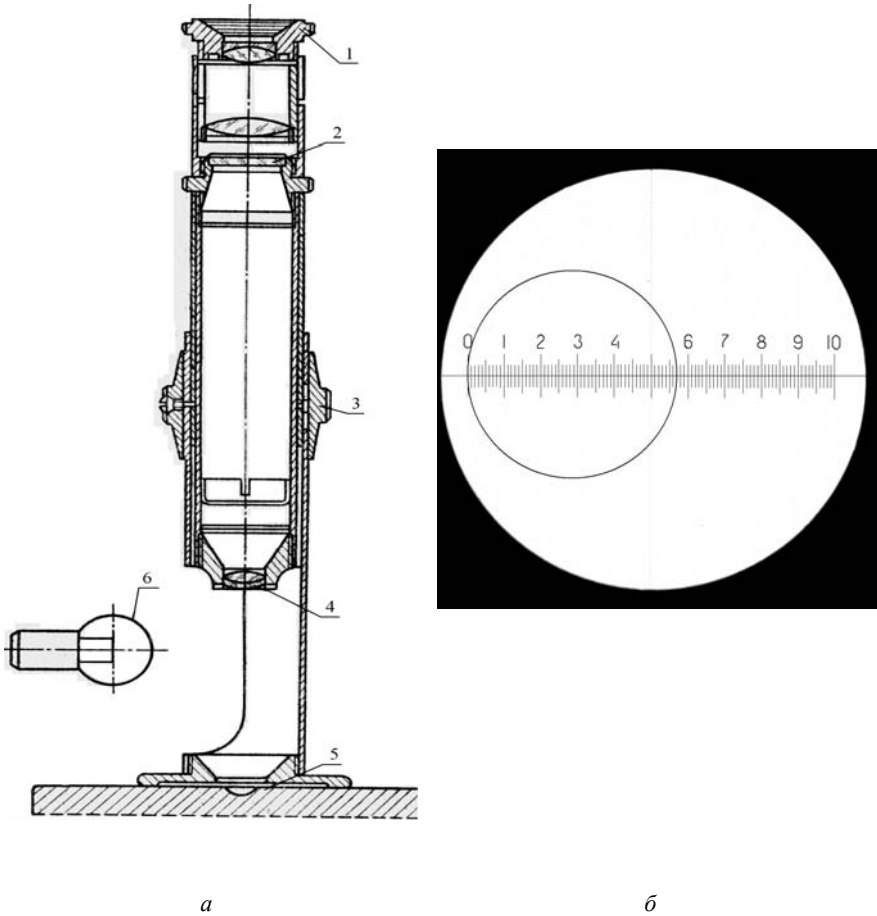


Рисунок 2.2 – Мікроскоп для вимірювання діаметру відбитків МПБ-2

1 – окуляр; 2 – шкала з поділками; 3 – кільце для фокусування;
4 – об'єктив; 5 – зразок з відбитком; 6 – джерело світла.

Існує приблизна кількісна залежність між числами твердості за Брінелем і межею міцності (табл. 2.1).

Верхня межа вимірювання твердості за Брінелем HB 450.

Таблиця 2.1 – Залежність між межею міцності і твердістю HB

Сплав	Залежність, HB
Сталь маловуглецева	0,34
Сталь середньовуглецева	0,35
Мідь, латунь, бронза відпалена	0,55
Мідь, латунь, бронза нагартована	0,4
Алюміній і німецькі алюмінієві сплави	0,33
Дюралюміній відпалений	0,36
Дюралюміній після гартування і старіння	0,35

При визначенні твердості сплавів за Роквелом індентор – алмазний конус або сталева кулька вдавлюється у зразок або виріб під дією двох послідовних навантажень: попередньої P_0 і загальної P , яка дорівнює сумі попереднього P_0 і основного P_1 навантажень (рис. 2.3).

$$P = P_0 + P_1 \quad (2.4)$$

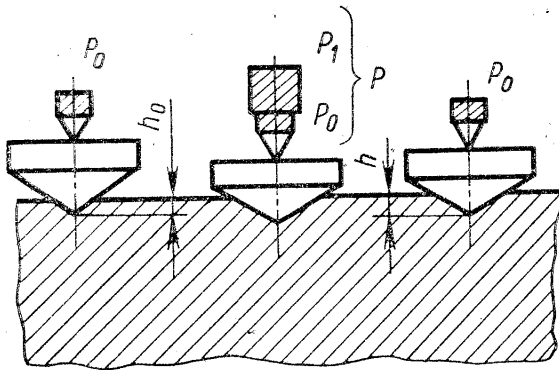


Рисунок 2.3 – Схема визначення твердості за Роквелом

Випробування виконують на твердомірах ТК (рис. 2.4).

Зразок встановлюється на підставку 10. За допомогою маховика 11 за часовою стрілкою підставку підіймають таким чином, щоб індентор почав вдавлюватись у поверхню зразка, при подальшому підйомі підставки починає рухатись стрілка індикатора 7. На циферблаті індикатора є дві шкали (чорна С і червона В, а також дві

стрілки – велика, покажчик твердості і маленька, що контролює попереднє навантаження. Підйом підставки подовжують до вдавнення індентора 9 під дією попереднього навантаження P_0 , що дорівнює 98 Н. Попереднє навантаження виконують для того, щоб виключити вплив пружної деформації і шорсткості поверхні зразка на точність вимірювань. Коли зразок одержить попереднє навантаження, велика стрілка на циферблаті приймає вертикальне або близьке до нього положення. Потім звільняють рукоятку 6, яка плавно за допомогою масляного амортизатора 4 рухається до підпору. Рух рукоятки передає зразку через важіль 5 основне навантаження P , величина якого залежить від вантажів 1, 2, 3. При цьому навантаженні велика стрілка рухається по циферблату проти часової стрілки. Термін дії основного навантаження 3–6 секунд. Після зняття основного навантаження стрілка індикатора починає рухатись по часовій стрілці і зупиняється на поділці шкали, вказуючи твердість за Роквелом. Потім, обертаючи маховик 11 проти годинникової стрілки, опускають підставку і звільняють зразок.

Твердість за Роквелом вимірюється в умовних одиницях. За одиницю твердості прийнята величина, яка відповідає вертикальному переміщенню індентора на 0,002 мм. Числа твердості за Роквелом визначають за формулами:

– при вимірюванні за шкалами А і С

$$HR = 100 - e;$$

– при вимірюванні за шкалою В

$$HR = 130 - e;$$

Величина e визначається за формулою:

$$e = \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (2.5)$$

де h_0 – глибина втілення індентора у зразок під дією навантаження P_0 ;
 h – глибина втілення індентора під дією загального навантаження P , яка вимірюється після зняття основного навантаження P_1 ;

Межі вимірювання твердості за шкалою А – 70 – 90, за шкалою С – 20 – 67, за шкалою В – 25 – 100.

Мікротвердість – це різновид визначення твердості за методом Вікерса. Від звичайного методу Вікерса визначення мікротвердості відрізняється дуже малими навантаженнями.

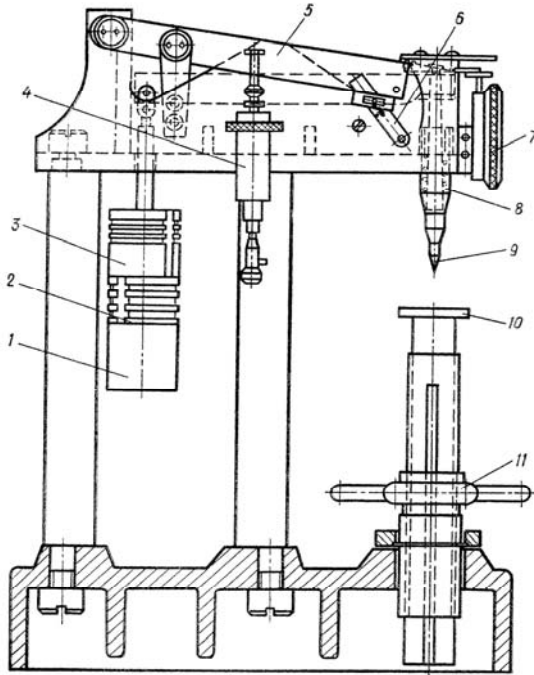


Рисунок 2.4 – Прилад ТК-2М для визначення твердості за Роквеллом

1, 2, 3 – набір вантажів; 4 – амортизатор; 5 – важіль; 6 – важіль з рукояткою; 7 – індикатор; 8 – пружина; 9 – індентор; 10 – підставка для зразків; 11 – маховик.

При визначенні мікротвердості чотиригранна алмазна піраміда (з кутом між протилежними гранями 136°) вдавлюється у випробуваний зразок під невеликим навантаженням від 0,05 до 5 Н. Число твердості визначається за формулою:

$$H = \frac{2 \cdot P \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (2.6)$$

де P – навантаження на піраміду, Н;

d – середнє арифметичне довжини двох діагоналей відбитка після зняття навантаження;

α – кут між протилежними гранями піраміди, рівний 136° .

Для визначення мікротвердості використовують прилад ПМТ-3 (рис. 2.5). Це вертикальний світловий мікроскоп з нижнім розташуванням шліфа, має два змінні об'єктива зі збільшенням 487 і 130 раз (зазвичай користуються збільшенням 487) і окуляр-мікрометр для вимірювання діагоналей відбитків.

Шток з індентором підвішений на м'якій пружині і до початку навантаження підтримується арегиром у верхньому положенні. На шток встановлюють вантаж від 0,05 до 2 Н. На рис. 2.6 наведена послідовність визначення мікротвердості.

Обертанням столика вибране місце на шліфі підводять під індентор – піраміду.

Вибір навантаження залежить від завдання вимірювання. Центр відбитку повинен бути віддалений від краю шліфа або від краю сусіднього відбитку не менше, чим на дві діагоналі відбитку. Якщо відбиток дуже близький до краю (втискування індентора полегшується), то значення твердості виходить заниженим. Якщо перший відбиток розташований дуже близько від другого, то другий відбиток знаходитиметься в зоні, вже наклепаній від першого втискування, тому твердість виходить завищеною.

При малому навантаженні велика відносна погрішність у вимірюванні відбитку і сильніше позначається якість шліфа. Тому бажано брати найбільше навантаження 2 Н (200 г).

Замість визначення числа твердості по формулі зазвичай користуються табл. 35–38 [1], розрахованими для навантажень 0,2; 0,5; 1,0 і 2,0 Н (20, 50, 100 і 200 г). Але якщо потрібно зміряти твердість окремого зерна, доводиться знижувати навантаження, поки відбиток не виявиться настільки малим, щоб по самі вінця зерна залишалися не менші дві діагоналі. Іноді це умову виконати не вдається, тоді набутих значень твердості треба розглядати як відносну характеристику. Навіть відбиток, що знаходиться далеко від видимої межі зерна, може давати завищене (або занижене) значення твердості через те, що під ним на невеликій глибині під поверхнею шліфа залягає інша фаза (твердіша або м'якша): індентор «упирається» в неї або, навпаки, «провалюється» крізь тверду кірку в м'яку підкладку. Тому розкид зміряних значень мікротвердості, як правило, є значно більшим чим при звичайних вимірюваннях твердості.

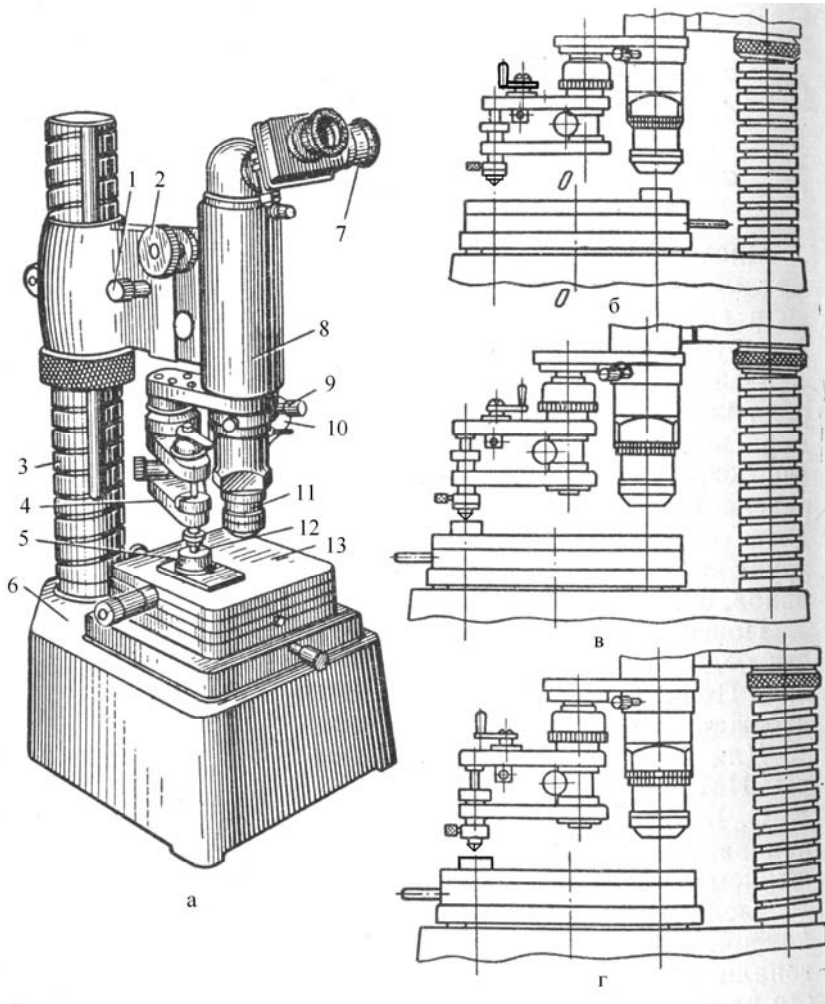


Рисунок 2.5 – Мікротвердомір ПМТ-3

a – загальний вигляд; *б, в, г* – схема послідовності навантаження.
 1 – механізм макроподачі; 2 – механізм мікроподачі; 3 – стійка; 4 – механізм навантаження; 5 – предмет; 6 – станина; 7 – окулярний мікрометр;
 8 – тубус; 9 – центрировка; 10 – освітлювач; 11 – об’єктив; 12 – алмазна піраміда; 13 – двокоординатний праметний столик.

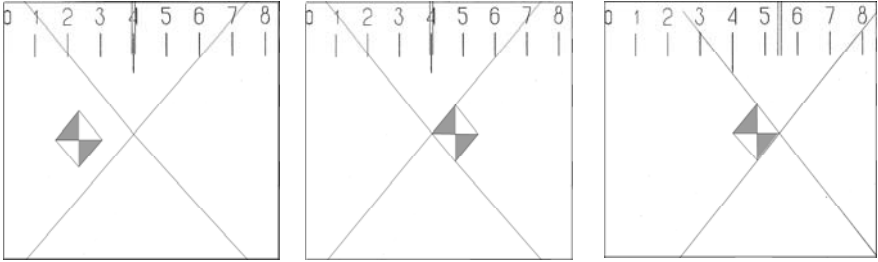


Рисунок 2.6 – Послідовне вимірювання діагоналі відбитку за допомогою окуляр-мікрометра

Вимірювання мікротвердості мають цінність тільки при правильній статистичній обробці значного числа вимірів. Окрім середнього значення мікротвердості, одержаного усереднюванням одиничних вимірів

одиничних вимірів H_i , $\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}$, необхідно указувати число вимірювань n і

середньоквадратичне відхилення $\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{H} - H_i)^2}{n}}$.

Знаючи середньоквадратичні відхилення, можна встановити, наскільки достеменні знайдені відмінності в твердості. При малому числі вимірювань достовірність відмінності визначається по розподіленню Стюдента.

Хай n_1 вимірювань мікротвердості на структурній складовій № 1 дали середнє \overline{H}_1 а на структурній складовій № 2 з n_2 вимірювань отримано середнє значення \overline{H}_2 . Обчисливши параметри:

$$\gamma = n_1 + n_2 - 2;$$

$$S^2 = \frac{n_1 \cdot (\delta H_1)^2 + n_2 \cdot (\delta H_2)^2}{\gamma};$$

$$t = \frac{\overline{H}_1 - \overline{H}_2}{S} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}},$$

де γ – число ступенів свободи;

S – дисперсія;

t – параметр, по значеннях якого і γ знаходять з таблиць.

Значення P – вірогідність того, що дійсні твердості H_1 і H_2 однакові.

Величина $P = 0,9$ означає, що з вірогідністю більше 90% значення мікротвердості першого і другого зразків повинні співпадати. Малі значення P указують на існування достовірної різниці в твердості. Так, якщо $P < 0,05$, то з вірогідністю більше 95% можна стверджувати, що зразки № 1 і № 2 мають рівну твердість. Оскільки P залежить від n_1 і n_2 , достеменність знайденого співпадіння або різниці зростає зі збільшенням кількості вимірювань n_1 і n_2 .

Зміст роботи

Ознайомитися з основними методами визначення твердості – за Роквелом, Брінелем і методом визначення мікротвердості. Ознайомитися з конструкцією приладів ТШ, ТК, ПМТ-3. Практично на зразках різних сплавів визначити твердість методами Брінеля, Роквела, а також мікротвердість. Використовуючи результати попередньої роботи, визначити зв'язок міцності і твердості. Зробити висновок з виконаної роботи.

Ознайомитися з основними методами визначення твердості – за Роквелом, Брінелем і методом визначення мікротвердості. Ознайомитися з конструкцією приладів ТШ, ТК, ПМТ-3. Практично на зразках різних сплавів визначити твердість методами Брінеля, Роквела, а також мікротвердість. Використовуючи результати попередньої роботи, визначити зв'язок міцності і твердості. Зробити висновок з виконаної роботи.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити методичні вказівки.
2. Підготувати до роботи прилад ТШ.
3. Встановити еталонний зразок на столі приладу.
4. За методикою, наведеною у загальних відомостях, нанести відбиток індентору на зразок.
5. За допомогою мікроскопу МПБ (рис. 2.4) визначити діаметр відбитку.
6. За формулою або таблицями визначити твердість HV і порівняти з позначеною на еталоні.
7. Визначити діаметри відбитків різних сплавів, результати занести у табл. 2.2.
8. За формулою або таблицями визначити твердість різних сплавів і занести у табл. 2.2.
9. Розрахувати коефіцієнти, що пов'язують міцність і твердість для різних сплавів.
10. Підготувати до роботи прилад ТК.
11. Установити зразок на підставку приладу 10 і маховиком 11, піднімати маховик 11 до упирання зразку у обмежувальний чохол.
12. Встановити малу стрілку індикатору на червону крапку, а велику – на нуль.
13. Увімкнути механізм навантаження.
14. Після закінчення циклу навантаження виконати підрахунок за шкалою індикатора.

Таблиця 2.2 – Протокол визначення твердості за Брінелем

Метал (сплав)	Діаметр кульки, мм	Діаметр відбитку, мм	Твердість, HV	Міцність, МПа

15. Результати випробувань занести у табл. 2.3.
16. Підготувати до роботи прилад ПМТ-3.
17. За допомогою об'єкт-мікрометра визначити ціну поділки окуляр-мікрометра.
18. Закріпити шліф сплаву на металевій плоскопаралельній пластині за допомогою пластиліну.
19. Встановити пластину зі шліфом на стіл приладу і обертанням столу підводять зразок під об'єктив мікроскопу.

20. Сфокусувати мікроскоп на поверхні шліфа, вивести у перехрестя окуляр-мікрометра місце визначення мікротвердості.

21. Встановити на шток індентора потрібні важки, що відповідають вибраному навантаженню.

22. Обертанням столу підвести шліф під індентор.

Таблиця 2.3 – Протокол випробування на твердість за Роквелом

№ п / п	Сплав	Шкала	Твердість <i>HRC</i>

23. Повільно на протязі 15 секунд відвести аретир на себе, при цьому індентор втілюється у шліф. Після 5-ти секундної витримки плавно підіймають індентор, повертаючи аретир у початкове положення.

24. Підводять шліф під мікроскоп обертанням столу.

25. Вимірюють діагональ відбитку (див. рис. 2.6). Результати відрахунків занести у відповідні графи табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Протокол випробувань на мікротвердість

№ п / п	Метал, (сплав)	Навантаження, Н	Перший відрахунок	Другий відрахунок	Довжина, <i>d</i>		Мікротвердість, МПа
					у поділках барабану	у мкм	

26. Визначити довжину діагоналі відбитку в мкм, для чого довжину діагоналі у поділках барабану помножити на ціну однієї поділки у мкм. Ціна однієї поділки барабану окулярного мікрометра 0,3 мкм.

27. Визначити числа мікротвердості за формулою або табл. 2.5 і занести їх у табл. 2.4.

28. Визначити залежність між міцністю сплавів (графу 5 табл. 2.2) і їх мікротвердістю.

29. Зробити висновки з виконаної роботи.

Методика визначення мікротвердості

1. По відліку окуляр-мікрометра знаходять діагональ відбитку. Для цього потрібно знати ціну поділку a . Зазвичай $a = 0,3$ мкм, але її точне значення у різних приладів різне і залежить, крім того, від установки об'єктиву. Перед початком вимірювань треба визначити точне значення a . Для цього мікроскоп приладу наводять на об'єкт-мікрометр, який представляє скляну шкалу, розділену штрихами на 100 частин (по 10 мкм). Встановивши шкалу об'єкт-мікрометра паралельно напрямку руху перехрестя окуляр-мікрометра, обертають барабан окуляр-мікрометра і суміщають перехрестя з одним з штрихів об'єкту спочатку у правого, потім у лівого краю поля зору і знімають значення n_1 і n_2 з окуляр-мікрометра – сотні по оцифрованих штрихах в полі зору, десятки й одиниці по барабану. Одночасно відлічують число поділок об'єкту, що уклалися між лівим і правим положенням перехрестя. Необхідно брати n рівним 10 і 20 малим поділкам на шкалі об'єкт-мікрометра. Ціну поділка визначають за формулою:

$$a = \frac{10 \cdot n}{n_1 - n_2} \text{ мкм / поділку барабана.} \quad (2.6)$$

Величину діагоналі відбитку в мікрометрах визначають за формулою:

$$d_{\text{мкм}} = a \cdot d_{\text{под}}, \quad (2.7)$$

де $d_{\text{под}}$ – розмір діагоналі в поділках окуляр-мікрометра.

Для прискорення роботи можна побудувати на міліметрівці, використовуючи табл. 35–38 [1] (залежно від застосованого навантаження) і формулу (2.7), графік в координатах діагональ $d_{\text{под}}$ – твердість H для значень $H = 100$ – 600 і потім знаходити всі значення за графіком без перерахунку. При установці освітлювача необхідно дотримуватися обережності, оскільки зрушення освітлювача приведе прилад в непридатність. Роботу на приладі проводять при затиснутому гвинті (див. рис 2.5). Перевіряють центровку оптичної вісі мікроскопа. Для цього пластином прикріплюють шліф до металевої пластини і ручним пресом встановлюють площину шліфа паралельно підставі пластини. Пластину з шліфом встановлюють на столику і наводять мікроскоп на по-

верхню шліфа. Обертанням відлікового барабану встановлюють перехрестя окуляр-мікрометра в центрі поля зору (на поділку «4»). Переміщенням столика мікрогвинтами підводять вибране для уколу місце під перехрестя окуляра. Повертають столик до упору, щоб шліф став під індентор.

Кожного разу, перш ніж обертати столик, необхідно переконатися, що індентор піднятий (арретир відведений від себе). Обертаючи столик при опущеному інденторі можна зламати алмаз!

Столик повинен повертатися в обидві сторони повністю до упору.

Після установки на штоку індентора важка, відповідного вибраному навантаженню, роблять відбиток. Для цього поволі (за 15 сек) відводять арретир на себе. Після 5-ти секундної витримки плавно піднімають індентор, арретир повертається в початкове положення.

Після підняття індентора обертанням столика підводять шліф під мікроскоп. Якщо відбиток значно віддалений від перехрестя, гвинтами 2 (див. рис. 2.5) обережно зміщують зображення відбитку до поєднання з перехрестям. Після цього роблять ще один пробний відбиток.

2. Перевіряють навантажуючий пристрій. Проводять цикл навантаження без вантажу. Відбитку не повинно бути. Після цього дають навантаження з гирею в 0,005 Н (0,5 г), тоді повинен з'явитися відбиток. В цьому випадку навантажуючий пристрій от'юстировано правильно і задає навантаження з точністю до 0,005 Н (0,5 г). Якщо відбитку немає в обох випадках, треба обережно, помалу повертати гайку (праворуч від арретира) у напрямі стрілки «вниз», кожного разу даючи навантаження при 0 і 0,005 Н (0,5 г), поки не з'явиться відбиток при навантаженні 0,005 Н (0,5 г). Якщо, навпаки, відбиток є і без вантажу, треба обертати гайку по стрілці «вгору».

3. Приступають до вимірювання мікротвердості.

Зробивши на вибраному зерні відбиток, вимірюють його діагональ. Для цього обертанням барабана окуляр-мікрометра суміщають перехрестя спочатку з двома лівими, а потім з двома правими гранями відбитку (див. рис. 2.6).

Різниця відбитків окуляр-мікрометра дає довжину діагоналі; з графіка або за формулою чи за таблицею знаходять число твердості. Якщо центр відбитку незначно не потрапляє на перехрестя, то його слід підвести за допомогою мікрогвинтів столика.

Відбиток часто має нерівний контур, в цьому випадку перехрестя слід підводити так, щоб площа виступаючої за перехрестя частини відбитку була рівна площі усередині перехрестя, не зайнятій відбитком.

Правильний відбиток повинен бути квадратним. Витягнутий відбиток свідчить про кривизну шліфа або його установку похилої. Здвоєний відбиток – результат неакуратного навантаження або поштовхів. Такі відбитки не вимірюють.

4. Результати вимірювань заносять в таблицю.

Зробивши переклад кожного зміряного значення діагоналі в твердість, знаходять середнє значення твердості (окремо по кожній фазі і для кожного спостереження). Оскільки залежність твердості від довжини діагоналі нелінійна, не можна спочатку обчислювати середню діагональ, а потім знаходити по ній твердість. Значення H записують у відповідну графу таблиці.

Контрольні запитання

1. Твердість та її вимірювання.
2. Випробування на твердість за Брінелем.
3. Випробування на твердість за Роквелом.
4. Зв'язок між міцністю і твердістю.
5. Випробування на твердість за Вікерсом. Мікротвердість.
6. Статистична обробка отриманих результатів вимірювань.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНОЇ ГУСТИНИ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ

Мета роботи

Засвоїти визначення фізичної густини деяких чистих металів, а також ливарних сплавів, які виплавляються на їх основі, методом гідростатичного зважування.

Матеріали, обладнання та інструмент

Пристрій для визначення фізичної густини методом гідростатичного зважування, електронні терези, зразки з деяких металів і сплавів, зокрема сталь, алюміній, силумін, мідь, латунь, нікель, вольфрам, титан.

Загальні відомості

Фізична густина ρ – один із найважливіших якісних показників ливарних сплавів, особливо при використанні останніх для транспортних засобів. Визначення густини – це один з попередніх методів визначення якості металів і сплавів.

Фізична густина – це маса одиниці об'єму метал або сплаву.

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.1)$$

де m – маса, кг;
 V – об'єм, м³.

Величина, зворотна густині, називається питомим об'ємом v і відповідає об'єму одиниці маси: $v = \frac{1}{\rho}$.

Густина волоконних, пористих і порошкових матеріалів вимірюється по насипній масі, що враховує об'єм всього матеріалу, включаючи усі несплошності. Відносна густина є відношенням реальної густини до густини еталонної речовини.

Найбільш чутливими з методів визначення густини твердих тіл є пікнометричний, флотажний, гідростатичний і рентгенівський.

Пікнометричний метод полягає у визначенні маси і об'єму рідини, витисненої із спеціальної судини (пікнометра) зануреним в нього досліджуваним зразком.

Спочатку досліджуваний зразок зважується в повітрі. Потім в ретельно промитий і висушений пікнометр заливають вище мітки допоміжну рідину, нагрівають до кипіння для видалення газів і витримують в термостаті до необхідної температури (зазвичай 20°C). Від точності підтримки температури залежить похибка визначення густини. Так, при точності $\pm 0,1^\circ\text{C}$ погрішність не перевищує декілька одиниць в четвертому знаку. Надлишок води над міткою видаляють піпеткою або фільтрувальним папером. Після витягання пікнометра з термостата, протирання, сушки і досягнення температури навколишнього середовища його зважують.

Аналогічні операції проводять і з пікнометром із зануреним в нього зразком. У останньому випадку рівень води в пікнометре, поміщеному в термостат, встановлюють по мітці після занурення в рідину зразка.

Густина зразка для температури t :

$$\rho_t = \frac{m \cdot d_t - (m_2 - m_1) \cdot \sigma}{m - (m_2 - m_1)}, \quad (3.2)$$

де d_t – густина допоміжної рідини при температурі t ;

σ – густина повітря;

m – маса зразка в повітрі;

m_1 – маса пікнометра з допоміжною рідиною;

m_2 – маса пікнометра із зразком, зануреним в допоміжну рідину.

Точність визначення пікнометричним методом досягає $5 \cdot 10^5 \text{ г / см}^3$. При методі флотації підбирається рідина з такою густиною, яка порівнялася б з густиною поміщеного в неї зразка. густина і коефіцієнт об'ємного розширення рідини повинні бути відомі з достатньою точністю. Метод використовується для невеликих зразків легких металів ($\rho = 2-3 \text{ г / см}^3$). Для цього методу створені спеціальні установки – градієнтні колони, в яких можна створити стабільний по висоті градієнт густини. У такій колоні мірою густини матеріалу є висота, на якій він плаває в рідині. Точність вимірювань методом флотації рівна $5 \cdot 10^6 \text{ г / см}^3$.

Для визначення густини твердого тіла гідростатичним методом потрібно послідовно зважити це тіло в повітрі і в допоміжній рідині. Густина визначається за формулою:

$$\rho_t = \frac{m_1 \cdot d_t - m_2 \cdot \sigma}{m_1 - m_2}, \quad (3.3)$$

де m_1 – маса зразка в повітрі;

m_2 – маса зразка в рідині при температурі t .

У дослідженнях зручно використовувати гідростатичні ваги Мору. При співвідношенні плечей ваг 10:1 точність вимірювання зростає в 10 разів в порівнянні із зважуванням на рівноплічних вагах. Можна також користуватися пружинними вагами Еліша, вертикальними вагами Нікольсона і т.п.

Прецизійне визначення густини може бути використане навіть для вивчення точкових дефектів структури реального кристала. Відносна зміна щільності, викликана наявністю надмірних вакансій, вимагає чутливості вимірювання більше $1 \cdot 10^{-4}$. Підвищення чутливості може бути досягнуте при одночасному зважуванні дуже близьких по масі і розмірам зразка і еталону з одного і того ж матеріалу (диференціальний метод гідростатичного зважування). Зміна густини зразка:

$$\Delta\rho = \frac{\Delta m \cdot \rho^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot m}, \quad (3.4)$$

де Δm – різниця мас зразка і еталону;

m – маса зразка;

ρ – абсолютна густина зразка;

$\rho_{\text{ж}}$ – густина рідини.

Іноді обчислюють відносну зміну густини:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta m \cdot \rho}{\rho_{\text{ж}} \cdot m}. \quad (3.5)$$

Точність визначення густини залежить від точності визначення маси зразка в рідині. Бажано, щоб густина рідини була близька до щільності досліджуваного зразка. У рідині повинні бути можливо малий коефіцієнт об'ємного розширення, достатньо низька температура твердіння і досить висока температура кипіння, мале поверхневе натягнення, хороша змочуваність матеріалу підвіски. Діаметр нитки підвіски повинен бути постійним по всій довжині. Перед зважуванням нитку слід ретельно очистити.

Рентгенівський метод дозволяє отримати уявлення про густину елементарного осередку кристалічної структури. Метод заснований на визначенні кристалічної густини матеріалу по його атомній масі A , об'єму елементарного осередку V і числу укладених в ній атомів n :

$$\rho = \frac{n \cdot A}{N \cdot V}, \quad (3.6)$$

де N – число Авогадро.

Об'єм осередку обчислюють по її зміряних параметрах (розмірам ребер, осьових кутів), а число атомів в осередку визначається типом кристалічної решітки. Для багатьох досліджуваних металів значення A відомі з достатньою точністю. Завдання полягає у визначенні об'єму осередку. Підтримка необхідних умов зйомки дозволяє отримати достатню точність розрахунку параметрів ґрат. Можливість точного визначення інтерференційних ліній погіршується при їх розмитті через мікроспотворення II роду, неоднорідності твердого розчину і т.п. В цьому випадку рекомендується зйомка рентгенограм з еталоном і подальше мікрофотографування.

Точність визначення густини рентгенівським методом вище за точність інших методів унаслідок наявності в реальному кристалічному матеріалі пір і інших макро- і мікродефектів, що знижують щільність. Відмінність в значеннях щільності може дати інформацію про недосконалість кристалічної решітки.

Так, якщо макроскопічна густина більше мікроскопічною, можна говорити про наявність упроваджених атомів. У зворотному випадку в металі переважають вакансії (дефекти Шотки) або різного виду дислокації. Домішки можуть по-різному впливати на густину залежно від атомного діаметру, атомної маси, розчину втілення або заміщення.

Пристрій для визначення фізичної густини методом гідростатичного зважування (рис. 3.1) складається із штативу 1, тримача ваг 2, електронних ваг 3, підвіски 4, на якій підвішується зразок 5, судини з рідиною 6, тримача судини 7, механізму для пересування судини у вертикальному напрямку 8.

Зразок (рис. 3.2) повинен бути ретельно відшліфованим. Він підвішується на підвіс ваг за допомогою тонкої мідної дротинки.



Рисунок 3.1 – Пристрій для визначення фізичної густини методом гідростатичного зважування

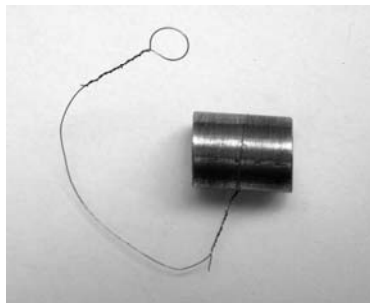


Рисунок 3.2 – Зразок

Спочатку на електронних вагах треба зважити зразок і визначити масу m_1 . Точність електронних терезів, які використовують в пристрої, 0,01 г. На платформу електронних ваг встановлюють підвіс. За допомогою дротинки зразок підвішують на гачок підвісу. Потім під зразок

підводять судину з дистильованою водою, рис. 3.3, *а*. Вмикають електронні терези, на табло повинна з'явитися цифра 0. За допомогою механізму переміщення підіймають судину з водою до повного занурення зразка в воду (рис. 3.3, *б*). На табло терезів з'явиться значення маси зі знаком «-». Це – маса, яку втратив зразок після занурення ($m_1 - m_2$).

Фізичну густину обчислюють за формулою (3.3).

Зміст роботи

Ознайомитися з основними методами визначення фізичної густини. Вивчити метод гідростатичного зважування. Ознайомитися з будовою пристрою для визначення густини методом гідростатичного зважування. Практично визначити густину деяких металів і сплавів на їх основі. Порівняти густину чистих металів і сплавів на їх основі. Зробити висновки з виконаної роботи.



а



б

Рисунок 3.3 – Послідовність зважування зразка

а – на повітрі; *б* – при зануренні у воду.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити методичні вказівки.
2. Заповнити судину дистильованою водою
3. Увімкнути електронні ваги і послідовно зважити зразки на повітрі. Результати занести у табл. 3.1.
4. Встановити на платформу ваг підвіс.
5. Почепити на гачок підвісу перший зразок.

6. Підвести судину з рідиною під зразок.
7. Увімкнути ваги. На табло повинно встановитися «0.00»
8. Підняти судину з рідиною таким чином, щоб зразок повністю занурився у рідину.
9. Зафіксувати на табло масу, $\Delta m = m_1 - m_2$, яку втратив зразок (зі знаком «-») і занести у табл. 3.1.
10. За формулою (3.3) визначити фізичну густину зразку.
11. Пункти 1–10 повторити послідовно для всіх наявних зразків.
12. Результати вимірювань густини занести у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання густини

№ п / п	Метал (сплав)	Втрата маси у рідині, Δm , кг	Маса зразка, кг		Густина, кг / м ³
			на повітрі	у рідині*	
1	Мідь				
2	Латунь				
3	Алюміній				
4	Силумін				
5	Нікель				
6	Титан				
7	Вольфрам				

* Маса у рідині визначається за формулою $m_2 = m_1 - \Delta m$.

Контрольні запитання

1. Що таке Фізична густина?
2. Методи визначення густини твердих тіл. Пікнометричний метод.
3. Визначення густини твердого тіла методом гідростатичного зважування.
4. Конструкція пристрою для визначення фізичної густини методом гідростатичного зважування.
5. Визначення густини рентгенівським методом.

4. Лабораторна робота № 4 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА У ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЯХ

Мета роботи

Ознайомитися з основними методами виявлення аустенітного зерна в вуглецевих сталях. Практично навчитися визначати бал аустенітного зерна за стандартними шкалами, а також середній діаметр зерна методом пересічних.

Матеріали, обладнання та інструмент

Зразки вуглецевої сталі з різним розміром аустенітного зерна. Металографічний мікроскоп. Пристрій для високотемпературних досліджень металів і сплавів ІМАШ-20-78. Фотографії мікроструктури з аустенітним зерном. Лінійка, мікрокалькулятор.

Загальні відомості

Розмір аустенітного зерна – одна з найважливіших характеристик структури вуглецевої сталі. Коли сталь нагрівається до температури A_{c3} відбувається перлітно-аустенітне перетворення і утворюються перші зерна аустеніту. Нагрів сталі дещо вище A_{c3} спричиняє до швидкого закінчення перетворення перліту в аустеніт. Розмір аустенітного зерна має великий вплив на властивості сталі. Величина зерна аустеніту впливає на розмір зерна кінцевої структури. Як правило, чим більше зерно аустеніту, тим крупнішими утворюються зерна фериту і перліту. На межах аустенітних зерен розташовані шкідливі домішки, зокрема сірка. Тому чим дрібніше аустенітне зерно, тим більше загальна поверхня між зерен і, відповідно, менше питомий вміст шкідливих домішок, розташованих на межах. Тому крупнозерниста сталь має знижену ударну в'язкість у порівнянні з дрібнозернистою. Більшість сталевих деталей машин працює в складних умовах під дією одночасного навантаження на згин, розтягнення, а також знакозмінних навантажень. Для цих деталей слід використовувати дрібнозернисту сталь. З другого боку, крупнозерниста сталь гартується на більшу глибину, ніж дрібнозерниста, тому вона має переваги перед останньою при використанні для виготовлення крупногабаритного ріжучого інструменту, наприклад, свердел і фрез.

Зміст роботи

Ознайомитися з впливом розміру аустенітного зерна на фізико-механічні властивості вуглецевої сталі. Вивчити основні методи виявлення аустенітного зерна. Ознайомитися з конструкцією універсального вакуумного посту ВУП-5. Ознайомитися з методикою визначення розмірів аустенітного зерна за еталонними шкалами, а також методом пересічних. Практично на зразках і фотографіях визначити розмір аустенітного зерна.

Для виявлення аустенітного зерна на кафедрі МІТЛВ запропоновано прості у виготовленні зразки, які виготовляються із стандартних зразків після випробувань на ударний згин. Для нагрівання таких зразків використовується зроблений з вольфраму стрічковий нагрівач.

В пропонуваній лабораторній роботі використовується універсальний вакуумний пост ВУП-5, схема будови якого наведена на рис. 4.1.

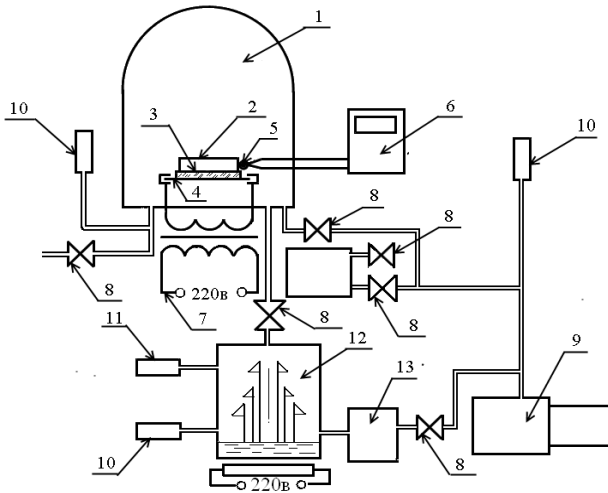


Рисунок 4.1 – Схема будови вакуумного універсального посту ВУП-5

ВУП-5 складається із вакуумної камери 1, в якій на стрічковому вольфрамовому нагрівачі 4 розташований сталевий зразок 2, ізолюваний від нагрівача слюдяною прокладкою 3, яка запобігає шунтуванню нагрівача зразком. Спай хромель-алюмелевої термопари 5 розташований в отворі, просвердленому у зразку. Протилежні кінці термопари приєднані до цифрового пірометричного мілівольтметра 6. Трансформа-

тор 7 призначений для контактної електронагріву нагрівача 4. Вакуум у вакуумній камері створюється за допомогою механічної 9 і паромасляної дифузійної 12 помп, які з'єднуються через вакуумний балон 13. Керування вакуумною системою здійснюється за допомогою електромагнітних вакуумних клапанів 8. Рештній тиск в вакуумній системі визначається термодатчиками 10 і іонізаційним датчиком 11.

Величина аустенітного зерна оцінюється за балами порівнянням з еталонними шкалами. Більш надійним є метод визначення середнього розміру аустенітного зерна. Для цієї мети використовується метод пересічних (рис. 4.2). Через поверхню зразку, на якій виявлено аустенітне зерно, проводять декілька пересічних. Підраховується кількість пересічень ліній з межами зерен. Вимірюється загальна довжина пересічних l . Середній розмір аустенітного зерна визначається за формулою:

$$d = \frac{M \cdot l}{n}, \quad (4.1)$$

де l – загальна довжина пересічних;

M – масштаб;

n – кількість пересічень.

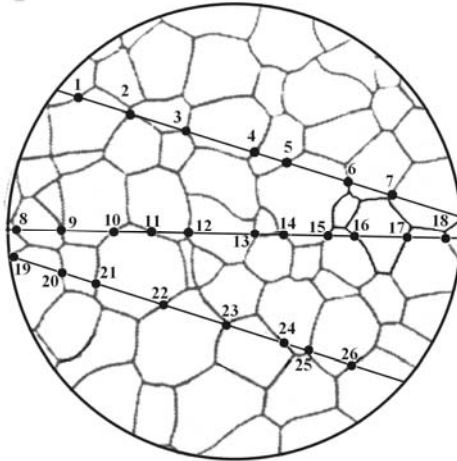


Рисунок 4.2 – Метод пересічних для визначення середнього розміру аустенітного зерна

Практично при використанні методу пересічних краще користуватися мікрофотографіями аустенітної структури.

Між середнім розміром і балом аустенітного зерна існує певна залежність (рис. 4.3).

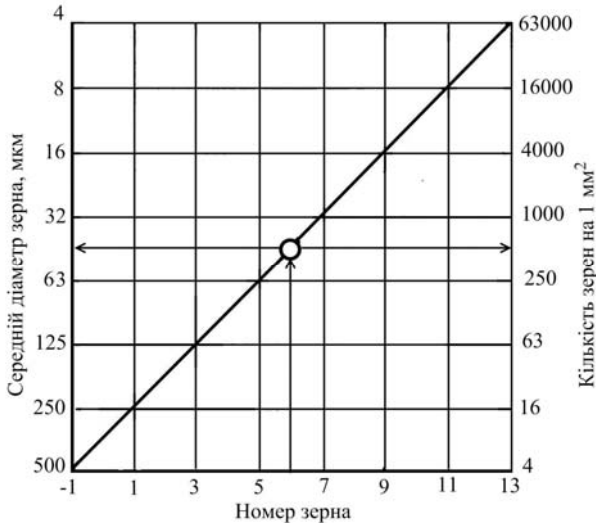


Рисунок 4.3 – Номограма, яка пов'язує середній розмір зерна з кількістю зерен на 1 мм² і номером зерна за шкалою ГОСТ 5639 – 82

Порядок виконання роботи

1. Вивчити методичні вказівки.
2. Відкрити вакуумну камеру приладу ВУП-5 і установити на нагрівач зразок.
3. Увімкнути механічний насос. Довести остатній тиск у камері до ступеня $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.
4. Увімкнути дифузійний насос. Через 45 хвилин остатній тиск у камері повинен дорівнювати 10^{-4} мм рт. ст.
5. Увімкнути нагрів зразку. За допомогою регулюючих пристроїв довести температуру зразка до 930°C . Витримати зразок при зазначеній температурі 5–7 хвилин.
6. Поступово за допомогою регулюючих приладів охолодити зразок до температури 400°C . Вимкнути нагрів зразка. Охолодити зразок у вакуумі до температури 100°C .

7. Відкрити вакуумну камеру, спочатку заповнивши її повітрям. Зняти зразок з нагрівача.

8. Вивчити два зразки з різним розміром аустенітного зерна під оптичним мікроскопом при збільшенні 100. Порівняти з еталонними шкалами (рис. 4.4) і визначити розмір (бал) аустенітного зерна.

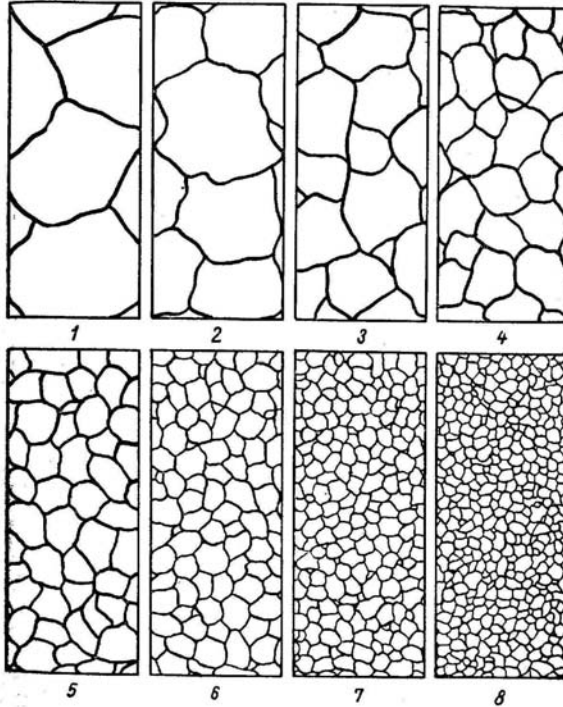


Рисунок 4.4 – Еталонні шкали для визначення розмірів зерна (ГОСТ 5639-82)

9. На мікрофотографії з зображенням аустенітного зерна нанести три пересічні. Підрахувати кількість пересічень. Визначити загальну довжину пересічних. За формулою (4.1) розрахувати середній розмір аустенітного зерна.

10. За номограмою (рис. 4.3) визначити бал аустенітного зерна. Результати досліджень оформити у вигляді таблиці.

11. Зробити висновки по роботі.

Таблиця 4.1. Результати досліджень аустенітного зерна.

№ зразка	Кількість пересічень	Загальна довжина пересічень, мкм	Середній діаметр аустенітного зерна, мкм	Номер (бал) аустенітного зерна

Методика проведення роботи

Виявлення аустенітного зерна у вуглецевих сталях – досить складна задача. Існує декілька методів виявлення аустенітного зерна, які поділяються на непрямі і прямі. Непрямі методи засновані на утворенні при температурі дещо вище A_{c3} на межах аустенітних зерен фаз, які зберігаються і добре виявляються при кімнатній температурі. Найбільш відомі три непрямі методи: окислення, цементації і гартування (ізотермічний метод).

Метод окислення заснований на тому, що хімічна активність металу на поверхні зерен і на їх межах різна. Метал на межах зерен відрізняється підвищеною хімічною активністю. Коефіцієнт дифузії по межах аустенітних зерен суттєво перевищує аналогічний показник в середній частині зерна. Тому кисень просякає по межах зерен на більшу глибину. Для методу окислення застосовують циліндричні зразки діаметром 10–15 і висотою 15 мм. Вони розміщуються в печі з окислювальною атмосферою і витримуються 30 хвилин при температурі $930 \pm 10^\circ\text{C}$. Для рівномірного окислення торців зразок повинен дотикатися до поду печі циліндричною поверхнею. Після нагріву і втримання зразок охолоджується на повітрі або у воді. Шар окислів, що утворюється на поверхні зразка, не скрізь однаковий по товщині. Якщо шляхом шліфування і полірування частково зняти окисну плівку з поверхні зразка, то під мікроскопом можна побачити темні окисли, які у вигляді сітки оторочують межі зерен. Краще ця сітка виявляється після травлення у 4% спиртовім розчині HNO_3 . Виготовлення якісного шліфа потребує багаторазової поліровки при постійному контролю структури під мікроскопом.

Метод цементації використовується для маловуглецевої сталі. Зразки для цього метода мають такі розміри: діаметр 12–15 мм і висоту 10 мм, які повинні бути без слідів окислення і зниженого вмісту вуглецю.

Цементацію виконують при $930 \pm 10^\circ\text{C}$ у середовищі енергійно діючого карбюризатора, який складається з 40% BaCO_3 і 60% дерев'яного вугілля. Зразки з карбюризатором витримують при згаданій температурі 8 годин, після чого охолоджують разом з піччю. Із зразків робляться металографічні шліфи, які після травлення в 4% розчині в спирті азотної кислоти, або в киплячому водному розчині нітрату натрію (відповідно цементитна сітка виглядає, як темна на білому фоні, або світла на темному фоні).

Метод гартуванні (ізотермічний) можна застосувати для сталі з різним вмістом вуглецю. Після нагріву зразків до 930°C їх швидко переносять в іншу піч з температурою 650°C . Розпад аустеніту починається по межах зерен. У доевтектоїдній сталі по межах зерен утворюється феритна сітка, в заевтектоїдній – цементитна сітка, по яким і оцінюється величина аустенітного зерна.

В багатьох випадках зразок після часткового перетворення аустеніту в процесі ізотермічного втримання при $650\text{--}700^\circ\text{C}$ гартують. В такому випадку утворений по межах зерен аустеніту перліт виглядає під мікроскопом, як темна сітка на світлому фоні мартенситу.

Усі перелічені непрямі методи виявлення аустенітного зерна відрізняються деякою нестабільністю і потребують певної доводки щодо конкретних марок вуглецевих сталей. Навіть вуглецева сталь однієї марки, або різних варіантів кінцевого розкислення, потребує суттєвого коректування режимів термообробки і травлення зразків, що зв'язане з додатковою витратою часу. Непрямі методи виявлення аустенітного зерна не абсолютно достеменні, тому рекомендується для підвищення надійності визначати аустенітне зерно для однієї марки сталі щонайменше двома непрямыми методами.

Прямий метод виявлення аустенітного зерна – вакуумне термічне травлення. Засновано на переважнім випарюванні металу безпосередньо біля меж зерен. Метод відрізняється підвищеною достеменністю, тому не потребує підтвердження іншими методами і може вважатися, як еталонний. Помітний рельєф на межах аустенітних зерен при вакуумному травленні утворюється за кілька хвилин.

Для цього методу потрібне спеціальне обладнання. Найбільш придатними є, так звані, високотемпературні мікроскопи, на яких можна безпосередньо спостерігати процес виявлення аустенітного зерна.

Контрольні запитання

1. Вплив аустенітного зерна на властивості сталі.
2. Виявлення аустенітного зерна методом окислення.
3. Виявлення аустенітного зерна методом цементації.
4. Виявлення аустенітного зерна методом гартування (ізотермічним методом).
5. Виявлення аустенітного зерна методом вакуумного травлення.
6. Метод оцінки величини аустенітного зерна за еталонними шкалами.
7. Оцінка величини аустенітного зерна методом пересічних.
8. Визначення номеру і середнього розміру аустенітного зерна за номограмою.

5. Лабораторна робота № 5 ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЛАМІВ СТАЛІ

Мета роботи

Виконати дослідження зломів вуглецевої сталі, визначити характер поверхні руйнування металу.

Матеріали, обладнання та інструмент

Злами вуглецевої сталі після випробування на ударний згин, збільшувальне скло, трансмісійний (що просвічує) електронний мікроскоп, вакуумний пост ВУП-5, ВЕВ-камера, комп'ютер.

Загальні відомості

Термін «фрактографія» виник у 1944 році для визначення науки, що вивчає поверхні руйнування, хоч металурги займаються вивченням зламів вже на протязі багатьох віків. Значення фрактографії для теорії ливарних сплавів визначається тим, що вона, по-перше, з'являється ефективним засобом аналізу причин експлуатаційних пошкоджень, а, по-друге, забезпечує отримання вичерпної інформації відносно мікро-механізмів руйнування металу.

Фрактографія поділяється на макрофрактографію і мікрофрактографію. Макрофрактографія припускає дослідження зламів при збільшеннях до 50 разів. Дослідження при збільшенні, що перевищує 50 разів, зветься мікрофрактографією.

Металурги використовують макрофрактографію при вивченні руйнування надрізаних зразків як надійний засіб оцінки якості металу. Класифікація макроскопічних особливостей зломів, розроблена в період від Реомюра до Бринеля, була узагальнена Тіманом у 1919 році і зараз використовується у такому вигляді:

1. Зернистий, або міжзеренний злам. Він також зветься крупнозернистим, блискучим, кристалічним.
2. Кристалічний внутризеренний злам – має дрібнозернисту структуру.
3. Шовковистий злам. Характеризується нитковидним малюнком на поверхні зруйнованих частин кристалів.
4. Зубчастий злам. Відноситься до зломів неправильної форми з гострими зазублинами. В окремих випадках такий злам зветься голчастим.

5. Волокнистий злам. Другі назви цього злому шиферний або шаруватий.

6. Стовпчастий злам. Особливо грубий вид злому в периферійних зонах нетермооброблених виливків.

Макрофрактографічні дослідження виконуються неозброєним оком, або за допомогою приладів малого збільшення.

Мікрофрактографічні дослідження можна виконати за допомогою світлового мікроскопу при збільшеннях до 1000 разів. Але порівняно невелика глибина різкості цього приладу (приблизно 0,25 мкм.) робить можливим дослідження тільки невеликих фрагментів поверхні руйнування. Глибина різкості електронних мікроскопів майже на три порядки перевершує можливості світлового мікроскопу. Тому електронний мікроскоп є більш досконалим приладом для вивчення зламів.

Зараз найбільш поширені два види цих приладів: трансмісійний електронний мікроскоп і растровий електронний мікроскоп.

Спрощена схема трансмісійного електронного мікроскопа наведена на рис. 5.1. Джерело випромінювання, 1, так звана, електронна гармата утворює пучок прискорених електронів, які фокусуються на об'єкт 3 за допомогою конденсорної електромагнітної лінзи 2. За допомогою об'єктивної лінзи 4 створюється первісне і зображення 5. Кінцеве зображення 6, створене за допомогою проекційної лінзи 7, можна спостерігати на люмінесцентнім екрані і реєструвати на фотопластинці.

Об'єкти повинні бути прозорі для прискорених електронів. Товщина δ об'єкта при напрузі що прискорює 100 кВ. визначається емпіричною залежністю:

$$50 < \delta < 100 \text{ нм.}$$

δ залежить від порядкового номера елемента і густини (δ зменшується, коли порядковий номер або ρ збільшуються).

Злам – непрозорий для прискорених електронів об'єкт, тому для його дослідження на електронному мікроскопі, що просвічує використовують метод реплік. Репліка – це копія (відбиток) поверхні злому, прозорий для прискорених електронів.

Репліки звичайно виготовляють шляхом конденсації із пари вуглецю, титану та деяких інших речовин на поверхні злому. Цей процес здійснюється у вакуумі. Репліка відокремлюється від поверхні злому за рахунок електрохімічного розчинення матричної фази. Частинки другої фази (карбіди, неметалеві включення тощо) фіксуються у репліці в тих самих положеннях, в яких вони знаходились у зразку.

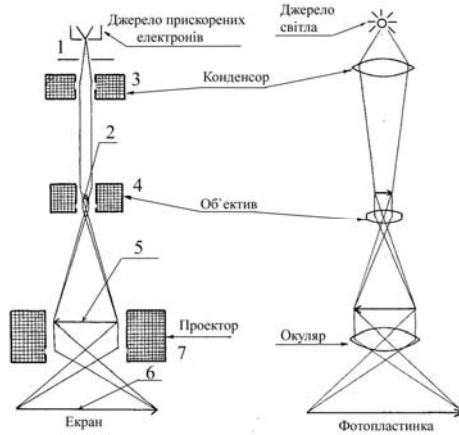


Рисунок 5.1 – Схема електронного мікроскопа, що просвічує

Растровий електронний мікроскоп (рис. 5.2) складається із джерела електронного випромінювання S . Створений за допомогою конденсорної K і об'єктивної O лінз електронний гострофокусний промінь діаметром 10 нм. сканує поверхню злому Ou . Генератор, що сканує SG забезпечує синхронний рух електронного променя на поверхні злому і екрані дисплею E за допомогою котушок, що відхиляють Sp . Вторинні електрони уловлюються детектором C , підсилюються підсилювачем V і використовуються для керування яскравістю на екрані дисплею. Для дослідження на растровому мікроскопі придатні масивні металеві зразки, зокрема реальні злами металів і сплавів.

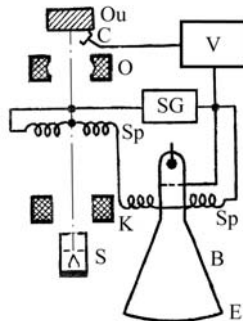


Рисунок 5.2 – Схема растрового електронного мікроскопа

Зміст роботи

Ознайомитися з макро- і мікроскопічними фрактографічними методами дослідження зломів. Візуально оцінити і визначити типи зламів зразків вуглецевої сталі. Підготувати електронний мікроскоп до роботи. Визначити мікроструктуру зламів при мікрофрактографічному дослідженні останніх на електронному мікроскопі, що просвічує.

Порядок виконання роботи

Розглянути неозброєним оком і за допомогою збільшувального скла три різні злами ударних зразків вуглецевої сталі. Кожна група студентів з 4–5 чоловік працює з одним зломом. Визначити тип зламу.

1. Підготувати до роботи електронний мікроскоп: включити прилад, перевірити юстировку, за допомогою проміжної і проєкційної лінз встановити збільшення $\times 4000$.
2. Ввести задалегідь виготовлену репліку через шлюзову камеру в колону електронного мікроскопа.
3. Розглянути мікроструктуру зламу, класифікувати її згідно еталонним мікрофрактограмам.

Методика проведення роботи

Макрозлами зразків після випробувань на ударний згин розділяються на крихкі межзеренні, крихкі внутризеренні та в'язкі. Тип зламу визначається методом порівняння з еталонними фрактограммами.

Крихкий міжзеренний злам має крупнокристалічну структуру з блискучими фасетками (рис. 5.3, *a*).

Внутризеренний крихкий злам має матову, дрібнозернисту поверхню (рис. 5.3, *б*). Обидва крихкі злами відрізняються незначною пластичною деформацією. В'язкий злам має помітні сліди пластичної деформації (рис. 5.3, *в*).

Зробити умовні, схематичні малюнки досліджених зломів вуглецевої сталі.

Розглянути мікроструктуру зламу під електронним мікроскопом. Порівняти зображення на люмінесцентному екрані мікроскопа з еталонними мікрофрактограммами і визначити тип зламу: крихкий внутризеренний, крихкий міжзеренний, в'язкий ямковий.

Крихкий внутризеренний злам характеризується специфічним ступінчастим рельєфом – так званим річковим узором (рис. 5.4, *a*). В'язкий злам має гніздову, ямкову будову (рис. 5.4, *б*).

Крихкий міжзеренний злам має малорельєфну, відносно гладку поверхню (рис. 5.4, в).

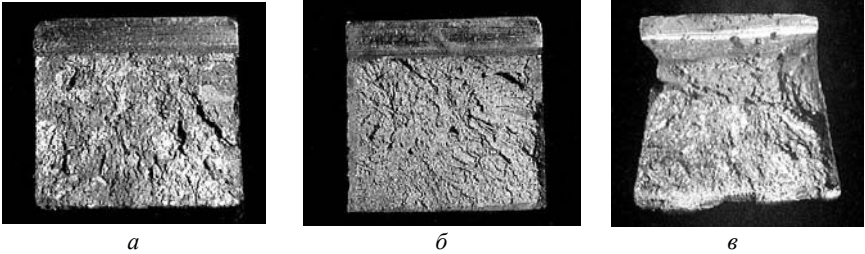


Рисунок 5.3 – Макрозлами сталі

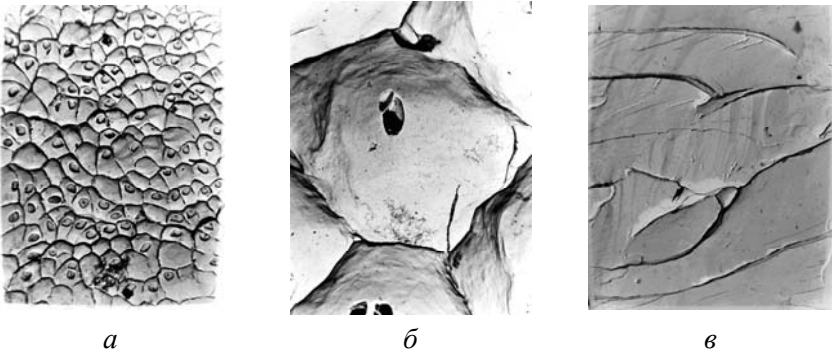


Рисунок 5.4 – Мікрозлами сталі

Контрольні запитання

1. Дати визначення терміну «фрактографія».
2. Збільшення, які використовують при макрофрактографічних і мікрофрактографічних дослідженнях.
3. Основні види макрозламів.
4. Основна перевага електронних мікроскопів у порівнянні зі світловими при мікрофрактографічних дослідженнях.
5. Принцип дії трансмісійного електронного мікроскопу.
6. Принцип дії растрового електронного мікроскопа.
7. Метод реплік і його використання для фрактографічних досліджень.
8. Основні види мікрозламів.

6. Лабораторна робота № 6 ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І МІКРОСТРУКТУРУ ЛИТОЇ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Мета роботи

Експериментальним методом визначити вплив основних видів термообробки на межі міцності, текучості, пластичні властивості, твердість і мікроструктуру литої вуглецевої сталі.

Матеріали, обладнання та інструмент

Для проведення роботи використовуються такі прилади: муфельна піч, металографічний мікроскоп, випробувальна машина Р-10, прилад ТШ для визначення твердості за Бринелем, годинник, зразки зі сталі 35Л, судина з водою.

Муфельна піч (рис. 6.4) складається з керамічного муфелю 1 у вигляді труби зовнішнім діаметром 27 мм і внутрішнім 20 мм з гвинтовою нарізкою, в яку укладено дротовий ніхромовий нагрівач. Рівномірність температури по довжині муфелю досягається тим, що витки нагрівання найбільш густо розподілені в крайових зонах муфелю і більш рідко – у середній. Муфель розміщений у корпусі 2. Нагрівач за допомогою двох токопідводів з жаростійкої сталі 3 з'єднуються з клеммами 4 на зовнішній поверхні корпусу. Між муфелем та кожухом розташовані два шари теплоізоляції: волокнисто-мінерального 5 і пі-ношамотного 6. Між шарами теплоізоляції прокладено відбивальний екран 7 з алюмінієвої фольги. З торцевих сторін нагрівач ізольований від корпусу керамічними ізоляторами 8 по 3 з кожного боку.

Загальні відомості

Термічна обробка – найпоширеніший метод зміцнення сплавів на основі заліза. При термообробці сталі зміцнення відбувається на другому ієрархічному рівні – мікроструктурі, тому механізм зміцнення можна досліджувати за допомогою світлового мікроскопу.

Існують чотири основні види термообробки сталі: гартування, нормалізація, відпусчення і відпалювання.

Гартування – це нагрів сталі вище температури A_{c3} , витримка і швидке охолодження у воді, масилі, розплавлених солях та інших середовищах. При гартуванні сталь отримує високу твердість і міц-

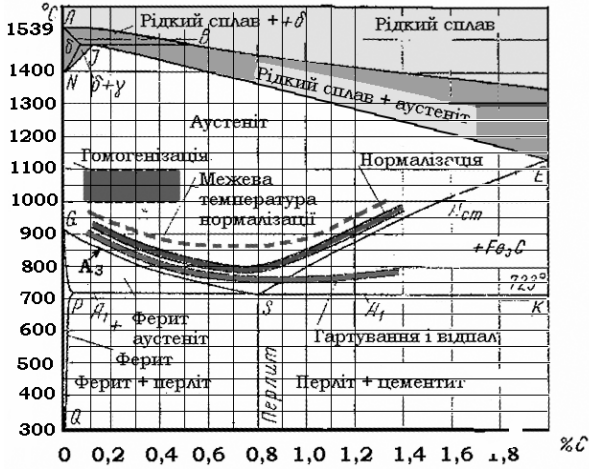


Рисунок 6.2 – Діаграма для визначення температури гартування, нормалізації, відпуснення і відпалення

При нормалізації сталі відбувається повна фазова перекристалізація, наступне охолодження у повітрі викликає перетворення аустеніту у феритно-цементитну суміш. Тому нормалізація є ефективним засобом усунення крупнозернистої структури, що одержується при литті.

Відпуснення сталі – це її нагрів до температури нижче A_3 ступня витримка і охолодження. Гартована сталь має нерівноважну структуру (зазвичай, мартенсит і остатній аустеніт). Мета відпуснення – перевести структуру сталі у більш рівноважний стан, надати їй потрібні кінцеві властивості. Також при відпусненні знімаються внутрішні напруження, що одержані при гартуванні. В залежності від температури відпуснення буває низьке, середнє і високе. При низькому відпусненні сталь нагрівають в температурному інтервалі 150–300°C. Це приводить до зниження внутрішніх напружень у сталі. В мартенситі відбувається виділення дуже дрібних карбідів – утворюється відпущений мартенсит. При низькому відпусненні твердість сталі знижується незначно і дещо підвищується в'язкість. Низькому відпусненню піддають ріжучий та вимірювальний інструмент з вуглецевих і легованих сталей. Звичайна тривалість відпуснення для деталей середніх розмірів складає 1,5–2 години.

При середньому відпущенні сталь нагрівають в інтервалі температур 300–500°C. При цьому мартенсит розпадається на дисперсну феритокарбідну суміш – троостит відпущення і повністю знімаються внутрішні напруження в сталі. Середнє відпущення значно знижує твердість і межу міцності. В'язкість металу підвищується. Середньому відпущенню піддають пружини, ресори, штампи.

Високе відпущення проводять при температурі 550–680°C. При високому відпущенні відбувається наступне: зерна фериту збільшуються, зростають і набувають кулястої форми зерна карбідів. Високе відпущення значно знижує міцнісні властивості і твердість, але досягаються максимальні показники пластичності і ударної в'язкості. Мікроструктура – сорбіт відпущення.

Відпалення – нагрівання сталі до певної температури, витримка і наступне повільне охолодження.

Відпалення може бути I роду і II роду. Відпалення I роду використовують для гомогенізації, сфероїзації, рекристалізації або зняття внутрішніх напружень. Відпалення другого роду використовують для одержання практичного рівноважного стану металу.

В залежності від змін у структурі сталі, відпалення може бути повним, неповним і низьким. При повнім відпалюванні відбувається фазова перекристалізація феритної і перлітної складової. Сталь нагрівається до температури на 30–50°C вище температури A_{c3} , витримується для завершення фазових перетворень і повільно охолоджується. Після повільного охолодження доєвтектоїдні сталі мають ферито-перлітну структуру, евтектоїдні – перлітну, заєвтектоїдні – перлітну і цементитну. Швидкість нагріву при відпаленні 100°C / год, витримка від 0,5 до 1 години. Швидкість охолодження для вуглецевих сталей від 150 до 200°C / год, легованих 10–100°C / год. Після завершення перетворення аустеніту у перліт охолодження можна вести на спокійному повітрі.

Структури, які одержують при основних видах термообробки та їх схематичні зображення наведені на рис. 6.3.

Муфель закривається за допомогою дверець 9 з кварцевим ілюмінатором 10. Температура у муфелі вимірюється хромель-алюмелевою термопарою 11. При відкриванні дверець електроживлення печі вимикається за допомогою блокуючого пристрою 12. Піч трьома електричними кабелями з відповідними роз'ємами 13 з'єднується з блоком керування печі.

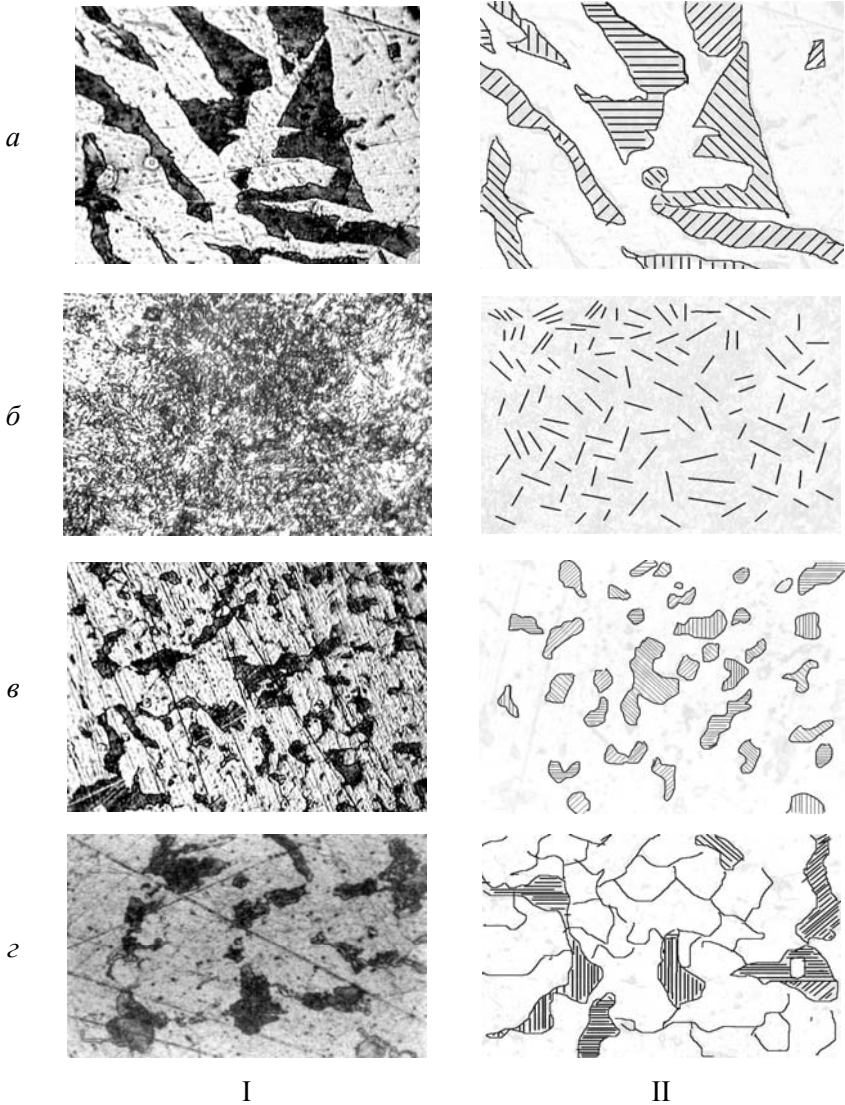


Рисунок 6.3 – Мікροструктура литої сталі

a – без термообробки; *б* – гартування; *в* – нормалізація; *г* – відпалення.

I – мікрофотографія; II – схематичний рисунок.

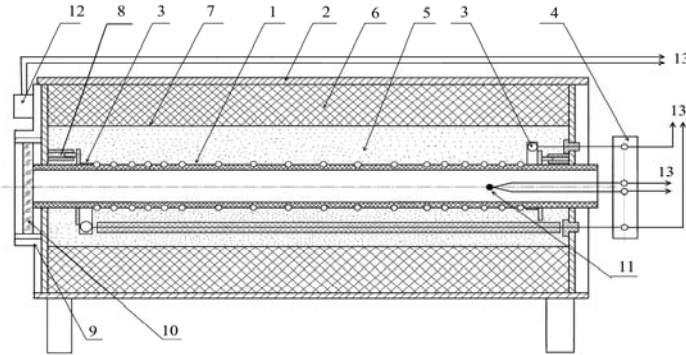


Рисунок 6.4 – Муфельна електропіч опору

Блок керування (рис. 6.5) містить у своєму складі вхідний пристрій 1, аналоговий контактний мілівольтметр ЕВ 3000К, який, в свою чергу, складається з двох джерел опорної напруги 1, 3; двох компараторів 2 та 4; вхідного перетворювача 5, кнопок режиму індикації 6, внутрішнього блоку живлення 7, буферного підсилювача 8, вимірювального механізму 9 і двох електромагнітних реле 10, які з'єднані з проміжним реле III. Останнє керує тиристорним регулятором IV. Стан печі визначається блоком індикації V. Блок живлення VI забезпечує електроживленням усі складові блоку керування печі. Цифровий мілівольтметр VII служить для точного вимірювання температури.



Рисунок 6.5 – Структурна схема блоку керування електропіччю

Спрощений металографічний мікроскоп ММУ-3 призначається для візуального спостереження непрозорих об'єктів у відбитому світлі при роботі у світлому й темному полі й у поляризованому світлі. Мікроскоп

може бути застосований у заводських лабораторіях і безпосередньо в цехах. На мікроскопі можна фотографувати зображення об'єктів за допомогою мікрофотонасадки МФН-7, МФН-8 або МФН-12 (насадки в комплект мікроскопа не входять).

Мікроскоп нормально працює в приміщенні з температурою повітря від + 10 до + 40°С и відносною вологістю не більше 80%.

При роботі у світлому полі промені від джерела світла 1 (рис. 6.6) проходять через колектор 2, теплофільтр 3, освітлювальну лінзу 4, діафрагму 5, відбиваються від плоскопаралельної напівпрозорої пластинки 6 і направляються через епіоб'єктив 7 на об'єкт 8. Таким чином, епіоб'єктив мікроскопа при роботі у світлому полі служить у якості конденсора для висвітлення об'єкта. Промені, відбиті від поверхні об'єкта, знову направляються в епіоб'єктив, що за допомогою лінзи 9 зображує об'єкт у фокальній площині окулярів 10.

При роботі в темному полі вимикається пластинка 6 і на місце лінзи 4 і діафрагми 5 устанавлюється діафрагма 11, центральна зона якої непрозора. У цьому випадку світло, пройшовши через кільцеву діафрагму 11, відбивається від кільцевого дзеркала 12 і у вигляді порожнього циліндра падає на параболічний конденсор 13, що концентрує пучок променів на об'єкті. При встановленому в якості об'єкта шліфа промені, дифузно відбиті від його нерівностей, попадають в епіоб'єктив і в поле зору мікроскопа нерівності зображуються світлими на загальному темному тлі.

Для роботи в поляризованому світлі в хід променів уводяться поляризаційні світлофільтри аналізатор 14 і поляризатор 15. Світлофільтр 16 підвищує контрастність об'єкта, який досліджується. Призма 18 поділяє світловий промінь надвоє. Один з променів надходить в окуляр 10 і призначений для візуального спостереження, другий – у цифрову відеокамеру 17, яка з'єднується з комп'ютером. На підставі 17 мікроскопа (рис. 6.7) устанавлений предметний столик 18, що може бути знятий із підстави при відпущеному гвинті 19. Предметний столик пересувається у горизонтальній площині у двох взаємно-перпендикулярних напрямках за допомогою рукояток 20 і 21. Величина пересування столика відлічується по шкалах і ноніусах з точністю до 0,1 мм. Поворот стола фіксується гвинтом 22; величина повороту відлічується по шкалі 23 із ціною розподілу 2°.

Колонка 26 (рис. 6.7), жорстко з'єднана з підставою несе на собі тубус і корпус 27 з механізмами мікрометричної фокусування грубої подачі тубуса з виведеними назовні рукоятками 28 і 29 відповідно і тубус.

У верхній частині тубуса укріплена бінокулярна насадка 30. При фотографуванні бінокулярна насадка знімається й замінюється фотонасадкою, що встановлюється на мікроскопі за допомогою перехідної втулки 31. Зображення 32 (рис. 6.7) яке можна бачити через окуляр мікроскопу та на екрані комп'ютера за допомогою VEB-камери 33 співпадають.

Відомості про випробувальну машину Р-10 і твердомір ТШ наведені у методичних вказівках до лабораторних робіт № 1 і № 2 даного посібника.

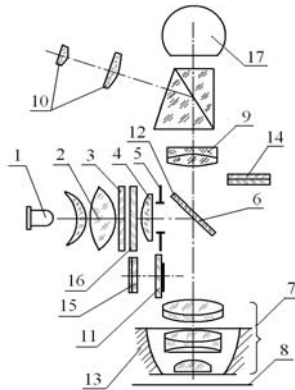


Рисунок 6.6 – Оптична схема мікроскопа ММУ-3

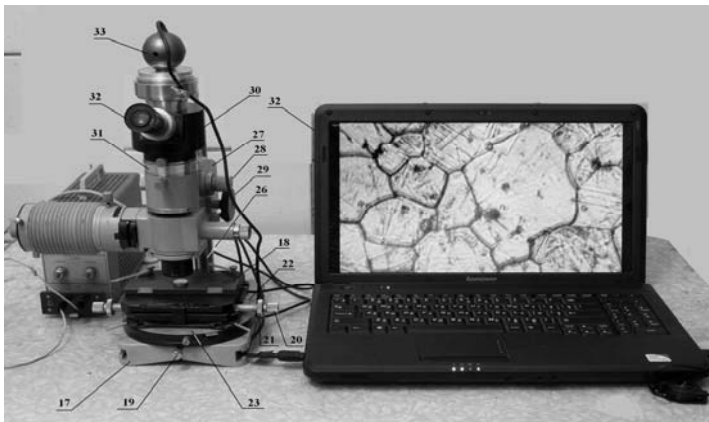


Рисунок 6.7 – Зовнішній вигляд мікроскопа ММУ-3, обладнаного VEB-камерою

Зміст роботи

Одержані результати: міцнісні і пластичні властивості литої сталі, термообробленої за різними режимами, твердість за Брінелем; особливості мікроструктури заносяться у табл. 6.1.

Звіт повинен містити:

- а) скорочені відомості про основні види термообробки сталі;
- б) схематичні малюнки основних видів мікроструктури литої сталі;
- в) таблицю з результатами механічних випробувань;
- г) висновки.

Методика проведення роботи

В роботі використовуються зразки литої сталі для випробувань на розтягнення діаметром 5 мм і загальною довжиною 55 мм. При проведенні роботи треба дотримуватись такого порядку:

1. Визначити твердість за Брінелем на вихідному зразку (лита сталь без термообробки).

2. За діаграмою на рис. 6.2 визначити температуру гартування.

3. Визначити час нагріву зразку за формулою: $t = (1,0 \dots 1,5) \cdot d$, хвилин, де d – діаметр зразка, мм.

4. Увімкнути муфельну піч і за допомогою блоку керування виставити температуру нагрівання під гартування.

5. Після досягнення температури гартування відкріпи муфельну піч і розмістити у муфелі зразок.

6. Після розміщення зразку температура у печі знижується. Відрахунок витримки зразку треба починати після відновлення у печі заданої температури.

7. Зразок нагрівають протягом часу τ і витримують при температурі гартування протягом $\tau / 5$.

8. Зразок охолоджують у воді.

9. Визначити твердість гартованого зразка за Брінелем.

10. За діаграмою 2 визначити температуру нормалізації для даної марки сталі (рис. 6.2).

11. За допомогою блоку керування відрегулювати температуру у печі таким чином, щоб вона відповідала визначеній температурі нормалізації.

12. Розмістити зразок у печі. Нагрів та витримку зразку виконати згідно пункту 7.

13. Відкрити піч, витягнути зразок і охолодити його на спокійному повітрі.

14. Визначити твердість нормалізованого зразка за Брінелем.

15. Визначити температуру низького відпускання для гартованого зразку і високого відпускання для нормалізованого зразку.

16. За допомогою блоку керування відрегулювати температуру у печі таким чином, щоб вона відповідала температурі високого відпускання.

17. Помістити нормалізований зразок у піч. Після досягнення температури відпускання витримати зразок при цій температурі 30 хвилин.

18. За допомогою блоку керування знизити температуру в печі зі швидкістю $150^{\circ}\text{C}/\text{год.}$ до температури 650°C , після чого відкрити піч і охолодити зразок на повітрі.

19. За допомогою блоку керування довести температуру в печі до визначеної температури низького відпускання.

20. Помістити зразок після гартування у піч і після досягнення температури низького відпускання витримати зразок у печі протягом 30 хвилин.

21. Витягти зразок з печі і охолодити його на повітрі.

22. Визначити на приладі ТШ твердість за Брінелем зразків після відпускання.

23. Результати випробувань твердості занести у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати випробувань

№ зразка	Варіант термообробки	Механічні властивості				Твердість <i>HB</i>	Мікроструктура
		σ_B	σ_T	δ	Ψ		

24. Підготувати зразки до випробувань на розтягнення.

25. Провести випробування на розтягнення термооброблених зразків литої сталі.

26. Результати випробувань занести у табл. 6.1.

27. З нетермообробленого і термооброблених зразків литої сталі виготовити металографічні шліфи.

28. Протравити поверхню шліфів у 4% спиртовому розчині азотної кислоти.

29. Провести спостереження мікроструктури на світловому металографічному мікроскопі при збільшенні в 100 та 400 разів. Визначити мікроструктуру для кожного зразку і схематично намалювати їх.

30. По мікроструктурі відпаленого зразка визначити вміст вуглецю у сталі згідно додатку.

Контрольні запитання

1. Які види термообробки застосовують для литих вуглецевих сталей?

2. Назвати структуру нетермообробленої литої сталі.

3. Яка структура утворюється після гартування?

4. Яка структура утворюється після нормалізації?

5. Як впливає відпускання на мікроструктуру сталі?

6. Як впливають основні види термообробки на міцність сталі?

7. Як впливають основні види термообробки на пластичні властивості сталі?

8. Як впливає термообробка на твердість литої сталі?

9. Як визначити режими основних видів термообробки для литої вуглецевої сталі?

Додаток

Визначення вмісту вуглецю у вуглецевих сталях металографічним методом

По мікроструктурі доєвтектоїдної сталі можна приблизно визначити вміст вуглецю. Для цього треба визначити вміст у мікроструктурі фериту і перліту.

В зв'язку з тим, що у фериті розчинена дуже невелика кількість вуглецю, практично можна вважати, що у доєвтектоїдній сталі практично весь вуглець знаходиться у перліті.

Виходячи з цього, вміст вуглецю в сталі можна визначити за формулою:

$$C = \frac{F_{\text{п}} \cdot 0,8}{100}, \%$$

де $F_{\text{п}}$ – площа, що займає перліт, %.

Площину перліту можна визначити методом кількісної металографії.

Досить ефективним є лінійний метод (ГОСТ 1778-70). Основою цього метода є принцип, згідно якому залежність між об'ємами двох тіл, що містяться між двома площинами, зберігається і для площини пересічень цих тіл паралельними площинами.

7. Лабораторна робота № 7 ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ ФЕРИТНИХ ЗЕРЕН НА МЕЖУ ТЕКУЧОСТІ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Мета роботи

Визначити коефіцієнти рівняння Петча-Хола для вуглецевої литої сталі і розрахувати очікувані значення межі текучості для сталі з різними розмірами феритних зерен. За цим рівнянням розрахувати межу текучості для сталі з певним розміром феритного зерна.

Матеріали, обладнання та інструмент

Зразки вуглецевої сталі з різними розмірами феритних зерен для механічних випробувань на розтягнення і металографічних досліджень. Машина Р-10 для випробування на розтягнення. Металографічний мікроскоп ММУ-3. Об'єкт-мікромметр. Мікрокалькулятор.

Загальні відомості

Межа текучості – одна з найважливіших механічних властивостей сталі. Межа текучості – це показник, який є основою для конструкційних розрахунків машинобудівних деталей.

Взагалі вилів розміру зерна на межу текучості можна оцінити за допомогою рівняння Петча-Хола

$$\sigma_T = \sigma_{iy} + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}}, \quad (7.1)$$

де σ_{iy} – напруження тертя, яке повинні подолати дислокації, коли останні рухаються у дуже великих зернах;
 d – розмір зерна.

В загальному вигляді σ_{iy} можна розглядати, як величину вільного пробігу дислокацій. Зміцнення сталі за допомогою розмірів зерен як елементів мікроструктури здійснюється на другому структурному рівні у загальній ієрархічній системі, що складається з п'яти рівнів: макроструктури, мікроструктури, субструктури, мезоструктури, атомної структури.

Зміст роботи

Ознайомитися з впливом розмірів зерна на межу текучості сталі. Визначити механічні властивості для двох зразків вуглецевої сталі з різними розмірами феритних зерен. Визначити середній розмір феритних зерен на мікросліфах двома методами: за еталонними шкалами і лінійним. Побудувати залежність межі текучості від розміру феритного зерна, визначити коефіцієнти σ_y і k_y для рівняння Петча-Хола і за допомогою цього рівняння розрахувати межу текучості для вуглецевої сталі з різними розмірами феритних зерен.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити методичні вказівки.
2. Занести в табл. 7.1 результати механічних випробувань з роботи № 6.
3. Визначити розмір зерна фериту у двох зразках вуглецевої сталі з різною термічною обробкою лінійним методом і за еталонними шкалами, результати занести у табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Результати випробувань

№ зразка	Межа текучості, σ_T , МПа		Розмір феритного зерна	
	розрахована	експериментальна	За шкалою	визначений лінійним методом

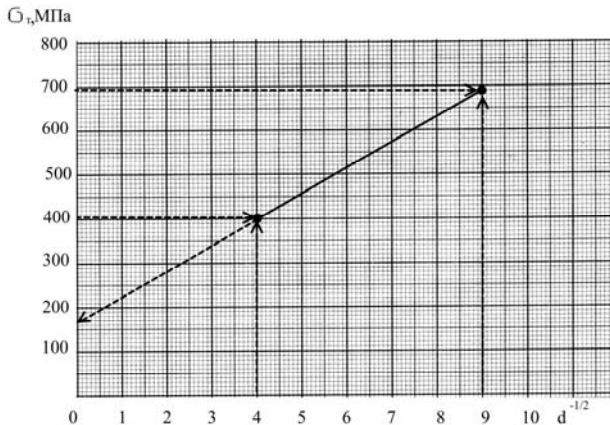


Рисунок 7.1 – Залежність межі текучості від розміру феритних зерен у вуглецевій сталі

4. Побудувати графік залежності межі текучості від середнього розміру зерен фериту, екстраполувати графік на вісь ординат і визначити коефіцієнт тертя $\sigma_{\text{н}}$.

5. Підставити значення $\sigma_{\text{н}}$ в одне з рівнянь (7.4) і визначити коефіцієнт $k_{\text{н}}$.

6. Визначити за рівнянням Петча-Хола межу текучості для заданого розміру феритного зерна d_3 , який кожний студент вибирає з табл. 7.2 згідно порядковому номеру у журналі.

Таблиця 7.2 – Розміри аустенітного зерна для розрахунку межі текучості

№ п / п	d_3 , мм	№ п / п	d_3 , мм	№ п / п	d_3 , мм
1	0,01	11	0,11	21	0,21
2	0,02	12	0,12	22	0,22
3	0,03	13	0,13	23	0,23
4	0,04	14	0,14	24	0,24
5	0,05	15	0,15	25	0,25
6	0,06	16	0,16	26	0,26
7	0,07	17	0,17	27	0,27
8	0,08	18	0,18	28	0,28
9	0,09	19	0,19	29	0,29
10	0,10	20	0,20	30	0,30

Методика проведення роботи

Для виконання роботи використовуються результати механічних випробувань з попередньої лабораторної роботи № 6 «Вплив термічної обробки на мікроструктуру і механічні властивості литої сталі» зразків після нормалізації з відпусканням і відпалення, а також відповідні металграфічні шліфи.

За еталонними шкалами визначається номер зерен фериту, потім розраховуємо середній розмір зерен фериту за допомогою формули:

$$d = 0,001 \cdot \varepsilon \frac{17,06 - N}{2,9}, \quad (7.2)$$

де d – діаметр зерна, мм;

N – номер зерна за еталонними шкалами.

Для визначення розмірів феритних зерен використовують також різновидність лінійного методу.

Для цього металографічний мікроскоп повинен бути обладнаний окуляром зі шкалою і перехрестям. Спочатку треба визначити ціну поділки окулярної шкали. Для цього використовується об'єкт-мікрометр, який уявляє собою металеву пластинку зі шкалою. На шкалі нанесено 100 поділок, відстань між сусідніми поділками дорівнює 0,01 мм.

Дивлячись в окуляр мікроскопу, треба підрахувати кількість поділок об'єкт-мікрометру, що вміщує окулярна шкала. Ціну поділки $d_{ок}$ визначаємо за формулою:

$$d_{ок} = D_{об} \cdot \frac{m}{n}, \quad (7.3)$$

де $D_{об}$ – ціна поділки шкали об'єкт-мікрометру;

m – кількість поділок шкали об'єкт-мікрометру;

n – кількість поділок окулярної шкали.

Далі на предметний столик мікроскопу встановлюється металографічний шліф. Зразок пересувається до пересічення перехрестя з зерном фериту. За допомогою окулярної шкали вимірюється розмір зерна (рис. 7.2). Таким чином треба визначити розміри 15–20 феритних зерен і розрахувати їх середній розмір. Середній розмір визначають для нормалізованого ($d_{ф1}$) і відпаленого ($d_{ф2}$) зразків.

Складаємо систему двох рівнянь із двома невідомими:

$$\begin{cases} \sigma_{тн} = \sigma_{iy} + k_y \cdot d_1^{\frac{1}{2}} \\ \sigma_{тв} = \sigma_{iy} + k_y \cdot d_2^{\frac{1}{2}} \end{cases}, \quad (7.4)$$

де $\sigma_{тн}$ – межа текучості нормалізованої сталі;

$\sigma_{тв}$ – межа текучості відпаленої сталі;

d_1 – середній діаметр феритного зерна нормалізованої сталі;

d_2 – середній діаметр зерна відпаленої сталі.

Цю систему рівнянь можна розв'язати двома методами: аналітичним і графічним.

При графічному методі будується графік залежності межі текучості від розміру феритних зерен (рис. 7.1). Графік екстраполюється на вісь ординат і таким чином отримується коефіцієнт напруження тертя k_y

Контрольні запитання

1. Яке рівняння відображає вплив розміру зерна на межу текучості.
2. На якому структурному рівні здійснюється зміцнення литої сталі за допомогою розмірів зерен.
3. Методи визначення середнього розміру зерен фериту.
4. Визначення ціни поділки окулярної шкали.
5. Розрахунок коефіцієнту тертя k_y рівняння Петча-Хола.
6. Розрахунок межі текучості вуглецевої сталі за заданим середнім розміром феритних зерен.

8. Лабораторна робота № 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ НА РОЗМІР ЗЕРЕН ПЕРВИННОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Мета роботи

Визначити вплив швидкості охолодження на розмір зерен первинної кристалізації ливарних сплавів.

Матеріали, обладнання та інструмент

Пристрій для фізичного моделювання кристалізації ливарних сплавів, гальванічна ванна, зразки прямокутної форми з міді і ніхрому, електрод для лудіння, секундомір.

Загальні відомості

Зерна первинної кристалізації суттєво впливають на фізико-механічні властивості ливарних сплавів і на кінцеву якість виливків. Розмір цих зерен як правило залежить від швидкості охолодження виливків і зливків.

Найбільш достеменно вплив швидкості охолодження на розмір зерен первинної кристалізації можна дослідити на реальних виливках. Але це дуже коштовні і довготермінові дослідження, пов'язані з проведенням багатьох дослідних плавок, виготовленням макротемплетів виливків, травленням на макрозерна в екологічно небезпечних агресивних хімічних реактивах.

Існують методи математичного моделювання процесів кристалізації. Вони пов'язані з використанням складних комп'ютерних програм, але повністю не гарантують адекватності математичної моделі і реальних виливків.

Методи фізичного моделювання найбільше наближені до реальних умов і відрізняються максимальною наочністю.

В основу пропонованого методу фізичного моделювання покладена кристалізація тонкого шару олова, нанесеного на відносно масивні зразки металів і сплавів. Взагалі швидкість кристалізації при інших рівних умовах головним чином визначається теплопровідністю металів і сплавів.

Схема зразка для фізичного моделювання процесів кристалізації наведена на рис. 8.1.

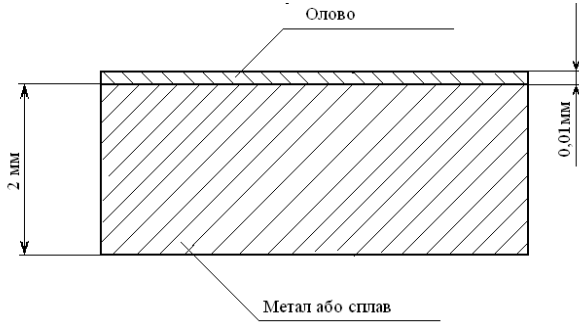


Рисунок 8.1 – Схема зразка для фізичного моделювання процесів кристалізації

Тепловий потік при охолодженні зразка можна визначити за формулою:

$$Q = \frac{\lambda \cdot S \cdot \Delta T}{\Delta L}, \quad (8.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

S – пересічення зразка;

L – відстань між двома точками з різною температурою;

ΔT – різниця температур у цих точках.

Схема теплових потоків, які проходять крізь зразок, наведена на рис. 8.2.

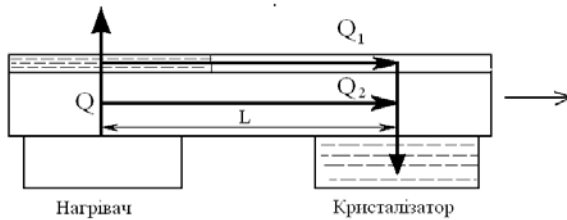


Рисунок 8.2 – Схема теплових потоків при фізичному моделюванні процесів кристалізації

Загальний тепловий потік Q розділяється на два: Q_1 , який проходить через зразок сплаву і Q_2 , який проходить крізь шар олова. Відстань

ΔL і різниця температур ΔT для зразка і шару олова практично однакові. Тоді відношення теплових потоків можна визначити за формулою:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\lambda_1 \cdot S_1}{\lambda_2 \cdot S_2}, \quad (8.2)$$

де λ_1 – коефіцієнт теплопровідності зразка металу або сплаву;
 S_1 – пересічення зразка металу або сплаву;
 λ_2 – коефіцієнт теплопровідності шару олова;
 S_2 – пересічення шару олова.

В лабораторній роботі використовують зразки з великою теплопровідністю (мідь) і відносно невеликою (ніхром). Пересічення зразків металу S_1 дорівнює 20 мм², шару олова – 0,2 мм². Теплопровідність олова дорівнює 34,9 Вт / (м·К), ніхрому – 71,4 Вт / (м·К), міді – 393,7 Вт / (м·К).

Якщо підставити ці значення в формулу (2), то одержимо для міді $Q_1 / Q_2 = 1128$, для ніхрому $Q_1 / Q_2 = 204,58$. Таким чином, тепловий потік крізь шар олова на 2–3 порядки менше, ніж через зразок і тепловідвід при кристалізації визначається переважно властивостями твердого металевого зразка.

Моделювання здійснюється таким чином. Спочатку металевий зразок гальванічним методом вкривається тонким шаром олова. Потім зразок розміщується на плоскому нагрівачі, де шар олова розплавляється. Після розплавлення шару олова зразок з певною швидкістю зсувається на водоохолоджуваний плоский кристалізатор. Олово кристалізується у вигляді двомірних кристалів, розміри яких визначаються умовами охолодження зразка і певним чином моделюють процес кристалізації. Для виявлення двомірних кристалів олова застосовують або травлення у розчині соляної кислоти або повторне гальванічне покриття оловом.

Пристрій для фізичного моделювання процесів кристалізації наведено на рис. 8.3.

Пристрій складається з плоского нагрівача 1, температура якого вимірюється за допомогою хромель-алюмелевої термопари 2. Термопара з'єднується з цифровим мілівольтметром 3 і приладом для автоматичного підтримання заданої температури 4. Пристосування 5 дозволяє пересувати зразок 6 відносно нагрівача 1 і мідного водоохолоджуваного кристалізатора 7 зі швидкістю, яку можна регулювати.

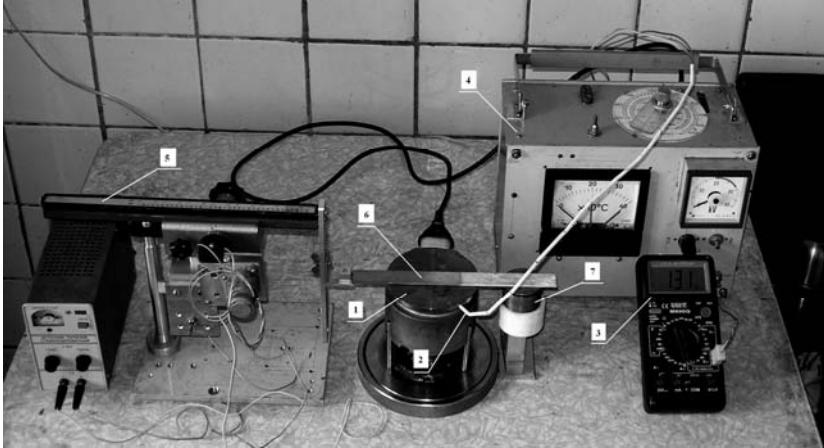


Рисунок 8.3 – Пристрій для фізичного моделювання кристалізації ливарних сплавів

Приклад фізичного моделювання кристалізації зразків міді при різних швидкостях охолодження наведено на рис. 8.4.

Зміст роботи

Підготувати зразки для досліджень шляхом нанесення на них тонкого шару олова. Ввімкнути в електричну мережу пристрій для моделювання. Провести моделювання кристалізації сплаву при двох різних швидкостях охолодження. Виявити макроструктуру зразків. Визначити розміри макрозерен. Зробити висновки.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схеми зразка і теплових потоків при фізичному моделюванні кристалізації ливарних сплавів.
2. В гальванічній ванні нанести на поверхні зразків шар олова товщиною 0,01 мм.
3. Ввімкнути пристрій для фізичного моделювання в електромережу.
4. На приладі для автоматичного регулювання температури нагрівача встановити температуру 250°C.
5. При досягненні вказаної температури встановити перший зразок на поверхню нагрівача.

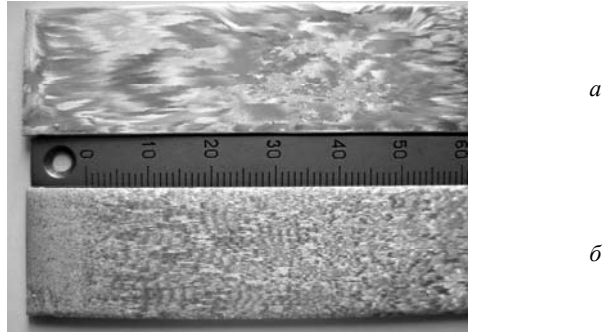


Рисунок 8.4 – Фізичні моделі кристалізації зливоків міді

a – швидкість охолодження 1 мм / с; *б* – швидкість охолодження 10 мм / с.

6. Після розплавлення шару олова (фіксується візуально) ввімкнути пристрій для пересування і почати процес пересування зразка при мінімальній швидкості (приблизно 1 мм / с) на поверхню кристалізатора.

7. Після повного пересування зразка через кристалізатор вимкнути пристрій для пересування і зняти зразок з кристалізатора.

8. Повторити п. п. 5–7 для другого зразка, але при максимальній швидкості (приблизно 10 мм / с).

9. Нанести на зразки в гальванічній ванні додатковий шар олова для виявлення макрозерен.

10. Вимірити розміри макрозерен за допомогою лінійки з міліметровими поділками.

11. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Методи дослідження впливу швидкості охолодження на розмір зерен первинної кристалізації.
2. Визначення теплових потоків при охолодженні зразка.
3. Послідовність фізичного моделювання процесів кристалізації виливків.
4. Основні правила техніки безпеки при виконанні роботи.

9. Лабораторна робота № 9 ВПЛИВ ПЕРЕГРІВУ РОЗПЛАВУ НА КРИТИЧНІ ТЕМПЕРАТУРИ ЛИВАРНОГО СПЛАВУ

Мета роботи

Вивчити теоретичні положення, пов'язані з формуванням структури і ливарними властивостями сплавів у залежності від інтервалу кристалізації; навчитися визначати критичні температури кристалізації, робити математичну обробку експериментальних даних і використовувати їх для практичного призначення.

Матеріали, обладнання та інструмент

Плавильна індукційна піч місткістю 60 кг, потенціометр КСП-4 або ЕПП-09, термопари платинородій-платинові, ливарні форми комплексної технологічної проби, шихтові матеріали, мікрокалькулятор.

Загальні відомості

Властивості ливарного сплаву в значній мірі визначається положенням його критичних точок на діаграмі стану сплаву в період кристалізації і, в першу чергу, інтервалом між температурами ліквідусу і солідусу, так званому «ефективному інтервалі кристалізації». Інтервал кристалізації суттєво впливає на дендритну структуру сплаву. Так, для сплавів з широким інтервалом кристалізації, коли різниця складу рідкої і твердої фаз велика, дендрити швидко розгалужуються по окремим напрямкам, але внаслідок зміни складу рідини не можуть потовщуватися. Внаслідок формуються тонкостовбурні, майже голчасті і в той же час розгалужені дендрити, які вриваються в рідину, залишаючи за собою ділянки не закристалізованого рідкого металу, збільшуючи тим самим об'єм розсіяних пор.

З інтервалом кристалізації сплаву пов'язані й інші важливі ливарні властивості – рідинотекучість, схильність утворення гарячих тріщин та внутрішніх напруг у виливках. З цієї точки зору мають перевагу сплави з вузьким інтервалом кристалізації або евтектичні.

Критичні температури кристалізації визначаються внаслідок аналізу термограм (кривих кристалізації), що отримують експериментально для кожного сплаву.

В даній лабораторній роботі використовується останній з перерахованих способів. Робота виконується за допомогою комплексної технологічної проби (рис. 9.1), що розроблена на кафедрі «Машини та технологія ливарного виробництва» Запорізького національного технічного університету.

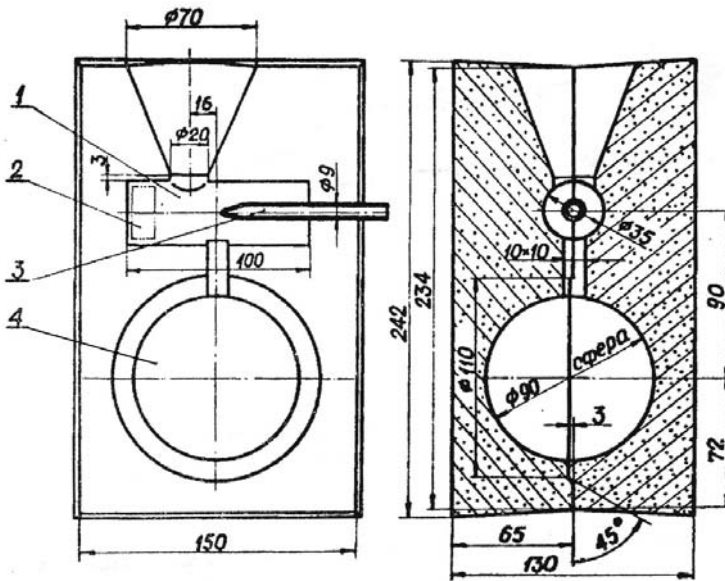


Рисунок 9.1 – Форма комплексної технологічної проби

Зміст роботи

1. Короткий опис теоретичної частини.
 2. Методика визначення критичних температур кристалізації.
- Рисунок технологічної проби.
3. Рисунок кривої кристалізації з позначенням основних точок та етапів кристалізації.
 4. Таблиця результатів експерименту.
 5. Таблиці математичної обробки результатів експерименту.
 6. Графіки залежностей $(\tau_{п}, \tau_{л}, \tau_{лс}, \tau_{с}, \Sigma\tau) = f(t_{п})$.
 7. Висновки.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати форму технологічної проби.

В 1976 р. на кафедрі «Машини та технологія ливарного виробництва» О. Ф. Кузововим була розроблена технологічна проба (див. рис. 9.1), що складається із циліндричного зразка 1 для вимірювання температури рідкого металу і того, що твердіє за допомогою платинородій-платинової термопари 3, з'єднаної з потенціометром для автоматичного запису кривої кристалізації. Циліндричний зразок служить також для одержання темплету 2 розміром $7 \times 8 \times 15$ мм для визначення фізичної густини металу і інших досліджень. Сферична частина проби 4 служить для визначення усадкової раковини. Проба формується в стержнях із суміші на рідкому склі і скріплюється при зборці струбцинами.

2. Розрахувати шихту і приготувати ливарний сплав заданого складу.

3. Залити технологічну пробу, записати на автоматичному потенціометрі криву кристалізації.

4. Обробити кожну отриману криву кристалізації – визначити температури перегріву при заливці сплаву, ліквідусу, солідусу, розбити криву на етапи кристалізації і визначити тривалість етапів (рис. 9.2). Швидкість руху стрічки потенціометру $0,903$ мм / с.

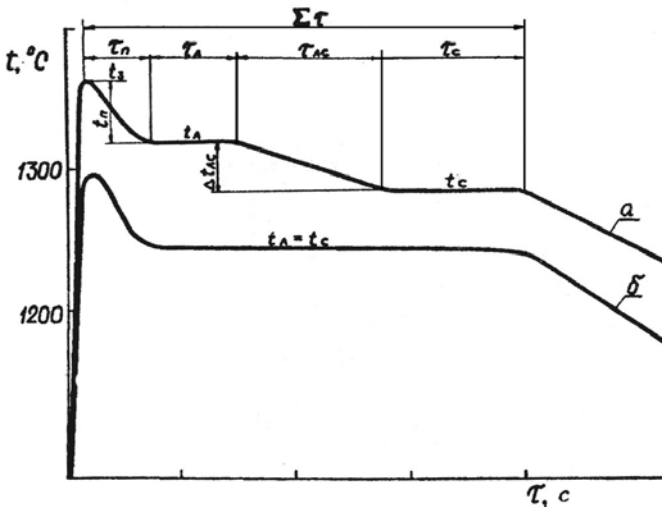


Рисунок 9.2 – Типові криві кристалізації сплавів до- і заевтектичних (а) та евтектичних (б)

Позначення на кривих рис. 9.2: t_p, t_l, t_c – відповідно температури перегріву при заливці, ліквідусу, солідусу $^{\circ}\text{C}$; $\tau_p, \tau_l, \tau_{лс}, \tau_c$ – відповідно час зняття перегріву, час кристалізації сплаву при температурі солідусу, с; $\Sigma\tau$ – сумарний час кристалізації, с.

5. Одержані результати записати відповідно табл. 9.1.

6. Провести математичну обробку результатів експерименту. Установити функціональні зв'язки між тривалістю етапів кристалізації і температурою перегріву над ліквідусом. Побудувати графічні залежності.

Таблиця 9.1 – Результати експерименту по визначенню критичних точок кристалізації (чавун 300X28H2)

№ досліджу	Температура металу, $^{\circ}\text{C}$				Час кристалізації, с				
	в формі	t_p	t_l	t_c	τ_p	τ_l	$\tau_{лс}$	τ_c	$\Sigma\tau$
1	1418	106	1312	1308	26	47	33	38	144
2	1492	118	1311	1308	34	49	25	47	155
3	1395	83	1312	1308	25	42	49	35	151
4	1320	10	1310	1307	9	31	35	40	105
5	1392	80	1312	1308	26	37	27	58	148
6	1460	143	1317	1309	34	42	38	48	162
7	1361	41	1312	1308	16	44	36	45	141
8	1494	184	1312	1308	46	52	24	39	161

Математична обробка результатів експерименту зводиться до визначення коефіцієнту кореляції r і виведенню рівняння першого порядку:

$$y = a + b \cdot x, \quad (9.1)$$

де y – параметр, що вивчається ($\tau_p, \tau_l, \tau_{лс}, \tau_c, \Sigma\tau$);

a, b – коефіцієнти;

x – незалежна перемінна.

Для розрахунку коефіцієнта кореляції r і коефіцієнтів a, b для кожного параметру, що вивчається, використовуємо розрахункову табл. 9.2.

Коефіцієнт кореляції

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \cdot \sum(y - \bar{y})^2}}, \quad (9.2)$$

де \bar{x}, \bar{y} – відповідно середньоарифметичні значення x та y .

Таблиця 9.2 – Розрахункова таблиця математичної обробки результатів експерименту

№ дослідду	x ($t_{\text{п}}$)	y (τ)	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})$
1							
2							
·							
·							
8							
$N = 8$	$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$	$\bar{y} = \frac{\sum y}{N}$			$\sum(x - \bar{x})^2$	$\sum(y - \bar{y})^2$	$\sum(x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})$

Коефіцієнти рівняння

$$b = r \cdot \sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2}{\sum(x - \bar{x})^2}}, \quad (9.3)$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (9.4)$$

Одержані експериментальні дані оформити у вигляді графічних залежностей. Для цього нанести експериментальні точки і провести лінію згідно з одержаним рівнянням для кожного параметру, що вивчається.

Аналіз експериментальних даних

Дати коментарій зв'язку часу різних періодів твердіння відливків ($\tau_{\text{п}}, \tau_{\text{л}}, \tau_{\text{лс}}, \tau_{\text{с}}, \Sigma\tau$) з величиною $t_{\text{п}}$.

Контрольні запитання

1. Що називають ефективним інтервалом кристалізації сплаву?
2. Конструкція технологічної проби для даної роботи.
3. Де і як вимірюють температуру металу?
4. Що називають кривою кристалізації, як її одержують і розшифровують?
5. На що вказують горизонтальні відрізки на кривій кристалізації?
6. Який зміст має коефіцієнт кореляції?
7. Як впливає температура перегріву рідкого металу на різні періоди твердіння відливка?
8. Основні правила техніки безпеки при виконанні роботи.

10. Лабораторна робота № 10 ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЛИВКИ НА РІДИНОТЕКУЧИСТЬ ЛИВАРНОГО СПЛАВУ

Мета роботи

З'ясувати діючі методи визначення рідинотекучості, термінологію питання, що вивчається, вплив параметрів технології литва і властивостей сплаву на рідинотекучість; навчитися проводити експеримент по вивченню рідинотекучості, аналізувати одержані експериментальні дані, регулювати рідинотекучість.

Матеріали, обладнання та інструмент

Плавильна індукційна піч місткістю 30 кг; автоматичний потенціометр КСП-4; термопари ПП або ХА; лінійка вимірвальна; шихта алюмінієвого сплаву; ливарні форми спіральної проби.

Загальні відомості

Рідинотекучість – це ливарна властивість сплаву, що характеризує схильність рідкого сплаву текти в ливарній формі. Рідинотекучість являється однією з головних складових частин заповнювання ливарної форми і відтворювання точного відбитку ливарної порожнини.

В той же час заповнення рідким сплавом порожнини ливарної форми – це складний процес, який можна розділити на три групи факторів. До першої групи відносять такі властивості сплаву: поверхневий натяг, в'язкість, теплоємність, теплоту та інтервал кристалізації та ін. Другу групу факторів становлять властивості ливарної форми: теплопровідність, газопроникність, шорсткість поверхні та ін. Третя група факторів – це умови заливання форми: метало статичний напір, додатковий тиск на розплав, температура заливки та ін.

Можуть визначатися такі види рідинотекучості:

Нульова рідинотекучість настає тоді, коли метал чи сплав перестав текти, перебуваючи під дією тільки сил гравітації. Для сплавів нульова рідинотекучість настає в інтервалі ліквідус-солідус в момент, коли в'язкість різко зростає через утворення деякої кількості твердої фази. Лінія температури нульової рідинотекучості розміщена між лініями температур ліквідус і солідус.

Дійсна рідинотекучість – рідинотекучість, що вимірюється за

однакової величини перегріву над температурою нульової рідинотекучості. Дійсна рідинотекучість дає можливість визначити склад сплаву із даної системи сплавів з оптимальною рідинотекучістю за мінімальної температури.

Умовно-дійсна рідинотекучість – рідинотекучість, що вимірюється за однакової величини перегріву над температурою ліквідусу. Вона не потребує визначення нульової рідинотекучості.

Практична рідинотекучість – рідинотекучість, що вимірюється за однакової температури заливки. Вона може дати досить суттєву помилку при визначенні рідинотекучості перегріву металу над ліквідусом і температурою нульової рідинотекучості.

На рис. 10.1 показані зміни дійсної та практичної рідинотекучості вуглецевої сталі.

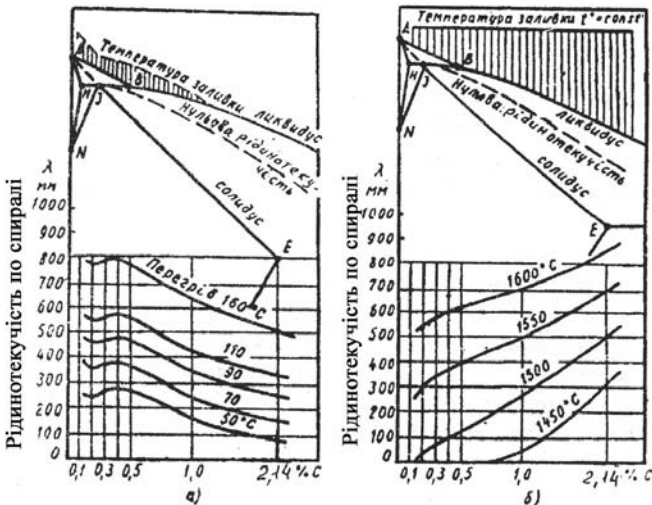


Рисунок 10.1 – Вплив вуглецю і температури на дійсну (а) і практичну (б) рідинотекучість

Рідинотекучість вимірюють шляхом заливання сплаву в спеціальні ливарні форми – проби, для яких є властивим високий гідравлічний опір. Головне в будові цих форм – створення постійних умов заливання сплаву – гідростатичного напору розплаву в формі, властивостей форми, розмірів і конфігурації порожнини ливарної форми.

Мірою рідинотекучості є довжина шляху, який проходить рідкий метал по каналу технологічної проби.

Теоретична рідинотекучість:

$$\lambda = \frac{F \cdot v \cdot \gamma \cdot [c \cdot (t_p - t_0) + L]}{\alpha \cdot P \cdot (t_m - t_\phi)}, \quad (10.1)$$

де F – площа поперечного перетину каналу проби, м²;

v – середня швидкість руху металу по каналу за час заливки, м / г;

γ – густина рідкого металу, кг / м³;

c – питома теплоємність рідкого металу, кДж / (кг·°C);

t_p – температура заливки рідкого металу, °C;

t_0 – температура нульової рідинотекучості, °C;

L – питома теплота кристалізації, кДж / кг;

α – середній коефіцієнт тепловіддачі з поверхні металу, кДж/(м²·г·°C);

P – периметр поперечного перетину каналу проби, м;

t_m – середня температура металу за період заливки, °C;

t_ϕ – початкова температура ливарної форми, °C.

Таким чином, рідинотекучість можна посилити:

- збільшенням площі перетину каналу, по якому проходить метал;
- збільшенням лінійної швидкості руху металу по каналу (відомо, що швидкість функціонально пов'язана з феростатичним напором – законом Торічелі і законом безперервності потоку);
- збільшенням температури перегріву металу;
- зменшенням периметру перетину каналу в разі постійної його площі (наприклад, периметр кола менше периметру квадрату);
- підігрівом ливарної форми.

При інших умовах кращу рідинотекучість мають сплави з більш високими значеннями густини, питомої теплоємності та теплоти кристалізації, а також з більш низьким коефіцієнтом тепловіддачі з поверхні металу.

Рідинотекучість в значній мірі залежить від інтервалу кристалізації – сплави евтектичні мають кращу умовно-істинну рідинотекучість, ніж не евтектичні, що пояснюється різницею в характері твердіння.

Збільшення в'язкості і поверхневого натягу сплаву зменшує рідинотекучість. Сплави, що мають вузький інтервал кристалізації мають і більшу рідинотекучість, ніж сплави з широким інтервалом кристалізації.

На рідинотекучість впливають такі технологічні фактори, як шорсткість стінок ливарної форми. Інтенсивність газовиділення під час залив-

ки рідкого металу, інтенсивність поверхневого окислення металу, конструкції форми і ливникової системи, умови заливки металу у форму.

Конструкція ливарної форми для визначення рідинотекучості

В роботі використана стандартна ливарна форма технологічної спіральної проби з каналом постійного перетину площею 50 мм^2 (рис. 10.2).

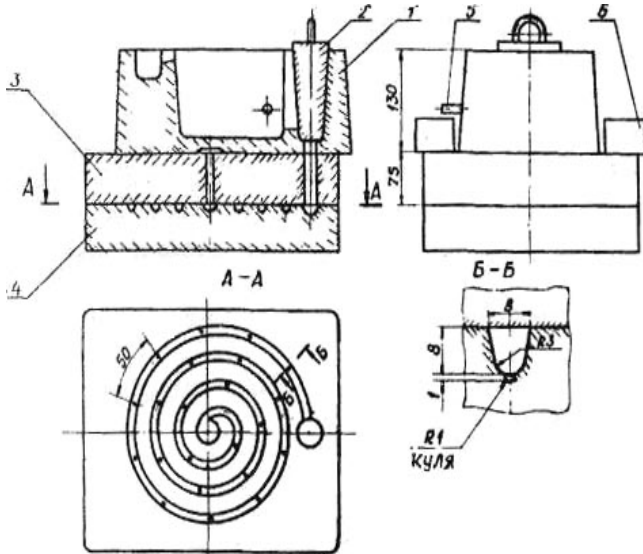


Рисунок 10.2 – Ливарна форма спіральної проби у зібраному вигляді

- 1 – ливникова чаша; 2 – пробка; 3 – верхня напівформа;
4 – нижня напівформа; 5 – термopара; 6 – вантаж

Особливість ливарної форми – наявність спеціальної ливникової чаші. Така конструкція чаші дозволяє заливати форму за умовами постійного феростатичного напору. Знаходження термopари безпосередньо в метало приймачеві чаші дозволяє вимірювати температуру рідкого металу перед надходженням його в канал проби, що значно збільшує точність експерименту.

Зміст роботи

Короткий опис теоретичної частини; зробити рис. 10.1 і дати пояснення впливу вуглецю і температури перегріву металу на рідинотекучість; ескіз технологічної проби – рис. 10.2; результати експерименту; висновки до виконаної роботи.

Порядок виконання роботи

1. Розрахувати шихту і підготувати шихтові матеріали згідно з вимогами технології плавки.
2. Підготувати чотири форми технологічної проби.
3. Виплавити сплав заданого складу у відповідності з вимогами плавки. Температуру металу в печі на протязі плавки вимірювати термопарою занурення.
4. Залити форми при різних температурах перегріву над ліквідусом: 20, 50, 100°C.
5. Вибити форми, охолодити виливки, виміряти довжину спіралей.
6. Побудувати графічну залежність рідинотекучості від температури перегріву над ліквідусом.

Контрольні запитання

1. Суть методики визначення рідинотекучості.
2. В яких одиницях вимірюється рідинотекучість?
3. Яким явище характеризується температура нульової рідинотекучості?
4. Що називається дійсною, умовно-дійсною та практичною рідинотекучості?
5. Як впливає інтервал кристалізації на рідинотекучість?
6. Які основні технологічні фактори найбільш суттєво впливають на рідинотекучість?
7. Як вимірюють температуру рідкого металу?
8. Конструкція технологічної проби для вимірювання рідинотекучості. її позитивні якості.
9. Заходи по підвищенню рідинотекучості.
10. На які практичні показники якості вилівка впливає рідинотекучість сплаву?
11. За результатами роботи пояснити вплив температури перегріву сплаву на його рідинотекучість.
12. Назвати правила техніки безпеки в процесі виконання даної роботи.

11. Лабораторна робота № 11 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВИТРАТИ ЛИВНИКОВОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи

Отримання знань розрахункового і експериментального методів визначення коефіцієнта витрати ливникових систем і формування навичок у проведенні експериментів, а також вміння застосовувати отримані результати при розрахунках ливникових систем.

Загальні відомості

Розрахунок площі поперечного перетину самого вузького місця ливникової системи проводиться за рівнянням:

$$F_{\text{вуз}} = \frac{10000 \cdot M}{\rho \cdot \tau \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (11.1)$$

де $F_{\text{вуз}}$ – площа поперечного перетину ливників для ливникової системи, що звужується, або для стояка ливникової системи, що розширюється, см^2 ;

M – сумарна маса рідкого металу, що заливається у форму, кг ;

ρ – густина рідкого металу, $\text{кг} / \text{м}^3$;

τ – тривалість часу заповнення форми металом, с ;

μ – коефіцієнт витрати ливникової системи – безрозмірна величина;

g – прискорення вільного падіння, $\text{м} / \text{с}^2$;

H_p – розрахунковий гідростатичний напір, м .

Теоретична швидкість потоку металу на виході із ливників за умови відсутності витрат на тертя базується на формулі Торічелі:

$$V_T = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}. \quad (11.2)$$

За наявності витрат на тертя дійсна швидкість складає:

$$V_d = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}. \quad (11.3)$$

Коефіцієнт витрат ливникової системи складає відношення дійсної до теоретичної швидкості потоку:

$$\mu = \frac{V_d}{V_T}. \quad (11.4)$$

Коефіцієнт витрати, значення якого лежать у межах $0 < \mu < 1$, характеризує сумарні гідравлічні втрати напору при русі розплаву по каналах ливникової системи і в формуючій порожнині ливарної форми. Чим складніше за конфігурацією ливникова система і чим більше вона має заворотів і різних місць, що чинять опір, тим менше величина коефіцієнта витрати і навпаки, чим простіше ливникова система, тим більше величина μ .

До факторів, що зменшують значення μ , відносяться: підвищення в'язкості розплаву, шорсткість стінок ливникових каналів, протитиск повітря, газів і водяної пари у формуючій порожнині ливарної форми. Наявність у формі відкритих ливарних надлиwkів і випорів, висока газопроникненість і в той же час низька газоутворююча здатність формувальних і стержневих сумішей, а також висока температура заливки сплаву сприяють збільшенню коефіцієнта μ .

Коефіцієнт витрати, який має важливе значення у розрахунках ливникових систем, може визначатися розрахунковим і експериментальним методами. Для розрахункового визначення коефіцієнта витрати для ливникової системи, яка звужується, використовується рівняння:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum C_i}}. \quad (11.5)$$

У табл. 3.1 приведені середні значення коефіцієнтів витрат C_i для основних елементів ливникових систем.

Значення C_i визначаються за допомогою даних табл. 11.1 із рівнянь:

$$\begin{aligned} C_1 &= (K_1 + K_2) \cdot (F_{\text{лив}}/F_{\text{ст}})^2; \\ C_2 &= (K_3 + K_4) \cdot (F_{\text{лив}}/F_{\text{шл}})^2; \\ C_3 &= C_5; \\ C_4 &= C_6, \end{aligned} \quad (11.6)$$

де $F_{\text{ст}}$, $F_{\text{шл}}$, $F_{\text{лив}}$ – площі поперечних перетинів стояка, шлакоуловлювача і ливників, відповідно, м^2 ;

l – довжина відповідного каналу, м ;

d – гідравлічний діаметр відповідного каналу, м, що визначається із формули:

$$d = 4F / P, \quad (11.7)$$

де F – площа поперечного перетину відповідного каналу, м^2 ;
 P – периметр перетину відповідного каналу, м.

Таблиця 11.1 – Середні значення коефіцієнтів витрат K_i

C_i	Елементи системи і характер опору	K_i	Примітки
	Вхід у стояк	$K_1 = 0,1$	Скруглений перехід між чашею і стояком
C_1		$K_1 = 0,7$	Перехід між чашею і стояком не скруглений
	Тертя у стояку	$K_2 = 0,03 \cdot l / d$	
	Поворот із стояка в шлакоуловлювач	$K_3 = 2$	Для одностороннього шлакоуловлювача
C_2		$K_3 = 4$	
	Тертя у шлакоуловлювачі	$K_4 = 0,05 \cdot l / d$	
C_3	Поворот із шлакоуловлювача в ливник	$K_5 = 1,5 \cdot n$	n – кількість ливників
C_4	Тертя у ливнику	$K_6 = 0,05 \cdot l / d$	

Коефіцієнт витрати може визначатися експериментальним методом. Метод базується на рівнянні (11.4). Якщо чисельник і знаменник цього рівняння помножити на $(F_{\text{лив}} \cdot \tau \cdot \rho)$, то отримаємо формулу:

$$\mu = \frac{V_{\text{д}} \cdot F_{\text{лив}} \cdot \tau \cdot \rho}{V_{\text{т}} \cdot F_{\text{лив}} \cdot \tau \cdot \rho} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{т}}}, \quad (11.8)$$

де τ – відрізок часу, с;

ρ – густина рідкого розплаву (таблиця 3.2), $\text{кг} / \text{м}^3$;

$M_{\text{д}}$ – дійсна маса розплаву, що витікає із ливника за відрізок часу

τ , кг;

M_T – теоретична маса розплаву, що витікає із ливника за той же відрізок часу τ за умови відсутності гідравлічних витрат ($\mu = 1$), і визначається по формулах (11.2) і (11.8).

Таблиця 11.2 – Густина розплавів при температурі близькій до ліквідусу, кг / м³

Алюміній технічно-чистий	Силумін евтектичний	Залізо технічно-чисте	Чавун сірий
2380	2300	6900	6800

Експериментальний метод дозволяє визначати вплив на величину μ типа сплаву, що заливають, його складу і температури заливки, введення додаткових елементів ливникових систем. Наприклад, встановлення фільтруючої сітки із склотканини знизило значення μ з 0,32 до 0,50. Це означає, що доля гідравлічного опору складає 0,12 одиниць.

Теоретичне визначення величини μ

Розрахунки проводяться за формулами (11.5), (11.6), (11.7) і даними табл. 11.1.

У розрахунках використовувати такі дійсні значення: для стояка $F_{ст} = 531 \text{ мм}^2$, довжина $l_{ст} = 105 \text{ мм}$, периметр $P_{ст} = 83 \text{ мм}$; для шлакоуловлювача $F_{шл} = 454 \text{ мм}^2$, довжина $l_{шл} = 170 \text{ мм}$, периметр $P_{шл} = 84 \text{ мм}$; для ливника $F_{лив} = 375 \text{ мм}^2$, довжина $l_{лив} = 125 \text{ мм}$, периметр $P_{лив} = 76 \text{ мм}$.

Опис експериментальної установки

На рис. 11.1 показана схема установки. Ливарна форма складена із ливникової чаші 2 з пробкою 1, стояка 4, шлакоуловлювача 3 і ливника 6.

Після заповнення ливникової чаші розплавом пробку треба підняти догори, в результаті чого розплав заповнює усі елементи ливникової системи і виливається із ливника у виливницю 7.

Після того, як режим течії стабілізується, треба зберігати постійність рівня метала в ливниковій чаші шляхом доливання в неї рідкого металу із ковша і включити секундомір. Таким чином, у виливниці 7 знаходиться дійсна маса розплаву M_d , що вилілась із ливникової системи за відрізок часу τ . Масу M_d визначають шляхом зважування.

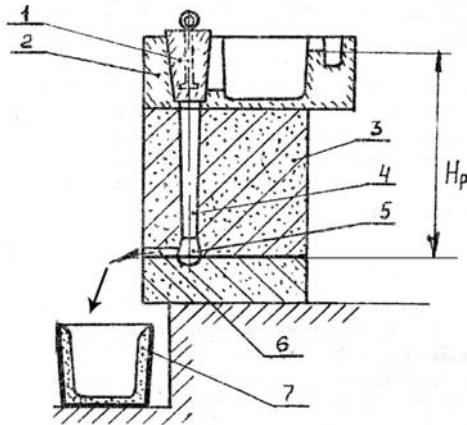


Рисунок 11.1 – Схема установки для експериментального визначення коефіцієнта втрати ливникової системи

Зміст роботи

Звіт по роботі повинен вміщувати опис методик визначення коефіцієнта витрати розрахунковим і експериментальним методами, результат розрахунків і експериментальні дані, ескізи експериментальної установки і ливникової системи, висновки по роботі.

Порядок виконання роботи

1. Виготовити ливарну форму ливникової системи.
2. Підготувати експериментальну установку під заливку.
3. Виплавити в печі алюмінієвий сплав, провести його рафінування і вимірювання температури рідкого сплаву в печі і розливному ковші.

Забезпечити при цьому безпечний порядок проведення плавки. Шихтові матеріали, флюс, ківш та інструмент повинні бути перед використанням просушені і прожарені.

4. Залити метал у чашу, підняти пробку і постійно виливати метал із ковша в чашу так, щоб рівень його у чаші був стабільним.

Під час заливки студентам треба знаходитись на безпечній відстані – близько 3 м від установки. Площа навколо установки повинна бути сухою.

5. Зважити масу металу, що знаходився у виливниці 7, після його охолодження. Таким чином визначається величина M_d .

6. Визначення теоретичної маси розплаву M_T , що спроможна витікати із ливника за цей же відрізок часу, за умови відсутності гідравлічних витрат, проводиться за формулою:

$$M_T = F_{\text{лив}} \cdot \tau \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}, \quad (11.9)$$

де $H_p = 0,23$ м – розрахунковий гідростатичний напір експериментальної установки, м.

7. Визначити експериментальне значення μ за формулою (11.8).

8. Порівняти значення величин μ , що отримані розрахунковим і експериментальним методами, зробити висновок по роботі.

Контрольні запитання

1. Що називається коефіцієнтом витрати ливникової системи, яка його фізична суть?

2. Яке значення має величина коефіцієнта μ у розрахунках ливникової системи?

3. Які фактори виявляють вплив на величину коефіцієнта μ ?

4. Розрахунковий метод визначення коефіцієнта μ .

5. Експериментальний метод визначення коефіцієнта μ .

6. Який виявляє вплив на величину коефіцієнта μ складність конфігурації ливникової системи?

7. Який виявляють вплив на величину коефіцієнта μ наявність і відсутність округлень в переходах між елементами ливникової системи?

12. Лабораторна робота № 12 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВИТРАТИ ЛИВНИКОВОЇ СИСТЕМИ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОЗОРОЇ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ

Мета роботи

Візуальне спостереження характеру руху рідини (води – прозорої або підфарбованої) в каналах ливникової системи, а також експериментальне визначення об'єму і часу витікання рідини, що необхідні для розрахунку коефіцієнту витрати ливникової системи.

Загальні відомості

Основні засади теорії течії рідини в каналах ливникової системи і розрахункові формули викладені в попередній лабораторній роботі.

Основна формула, на якій базуються розрахунки ливникової системи – формула Торічеллі:

$$V = \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot H_p}, \quad (12.1)$$

де V – швидкість витікання рідкого металу або будь-якої іншої рідини через круглий отвір у дні посудини, м / с;

φ – коефіцієнт швидкості, який враховує витрати напору на тертя об краї отвору. Незалежно від істоти рідини він має величину, яка дорівнює приблизно 0,97;

$g = 9,81$ м / с²;

H_p – розрахунковий гідростатичний напір, м.

Найважливішим висновком, яке ґрунтується на цьому рівнянні, являється те, що швидкість витікання не залежить від істоти рідини. Таким чином, гідравлічні процеси, які протікають у каналах ливникової системи можна вивчати, а головне – спостерігати за допомогою прозорої форми, використовуючи воду.

Опис установки

Прозора форма ливникової системи являється копією у натуральну величину ливникової системи, яка використовується у попередній лабораторній роботі і складається з тих же самих елементів: ливникової чаші, пробки, стояка, шлакоуловлювача і ливника.

Слід звернути увагу на конструкцію пробки, яка імітує установлений у ливарну форму піщаний стрижень, що самопривантажується рідким металом. Пробка порожниста, тобто її середня густина значно нижче густини рідини, однак пробка не спливає, тому що на неї не діє підйомна сила рідини.

Основні розміри ливникової системи:

- площа поперечного перетину стояка $F_{\text{ст}} = 5,31 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;
- площа перетину шлакоуловлювача $F_{\text{шл}} = 4,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;
- площа перетину ливника $F_{\text{лив}} = 3,79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (тобто це система, яка звужується – $F_{\text{лив}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1,0 : 1,2 : 1,4$);
- висота гідростатичного напору $H_p = 0,23 \text{ м}$;
- маса води у ливниковій чаші $M_d = 2,324 \text{ кг}$.

Порядок виконання роботи

Встановити прозору ливарну форму на горизонтальну площадку. Під ливником розмістити приймальну ємкість для води. Закрити пробкою вихідний отвір із чаші. Наповнити чашу водою до верхнього рівня зливної перебірки.

Підняти догори пробку із отвору, водночас з цим включити секундомір. Виключити секундомір після витікання рідини із стояка. Записати отримане значення часу витікання води – τ . Експеримент повторити не менше трьох разів, водночас треба спостерігати характер руху рідини в каналах ливникової системи.

Розрахунок коефіцієнта μ на основі отриманих експериментальних даних

Із відомої формули:

$$F_{\text{лив}} = \frac{M_d}{\rho \cdot \tau \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (12.2)$$

знайдемо величину μ шляхом підстановки у формулу отриманого значення τ (секунди), $F_{\text{лив}}$ (м^2), ρ ($\text{кг} / \text{м}^3$), g ($\text{м} / \text{с}^2$), H_p (м).

Теоретичний розрахунок коефіцієнта

Цей розрахунок виконаємо за допомогою формули і табличних значень її складових із попередньої лабораторної роботи:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum C_i}}, \quad (12.3)$$

де $C_1 = (K_1 + K_2) \cdot (F_{\text{лив}} / F_{\text{ст}})^2$;

$K_1 = 0,1$;

$K_2 = 0$ (відсутність тертя у стояку);

$C_2 = (K_3 + K_4) \cdot (F_{\text{лив}} / F_{\text{шл}})^2$;

$K_3 = 2$;

$K_4 = 0$ (відсутність тертя у шлаковловлювачі);

$C_3 = K_5 = 1,5$;

$C_4 = K_6 = 0$ (відсутність тертя у ливнику).

Аналіз отриманих результатів

Значення коефіцієнта витрат ливникової системи, які були отримані різними методами зводимо у табл. 12.1.

Зробити висновок по отриманих результатах, порівняти їх з літературними даними, що приводять значення коефіцієнта μ .

Таблиця 12.1 – Значення коефіцієнта μ

Метод отримання результату	μ
1 Експеримент із заливкою алюмінієвого розплаву у піщану форму (попередня лабораторна робота)	
2 Експеримент з заливкою води у прозору форму	
3 Розрахунковий з попередньої роботи	
4 Розрахунковий з даної роботи	

Контрольні запитання

1. Що таке моделювання процесу лиття?
2. На якій формулі базуються розрахунки ливникової системи?
3. Що враховує коефіцієнт швидкості φ ?
4. Конструкція прозорої форми.
5. Що визначає величина коефіцієнту μ ?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Золоторевский В. С. Механические испытания металлов / Золоторевский В. С. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
2. Жуковец И. И. Механические испытания металлов / Жуковец И. И. – М. : Высшая школа, 1980. – 252 с.
3. Металловедение и термическая обработка : справочник / [Бокштейн Б. С., Векслер Ю. Т., Виноград М. И. и др.]; Т.1 Методы испытаний. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
4. Электронная фрактография : альбом; под ред. М. М. Ужевского. – М. : Металлургия. – 1975. – 58 с.
5. Гуляев А. П. Металловедение / Гуляев А. П. – М. : Металлургия, 1977. – 556 с.
6. Статическая прочность и механизм разрушения сталей ; под ред. В. Даля. – М. : Металлургия, 1988. – 362 с.
7. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Ч.1. Тепловые основы теории затвердевания и охлаждения отливки / Баландин Г. Ф. – М. : Машиностроение, 1976. – 265 с.
8. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов / Гуляев Б. Б. – Л. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
9. Ветишка А. И. Теоретические основы литейной технологии / Ветишка А. И. и др. – К. : Вища школа, 1981. – 320 с.

АЛФАВІТНО-ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

В

Визначення вмісту вуглецю у вуглецевих сталях металографічним методом – 62.

Визначення мікротвердості – 21.

Визначення твердості вдавлюванням: за Бринелем – 15.
за Роквелом – 19.

Випробування на розтягнення – 6.

Відпалення – 54.

Відпущення сталі – 53.

Г

Гартування – 51.

Гідравлічні втрати напору – 85.

Гідростатичний напір – 84.

Д

Діаграма «залізо – вуглець» – 55.

Діаграма «навантаження – деформація» – 7, 12.

Діаметр відбитку – 16.

Е

Електронний мікроскоп – 48.

Ефективний інтервал кристалізації сплаву – 73.

З

Закон Торічелі – 84.

Зразки для випробування на розтягування – 8.

Залежність між межею міцності і твердістю HV – 18.

І

Інтервал кристалізації – 73.

К

Класифікація макроскопічних особливостей зломів – 46.

Коефіцієнт витрати ливникової системи – 84.

Коефіцієнт швидкості – 90.

Комплексна технологічна проба – 74.

Критичні точки на діаграмі стану сплаву – 73.

М

Машина для випробувань металів і сплавів на розтягнення Р-10 – 9.

Методи визначення густини твердих тіл – 31.

Методи виявлення аустенітного зерна – 39.

Метод пересічних для визначення середнього розміру аустенітного зерна – 40.

Метод флотації – 33.

Механічні властивості: межа пружності, межа текучості, межа міцності, дійсний опір розтягуванню, відносне подовження, відносне звуження – 6.

Мікроскоп для вимірювання діаметру відбитків МПБ-2 – 17.

Мікроскопа ММУ-3 – 58.

Мікротвердомір ПМТ-3 – 22.

Мікрофрактографічні дослідження – 47.

Н

Нормалізація – 52.

О

Окуляр-мікрометр – 23.

П

Первинна кристалізація – 68.

Пікнометричний метод визначення густини – 32.

Поляризоване світло – 57.

Прилад для випробування твердості за Брінелем – 16.

Прилад ТК-2М для визначення твердості за Роквелом – 20.

Пристрій для високотемпературних досліджень металів і сплавів ІМАШ-20-78 – 38.

Пристрій для визначення фізичної густини методом гідростатичного зважування – 35.

Р

Репліка – 47.

Рівняння Петча-Хола – 63.

Рідинотекучість: нульова, дійсна, умовно-дійсна, практична – 79; 80.

Розмір аустенітного зерна – 38.

Розмір феритних зерен – 63.

С

Середньоквадратичні відхилення – 23.

Статистична обробка – 24.

Т

Твердість – 14.

Теорія течії рідини в каналах ливникової системи – 90.

Тепловий потік – 69.

Теплопровідність металів і сплавів – 68.

Термічна обробка – 51.

Термограма – 73.

Технологічна спіральна проба – 82.

У

Універсальний вакуумний пост ВУП-5 – 39.

Ф

Фізична густина – 32.

Фізичне моделювання кристалізації ливарних сплавів – 68.

Фрактографія – 6.

Х

Хімічний склад ливарних сплавів – 6.

Ц

Ціна поділки – 66.

Ш

Швидкість охолодження – 68.

Навчальне видання

БЯЛІК Гаррі Абрамович
НАУМИК Валерій Владиленович
ЦИВІРКО Едуард Іванович
КУЗОВОВ Олексій Федорович
ЛУНЬОВ Валентин Васильович

**ПРАКТИКУМ З ТЕОРІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ
ТА ПРОЦЕСІВ**

Навчальний посібник

Комп'ютерний друк та редакція: *Бялік Г. А, Наумик В. В,
Василевська Я. А.
Верстання Гринь Д. В.*

Оригінал-макет підготовлено
в редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Підписано до друку 30.05.2012. Формат 60×84 / 16. Ум. друк. арк. 5,7.
Тираж 300 прим. Зам. № 799.

Запорізький національний технічний університет
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769-82-96, 220-12-14

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
від 27.12.2005 р., серія ДК № 2394