

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ „КПІ”**

До 90- річчя кафедри ливарного виробництва  
чорних і кольорових металів

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни «Виробництво виливків спеціальними способами лиття»  
для студентів напряму підготовки 6.050402 – Ливарне виробництво  
усіх форм навчання

Київ 2015

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни „Виробництво виливків спеціальними способами лиття”  
для студентів напряму підготовки  
6.050402 – Ливарне виробництво  
усіх форм навчання

Затверджено

На засіданні кафедри ливар-  
ного виробництва чорних і кольо-  
рових металів.

Протокол №7 від 28.04.2015

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Виробництво виливків спеціальними способами лиття» для студентів напряму підготовки 6.050402 – Ливарне виробництво / Укладачі: Кочешков А.С., Ямшинський М.М., Самарай В.П. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 38 с.

*Гриф надано Вченою радою ІФФ НТУУ «КПІ»  
(Протокол № 11/15 від 30.11. 2015 р.)*

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
„Виробництво виливків спеціальними способами лиття”

для студентів напряму підготовки  
6.050402 – Ливарне виробництво  
усіх форм навчання

Укладачі: Кочешков Анатолій Сергійович  
Ямшинський Михайло Михайлович  
Самарай Валерій Петрович

Відповідальний  
редактор Р.В. Лютий, кандидат технічних наук, доц.

Рецензент О.І. Шейко, кандидат технічних наук, доц.

За редакцією укладачів  
Надруковано з оригінал-макета замовника

Темплан 2015 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
Лабораторна робота №1 ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НА ВЛАСТИВОСТІ ОБОЛОНКОВИХ ФОРМ .....	4
Лабораторна робота № 2 ВПЛИВ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ФОРМИ НА ЯКІСТЬ ВИЛИВКІВ ПРИ ВІДЦЕНТРОВОМУ ЛИТВІ .....	12
Лабораторна робота № 3 ВПЛИВ ТОВЩИНИ ВОГNETРИВКОГО ПОКРИТТЯ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ ПРИ ЛИТВІ В КОКІЛЬ .....	19
МАТЕМАТИЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	22
ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ .....	37
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	38

## ВСТУП

Методичні вказівки видаються студентам на початку VIII семестру.

За методичними вказівками слід вивчити мету, зміст і порядок виконання лабораторної роботи, а по кожній роботі – теоретичний матеріал (за лекціями і технічній літературі). Об'єм теоретичної підготовки визначається контрольними питаннями, приведеними в кожній лабораторній роботі.

Перед початком лабораторної роботи викладач з кожним студентом проводить співбесіду. Допуск до роботи визначається рівнем уявлень про конкретний тип литва, знанням цілей, порядку виконання і безпечних методів роботи а також рекомендації щодо оброблення результатів експериментів та оформлення протоколів лабораторних робіт.

Виконану роботу оформлюють у вигляді звіту, форми для заповнення якого приведені в даних методичних вказівках по кожній роботі, і захищається у викладача перед виконанням наступної роботи.

На захисті необхідно теоретично обґрунтувати одержані результати роботи і оцінити можливості даного методу литва в порівнянні з литвом в піщано-глинясті форми та іншими способами литва.

У зв'язку з необхідністю приділення підвищеної уваги до самостійної роботи студентів, методичні вказівки супроводжуються теоретичними поясненнями, відомостями щодо принципів будови та описання лабораторного устаткування, послідовності виконання робіт.

Виконання кожної лабораторної роботи передбачає ознайомлення з теорією процесу і устаткуванням; набуття вміння провести експеримент, обробити експериментальні дані і за отриманими результатами зробити правильні висновки.

Після ознайомлення з правилами роботи в лабораторії студент з дозволу викладача може приступити до виконання роботи на лабораторному устаткуванні.

До початку лабораторного заняття студент має підготувати протокол виконання лабораторної роботи.

Студенти заочної форми навчання виконують лабораторну роботу №2 протягом 4 год.

### **Лабораторна робота №1** **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НА ВЛАСТИВОСТІ** **ОБОЛОНКОВИХ ФОРМ**

**Мета роботи:** – засвоїти холодний спосіб отримання плакованих піщано-смоляних сумішей і дослідити: залежність товщини оболонки від часу витримування нагрітої моделі в контактi з сумішшю; вплив вмісту

зв'язувального компонента, температури і тривалості твердіння на міцність піщано-смоляних сумішей.

Робота розрахована на 6 годин.

Оболонковою називають разову тонкостінну ливарну форму, виготовлену із спеціальної суміші з термореактивними зв'язувальними матеріалами формуванням за гарячою модельною оснасткою.

Переваги способу литва в оболонкові форми в порівнянні з литтям у піщано-глинясті форми: підвищується точність розмірів виливків; зменшується шорсткість поверхні; різко скорочуються витрати на формувальні матеріали, вибивання і очищення литва; створюється можливість комплексно механізувати і автоматизувати процес виробництва виливків з використанням цього способу.

Недоліки способу: висока вартість і дефіцитність смол, необхідність роботи з гарячим оснащенням, обмеженість номенклатури виливків за масою та габаритами.

Лиття в оболонкові форми є одним із прогресивних способів виготовлення дрібних і середніх за масою виливків з чавуну, вуглецевих і легованих сталей і сплавів кольорових металів.

Метод широко застосовують в ливарних цехах масового і серійного виробництва виливків в автомобілебудуванні, авіаційній промисловості, верстатобудуванні, в сільськогосподарському машинобудуванні та інших галузях.

### **Технологія виготовлення оболонкових півформ**

Послідовність операцій під час виготовлення оболонкових форм наступна: модельну плиту з моделлю для верхньої (аналогічно для нижньої) півформи нагрівають до 250...300 °С, покривають відокремлюючим покриттям і на неї насипають піщано-смоляну суміш, яку витримують 10...30 с.

Під дією тепла модельного оснащення смола розм'якшується і зв'язує зерна наповнювача, утворюючи на моделі оболонку завтовшки 6...20 мм. Суміш, яка не піддається нагріванню, видаляють, і модельну плиту разом з одержаною оболонкою поміщають в піч, нагріту до 300...350 °С, витримують в ній 60...180 с для остаточного тверднення, при якому відбувається полімеризація смоли і перехід її в твердий незворотний стан. В результаті цього утворюється затверділа оболонка навколо моделі.

Оболонка знімається з модельної плити за допомогою штовхачів і передається на складання та заливання металом.

Аналогічним чином з піщано-смоляних сумішей виготовляються і стрижні.

### **Піщано-смоляні суміші і їх приготування**

Суміш для оболонкового литва є сухою сипкою масою, яка складається з вогнетривкого наповнювача, смоли і зволожувача [1, 2]

Як наповнювачі застосовують збагачені сухі кварцові, олівінові формувальні піски або цирконовий концентрат.

Зв'язувальним компонентом у сумішах для оболонкового литва є синтетичні смоли, переважно фенолоформальдегідні, які розділяють на новолачні і резольні.

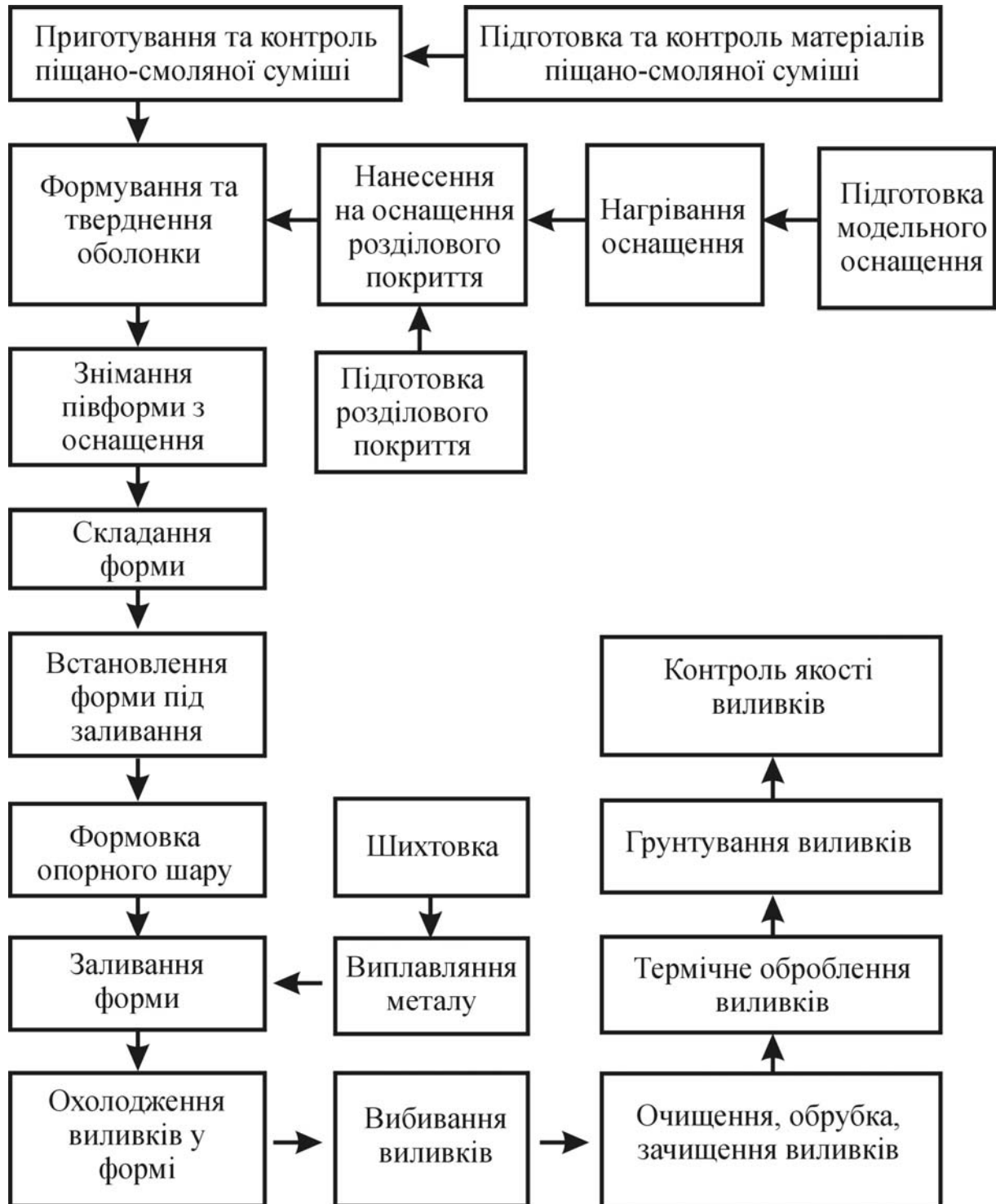


Рисунок 1.1 – Блок-схема технологічного процесу виготовлення виливків у оболонкових формах

*Новолачні смоли* є термопластичними матеріалами, тобто такими, які під час нагрівання переходять в пластичний стан, а при охолодженні переходять в твердопружний стан.

*Резольні*, або терморективні смоли, під час нагрівання полімеризуються з утворенням ланцюгів молекул тривимірних просторових структур. У цьому стані смола втрачає здатність розчинятися в органічних розчинниках і стає неплавною і негорючою.

Для оболонкових форм резольні смоли не одержали застосування через тривалість процесу тверднення. Швидкість тверднення полімеру підвищується з використанням новолачних смол із додаванням формальдегіду. Як джерело формальдегіду застосовують уротропін, який при нагріванні розкладається на формальдегід, аміак та інші продукти, при цьому формальдегід з'єднує ланцюги молекул новолака і переводить його в неплавкий і негорючий стан.

У сумішах для оболонкових форм найчастіше використовують зв'язувальний компонент СФП-011Л (ТУ 2257-111-05015227-2006), який є сумішшю термопластичної фенолоформальдегідної смоли з 6,0...10,0% уротропіну.

З метою покращання якості піщано-смоляних сумішей для їх приготування використовують зволожувачі, які розділяють на змочувачі і розчинники. Зволожувачі - змочувачі зменшують пилоутворення та розшарування зв'язувального компонента в наповнювачі, оскільки їх об'ємні маси відрізняються один від одного. Вони змочують зерна наповнювача і викликають цим прилипання до них пилоподібної смоли. Змочувачами є гас, гліцерин та ін. Вміст їх в суміші 0,2...0,6 мас.ч. Такі суміші називаються неплаковані.

Зволожувачі-розчинники розчиняють смолу і в процесі перемішування зерна наповнювача обволікають плівкою смоли. Як розчинники застосовують етилацетат, етиловий спирт, фурфурол та інші матеріали в кількості 0,5...2,0 мас.ч. Суміші із зволожувачами-розчинниками одержали назву плакованих. У цих сумішах зерна наповнювача покриті плівкою смоли. Такі суміші по порівнянню, з неплакованими характеризуються кращою сипучістю, міцністю і газопроникністю.

Приготування сумішей включає підготовку вихідних матеріалів (сушіння піску, просіювання зв'язувального компонента СФП-011Л) та їх змішування.

Порядок приготування неплакованих сумішей: завантажування наповнювача в змішувач, введення зволожувача - змочувача, перемішування 1...2 хв, завантажування смоли і перемішування протягом 15...20 хв.

Плаковані суміші готують холодним або гарячим способом. При холодному плакуванню в змішувач завантажують наповнювач і смолу, які перемішують протягом 1...2 хв, потім вводять розчинник і після 7...15 хв перемішування суміш вивантажують, сушать і просівають. При гарячому плакуванні смолу розплавляють, перемішують 3...5 хв з наповнювачем і охолоджують.



## Техніка безпеки при виготовленні оболонкових форм і стрижнів

1. Під час виконання досліджень необхідно виконувати загальні правила з техніки безпеки, які наведено в розділі «Техніка безпеки».
2. Устаткування для приготування сумішей, виготовлення форм і стрижнів, ділянки заливання і вибивання повинні забезпечуватися інтенсивною припливно-витяжною вентиляцією.
3. Всі операції з нагрітим оснащенням і оболонками виконувати в рукавицях.

## Устаткування, інструменти і матеріали

Лабораторні бігуни моделі 018М для приготування суміші; сито 020 для просіювання піщано-смоляної суміші; модельна плита з моделлю і наповнювальною рамкою для виготовлення нижньої (рис. 1.2, а) і верхньої (рис.1.2, б) напівформ; муфельна піч МП-2 з потенціометром для автоматичної підтримки температури; піч для плавлення алюмінієвих сплавів; ящик для виготовлення зразків-вісімок на розривання товщиною 10 мм; лабораторний копер моделі 030М для ущільнення суміші; розривна машина РП-100, пристосована для випробування зразків-вісімок на розривання; пензель для нанесення розділового покриття на модельне оснащення; щипці для вилучення гарячого модельного оснащення з печі; ковші для розливання металу; сухий кварцовий пісок; зв'язувальний компонент СФП-011Л; етилацетат, синтетичний кремнійорганічний термостійкий каучук (СКТ), розчинений в уайт-спіриті (СКТР) для запобігання прилипання суміші до оснащення; алюмінієвий сплав; штангенциркуль для вимірювання товщини оболонки; спецодяг.

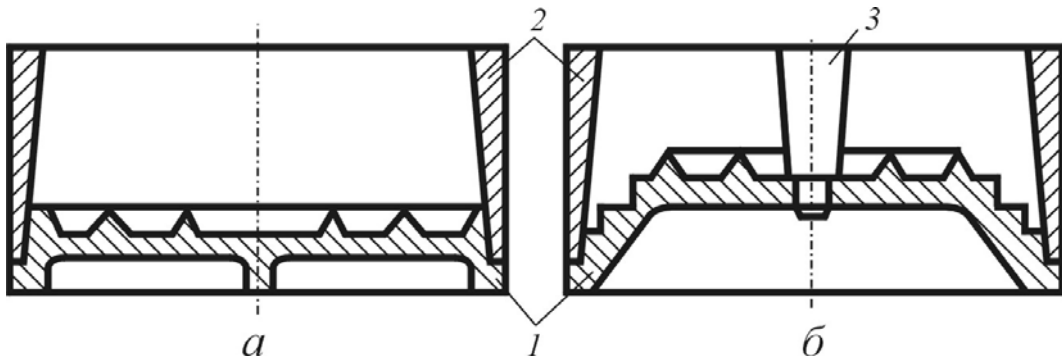


Рисунок 1.2 – Модельна плита для нижньої (а) і верхньої (б) напівформ:  
1 – модельна плита; 2 – наповнювальна рамка; 3 – стояк

## Послідовність виконання роботи

1. Приготувати по 1 кг піщано-смоляних сумішей складів №1, 3 і 4 і 2 кг суміші складу №2 за способом холодного плакування. Склад сумішей наведений у табл. 1.1.

Після приготування суміш продути 5 хв повітрям і просіяти через сито 02.

2. Досліджувати залежність товщини оболонки від часу витримки моделі у контакті з сумішшю.

2.1. Модельну плиту з моделлю нагріти в муфельній печі до температури 250 °С і покрити тонким шаром розчину СКТР.

**Таблиця 1.1 – Склад сумішей**

Компоненти суміші	Вміст у суміші, мас.ч.:			
	номер суміші			
	1	2	3	4
Кварцовий пісок	100,0	100,0	100,0	100,0
З'язувальний компонент СФП-011Л	2,0	4,0	6,0	8,0
Фурфурол або	1,0	1,0	1,5	1,5
Етилацетат (розчинник 646)	1,5	1,5	2,0	2,0

2.2. Витягнути з печі модельну плиту, встановити на неї наповнювальну рамку, засипати піщано-смоляну суміш, витримати 10 с, поворотом плити на 180° видалити надлишок суміші і зняти одержану оболонку.

2.3. Операції пп. 2.1 і 2.2 повторити при витримці суміші на моделі 30, 60 і 90 с.

2.4. Заміряти штангенциркулем товщину кожної оболонки в трьох місцях, одержані дані занести в табл. 1.2, знайти середньоарифметичне значення товщини оболонки і побудувати графік залежності  $\delta = f(\tau)$ , де  $\delta$  – товщина оболонки, м;  $\tau$  – час витримки моделі в контакті з сумішшю.

**Таблиця 1.2 – Товщина оболонкової півформи при різній тривалості витримування суміші на моделі**

Товщина оболонок, $\cdot 10^{-2}$ м, при $\tau$ , с															
10				30				60				90			
$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{cp}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{cp}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{cp}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{cp}$

3. Дослідити вплив вмісту зв'язувального компонента на міцність піщано-смоляних сумішей.

3.1 Нагріти три стрижневих ящики для виготовлення зразків-вісімок до 250 °С і покрити їх тонким шаром СКТР.

3.2. По черзі витягнути кожен ящик з печі, засипати в нього суміш №1, ущільнити її за допомогою копра трьома ударами, зрізати надлишок суміші, помістити стрижневий ящик у піч і витримати його при температурі 250 °С 80 с, після чого вилучити ящик з печі і розібрати.

3.3. Зразки-вісімки охолодити до кімнатної температури і визначити їх міцність при розриванні.

3.4. Аналогічно провести випробування сумішей № 2...4.

3.5. Одержані дані занести в табл. 1.3 і побудувати графік залежності впливу кількості зв'язувального компонента в суміші на її міцність при розриванні.

3.6. Узагальнити одержані дані і зробити висновок про оптимальний вміст зв'язувального компонента в суміші.

4. Дослідити вплив температури тверднення на міцність піщано-смоляної суміші.

4.1. На підставі висновків по п. 3.6 приготувати 2 кг суміші відповідного складу.

4.2. Виготовити по три розривні зразки при температурах 200, 250, 300, 350 °С, зберігаючи порядок виготовлення зразків і тривалість їх витримки в печі згідно п. 3.2.

4.3. Зразки-вісімки охолодити до кімнатної температури і визначити їх міцність при розтягуванні.

4.4. Одержані дані і показники міцності сумішей при різних температурах від 200 до 350 °С внести в табл. 1.4. Побудувати графік залежності впливу температури тверднення на міцність піщано-смоляної суміші.

**Таблиця 1.3 – Міцність сумішей різних складів**

Тимчасовий опір при розриванні $\sigma$ , МПа, сумішей №:															
1				2				3				4			
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$

**Таблиця 1.4 – Міцність сумішей після тверднення при різних температурах**

Тимчасовий опір при розриванні $\sigma$ , МПа, при температурі тверднення, °С															
200				250				300				350			
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{\text{ср}}$

5. Дослідити вплив тривалості тверднення на міцність піщано-смоляної суміші.

5.1. Виготовити по три зразки при температурі, встановленій на підставі висновків по п. 4.4, з витримкою 30, 90, 180 і 240 с.

Порядок виготовлення зразків зберегти той же, що і в п. 3.2.

5.2. Зразки-вісімки охолодити до кімнатної температури і визначити їх міцність при розриванні.

5.3. Одержані дані занести в табл. 1.5, запозичивши необхідні дані з табл. 1.4, і побудувати графік залежності впливу тривалості твердіння на міцність піщано-смоляної суміші.

6. Узагальнити результати проведених досліджень щодо оптимальних параметрів технологічного процесу виготовлення оболонок.

6.1. За допомогою математичного апарату визначити абсолютні та відносні похибки результатів.

**Таблиця 1.5 – Міцність суміші після різної тривалості тверднення**

Тимчасовий опір при розриванні $\sigma$ , МПа, при тривалості тверднення, с:															
30				60				180				240			
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{cp}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{cp}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{cp}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_{cp}$

6.2. Побудувати графічні залежності.

7. Оцінити якість поверхні виливків при литті в оболонкові форми.

7.1. На підставі висновків щодо оптимальних параметрів технологічного процесу (п. 6) з використанням модельних плит з моделями (див. рис. 1.2, а, б) виготовити оболонкові напівформи та зібрати їх під заливання.

Одержані форми залити алюмінієвим сплавом, охолодити і вибити.

7.2. Порівняти якість литої поверхні виливків з еталонними зразками і зробити висновок.

### Контрольні питання

1. Що собою являє оболонкова форма?
2. Сутність способу литва в оболонкові форми.
3. Основні переваги і недоліки цього методу.
4. Характеристика початкових матеріалів для приготування піщано-смоляних сумішей.
5. Рецептатура і властивості піщано-смоляних сумішей.
6. Різновиди піщано-смоляних сумішей і способи їх приготування.
7. Порядок операцій при виготовленні форм і стрижнів.
8. Заходи щодо охорони праці при роботі з піщано-смоляними сумішами і оболонковими формами.

### Оброблення результатів роботи

Оброблення результатів досліджень виконати за допомогою програми MS Excel відповідно до наведеної методики

### Зміст звіту

Звіт має містити такі матеріали:

- назву та мету роботи, короткі теоретичні відомості;
- послідовність виконання роботи та схему установки;
- результати досліджень з відповідними розрахунками у вигляді таблиць та графіків;
- висновки.

## Лабораторна робота № 2

### ВПЛИВ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ФОРМИ НА ЯКІСТЬ ВИЛИВКІВ ПРИ ВІДЦЕНТРОВОМУ ЛИТВІ

**Мета роботи** – дослідити вплив частоти обертання форми і температурного інтервалу кристалізації сплаву на структуру виливків.

Робота розрахована на 6 годин.

Відцентровим литтям називається процес отримання виливків шляхом вільного заливання металу в форми, що обертаються, при цьому вилівок формується під дією відцентрових сил.

Переваги відцентрового лиття в порівнянні з литтям в стаціонарні форми полягає в тому, що відцентрові виливки мають менше міжкристалітних порожнин усадкового і газового походження, а отже, мають вищу щільність; зменшується або повністю усувається витрата металу на ливникові системи тобто суттєво підвищується вихід придатного литва; відсутні витрати на виготовлення стрижнів для отримання порожнини в циліндричних виливках; поліпшується заповнювання форми металом тощо.

Недоліки способу – утрудненість виготовлення якісних виливків із сплавів, схильних до ліквіації, і забруднення вільної поверхні виливків ліквідами і неметалевими вкрапленнями.

Цей спосіб широко використовують під час виробництва порожнистих циліндричних виливків, що є тілами обертання (труби, вінці черв'ячних коліс, гільзи двигунів внутрішнього згорання, маслоти для поршневих кілець та ін.), а також для виготовлення фасонних виливків [3].

Лиття порожнистих циліндричних заготовок при відцентровому способі (рис. 2.1) засноване на тому, що рідкий метал, залитий у форму, яка обертається, під дією відцентрових сил притискається до стінок форми, за рахунок сил тертя він захоплюється в обертання і в цих умовах охолоджується до повного тверднення.

В металі, що обертається, виникають відцентрові сили, які притискають метал до стінок виливниці, і в цих умовах він охолоджується, поки не затвердне. При цьому у виливках утворюється порожнина, розмір якої залежить від кількості залитого в форму металу.

Лиття фасонних заготовок відцентровим способом, або литво центрифугуванням (рис. 2.1, б), засноване на використанні відцентрових сил для покращання заповнення форми металом і підвищення його щільності. При цьому вісь обертання форми переважно не співпадає з віссю виливка і навіть знаходиться за його межами.

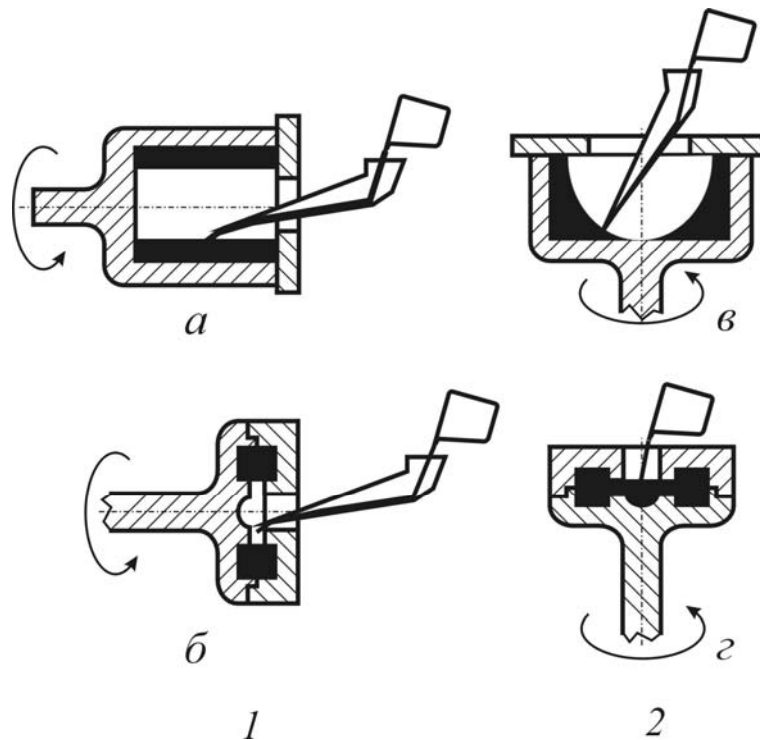


Рисунок 2.1 – Схема відцентрового лиття порожнистих циліндричних заготовок (а) і фасонних виливків (б) на машинах з горизонтальною (1) і вертикальною (2) осями обертання

### Технологічні особливості відцентрового литва

При відцентровому литві застосовують машини з горизонтальною (рис. 2.1, 1), нахиленою і вертикальною осями обертання (рис. 2.1, 2) виливниці. Машини з горизонтальною і нахиленою осями обертання застосовують для виготовлення таких виливків як труби різного діаметру і довжини, а з вертикальною – для виготовлення фасонних виливків і виливків типу тіл обертання, діаметр яких значно більший за висоту. Внутрішня поверхня таких виливків має вид параболоїда обертання, тому вони мають різну товщину по висоті.

Лиття у форму, що обертається, в порівнянні з литтям в нерухому форму має ряд особливостей, які впливають на кристалізацію металу і якість виливків. Основні з них наступні. Якщо кристалізація металу або сплаву під час виготовлення трубних заготовок в нерухомій формі відбувається одночасно із зовнішньою і внутрішньою поверхні, що призводить до зосередження в центральній зоні вилівка домішок, що ліквують, вкраплень, газів, усадкової поруватості, і вони залишаються в готовій деталі, то при відцентровому литті рідкий метал рухається до стінок виливниці, де і твердне. При цьому зовнішні шари вилівка підживлюються свіжими порціями рідкого металу, що обумовлює отримання виливків без дефектів.

Для сплавів, у яких при охолодженні випадають кристали з щільністю більшою за щільність розплаву, що заливається, при відцентровому литті створюється направлений фронт кристалізації від зовнішньої поверхні, при

цьому гарячіший і легший метал витіснятиметься на внутрішню, а кристали – на зовнішню поверхню, що сприяє просякненню металу в міждендритні пори.

Для сплавів з меншою щільністю кристалів, ніж щільність розплаву, який заливають (заевтектичні силуміни, вісмут), характерні два напрямки фронту кристалізації: від зовнішньої поверхні за рахунок теплопередачі через виливницю і від внутрішньої – за рахунок витіснення на неї кристалів, які кристалізуються в першу чергу. Як і під час заливання металу в стаціонарні форми, центральна зона відцентроволитих заготовок з таких сплавів буде уражена усадковими, газовими і ліквацийними дефектами.

При литті важких сплавів відцентровим способом неметалеві вкраплення, як легші, витісняються на внутрішню поверхню і видаляються із виливка механічним обробленням. Проте при литті легких сплавів (алюмінієвих і магнієвих) оксиди переміщуються всередину виливка, оскільки їх щільність вища за щільність основного металу.

При відцентровому литті внаслідок різної частоти обертання окремих шарів металу відбувається інтенсивне руйнування дендритів, що призводить до появи додаткових центрів кристалізації, і це обумовлює отримання дрібнішого зерна у виливках, ніж при литті в статичні металеві форми. Подрібненню зерна сприяє також підвищена теплопередача від розплаву до виливниці, оскільки відцентрові сили забезпечують кращий і триваліший контакт виливка з формою.

Великий вплив на якість виливків при відцентровому литті має частота обертання виливниці. Оптимальну частоту обертання форми можна визначити за емпіричною формулою Константінова Л.С.

$$n = \frac{5520}{\sqrt{\gamma \cdot r}},$$

де  $n$  – частота обертання форми, об/хв;

$\gamma$  – густина сплаву, що заливається, г/см<sup>3</sup>;

$r$  – внутрішній радіус виливка, см.

Частота обертання форми встановлюється також залежно від температурного інтервалу кристалізації сплаву, що заливають, причому чим ширший інтервал кристалізації, тим більшою повинна бути частота обертання форми, щоб одержати щільний виливок [4].

Це пояснюється наступним. При одній і тій же температурі твердо-рідкого стану з підвищенням інтервалу кристалізації сплаву утворюється більше дендритів із первинних фаз, що обумовлює збільшення товщини кристалічного каркасу. Рух розплаву міждендритними каналами уповільнюється, і у виливку з'являються об'єми, усадка в яких не компенсується рідкою фазою. Це призводить до появи поруватості. Підвищення ж частоти обертання форми покращує умови проникнення рідкого металу в міждендритні пори, оскільки зростає відцентровий тиск на розплав.

При відцентровому литті застосовують як багаторазові металеві, так і разові піщані форми.

Металеві форми перед заливанням підігрівають до 120...250 °С для сплавів алюмінію, до 50...150 °С для сплавів міді і до 150 °С для чавуну. Для запобігання контакту робочої поверхні з розплавленим металом її покривають рідким або сипким теплоізоляційним покриттям, або наносять шар копті.

### **Техніка безпеки при відцентровому литві**

1. Під час виконання досліджень необхідно виконувати загальні правила з техніки безпеки, які наведено в розділі «Техніка безпеки».
2. Робота на відцентровій машині дозволяється тільки за наявності справних огорож рухомих частин і кожуха виливниці.
3. Виливниця разом з відцентровими машинами повинна бути урівноважена і не повинна створювати вібрації під час обертання.
4. Перед заливанням сплаву відцентрова машина повинна бути випробувана в неробочому режимі.
5. Весь інструмент для заливання повинен бути пофарбованим, добре просушеним і нагрітим до температури не менше 100 °С.
6. При перенесенні розплавленого металу ручним ковшем його необхідно тримати збоку і позаду, щоб метал не потрапив на ноги.
7. Заливання рідкого металу у виливницю слід виконувати мірним ковшем, не допускаючи його переливання через внутрішній діаметр кришки.
8. Заливати метал у виливницю потрібно тільки у спецодезі і захисних окулярах.

### **Устаткування, інструменти та матеріали**

Відцентрова машина (рис. 2.2); тахометр; тигельна піч для плавлення; гальванометр з хромель-алюмельовою термопарою; аналітичні терези; ножівковий верстат з полотном; скребачки; кліщі; наждачний папір; 15%-й розчин NaOH; 30%-й розчин HNO<sub>3</sub>; спирт; фарба на основі крейди або оксиду цинку для виливниці і жолоба; мірні ковші для заливання металу місткістю 1 кг; сплав АК-7; рукавиці; халати; захисні шоломи або окуляри.

### **Послідовність проведення роботи**

1. Ознайомитися з конструкцією відцентрової машини (рис. 2.2). Підігріти виливницю, кришку і жолоб до 100...120 °С і пофарбувати фарбою складу: вода – 100, рідке скло – 6, крейда – 25 і оксид цинку – 25 мас.ч.
2. Зібрати виливницю під заливання, закрити кожух машини і встановити жолоб в отвір дверцят.
3. Приготувати 15 кг сплаву з 12...13% Si (марка сплаву АК12) і нагріти його до температури 720 °С.
4. За допомогою варіатора швидкостей по тахометру встановити частоту обертання виливниці 300, 600, 900 і 1200 хв<sup>-1</sup> і на кожному режимі відлити по



три заготовки. Через 2...3 хв. після заливання сплаву вимкнути електродвигун машини, відкрити кожух, зняти кришку і кліщами витягнути виливок.

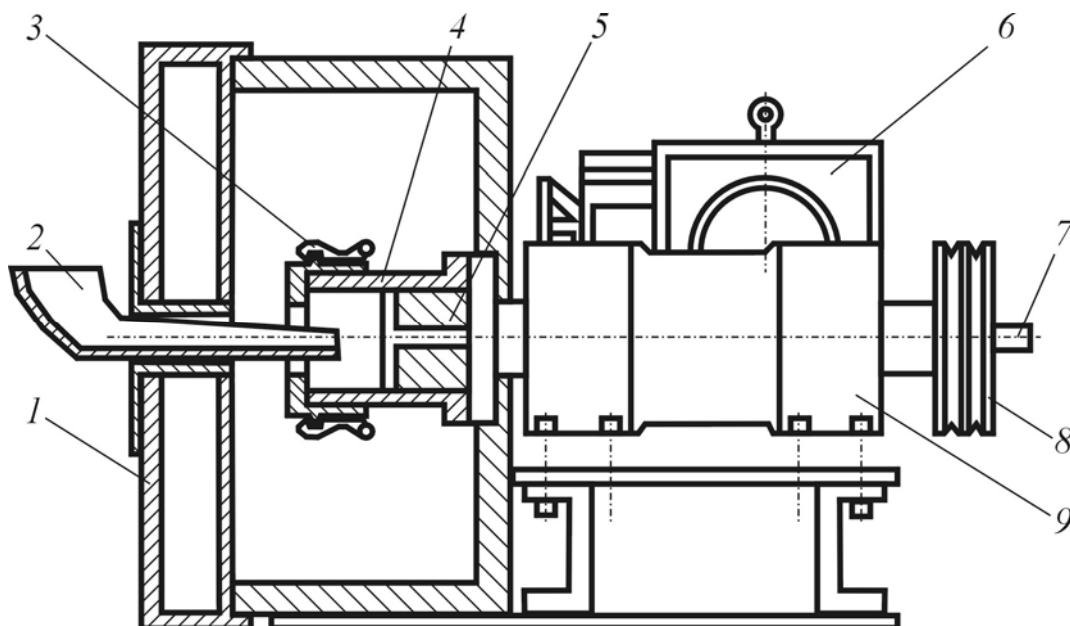


Рисунок 2.2 – Відцентрова машина: 1 – дверцята; 2 – жолоб; 3 – відцентрові затиски; 4 – виливниця; 5 – змінна вставка; 6 – варіатор швидкості; 7 – шток виштовхувача; 8 – шків; 9 – корпус підшипника

5. Одержані виливки (втулки діаметром 151 мм, завдовжки 80 мм і товщиною стінки 15...18 мм) охолодити і вирізати ножівкою чотири зразки розмірами  $18 \times 18 \times 18$  мм. З одного зразка виготовити шліф для дослідження макроструктури виливка в її поперечному перерізі. Для цього зразок шліфують послідовно на наждачному папері № 80, 120 і 280, промивають спиртом для видалення оливи і бруду, висушують за допомогою фільтрувального паперу і травлять в підігрітому до  $60...80$  °С 15%-у розчині NaOH до утворення темної плівки протягом 10...90 с, потім промивають у воді і занурюють в 30%-й розчин  $HNO_3$  для зняття темної плівки.

Одержані шліфи замалювати, описати і пояснити характер розташування поруватості, оцінити її в балах за ДСТУ 2839-94 і занести в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Властивості виливків, отриманих при різних параметрах відцентрового лиття

Температура сплаву, °С	Частота обертання, хв. <sup>-1</sup>	Властивості виливків							
		AK12							
		бал поруватості				щільність, кг/м <sup>3</sup>			
		Б <sub>1</sub>	Б <sub>2</sub>	Б <sub>3</sub>	Б <sub>ср</sub>	γ <sub>1</sub>	γ <sub>2</sub>	γ <sub>3</sub>	γ <sub>ср</sub>

На решті зразків визначити щільність сплаву. Для цього зразок підвісити на тонкій капроновій нитці і зважити на повітрі і в воді з точністю до другого знаку.

Визначити щільність сплаву за формулою:

$$\gamma = \frac{M_{\text{п}} \cdot \gamma_{\text{р}}}{M_{\text{п}} - M_{\text{р}}},$$

де  $M_{\text{п}}$ ,  $M_{\text{р}}$  – маса зразка на повітрі та в рідині відповідно, г;  
 $\gamma_{\text{р}}$  – щільність води, г/см<sup>3</sup>.

6. Розрахувати гравітаційний коефіцієнт, який характеризує ступінь тяжіння сплаву під дією відцентрових сил:

$$K = \frac{\omega^2 \cdot r}{g},$$

де  $\omega$  – кутова швидкість, 1/с;  
 $r$  – внутрішній радіус виливка, см;  
 $g$  – земне прискорення, см/с<sup>2</sup>.

Кутова швидкість визначається за формулою:

$$\omega = \frac{n \cdot \pi}{30},$$

де  $n$  – частота обертання виливниці, хв.<sup>-1</sup>

7. Побудувати графік залежності щільності сплаву від гравітаційного коефіцієнта.

8. Розрахувати відносну і абсолютну похибку вимірювань.

9. Узагальнити одержані дані і зробити висновок щодо оптимального значення гравітаційного коефіцієнта для сплаву АК12.

### **Контрольні питання**

1. Сутність відцентрового лиття.
2. Основні переваги і недоліки цього способу.
3. Особливості відцентрового лиття.
4. Область застосування цього способу.
5. Різновиди відцентрового лиття.
6. Види форм для відцентрових виливків.
7. Підготовка виливниць до роботи.
8. Вплив гравітаційного коефіцієнта на якість виливків.
9. Конструкції відцентрових машин.
10. Заходи щодо охорони праці при відцентровому литті.

### **Оброблення результатів роботи**

Оброблення результатів досліджень виконати за допомогою програми MS Excel відповідно до наведеної методики.

#### **Зміст звіту**

Звіт має містити такі матеріали:

- назву та мету роботи, короткі теоретичні відомості;
- послідовність виконання роботи та схему установки;
- результати досліджень з відповідними розрахунками у вигляді таблиць та графіків;
- висновки.

### **Лабораторна робота № 3**

## **ВПЛИВ ТОВЩИНИ ВОГNETРИВКОГО ПОКРИТТЯ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ ПРИ ЛИТВІ В КОКІЛЬ**

**Мета роботи** – дослідити вплив товщини вогнетривкого покриття кокілю на якість поверхні і міцність при розриванні зразків з алюмінієвих сплавів, одержаних методом лиття в кокіль.

Робота розрахована на 6 годин.

Литтям у кокіль називають процес отримання виливків вільним заливанням розплавленого металу в металеві форми-кокілі.

Лиття в кокіль є одним із прогресивних методів ливарного виробництва, оскільки забезпечує різке підвищення продуктивності праці, механічних властивостей і точності виливків, зменшує шорсткість поверхні виливків і сприяє зниженню припуску на механічне оброблення.

Недоліки кокільного литва: висока вартість виготовлення металевих форм робить цей вид литва рентабельним тільки за умови серійного і масового виробництва; неподатливість металевих форм накладає певні обмеження на конфігурацію литої деталі і вибір сплаву; газонепроникність металевої форми вимагає заходів для вентиляції.

Лиття в кокіль широко застосовують в серійному і масовому виробництвах виливків з алюмінієвих, магнієвих і мідних сплавів, рідше – з чавуну та сталі.

### **Технологія лиття в кокіль**

Технологічний процес виробництва виливків у кокілі складається із замкненого циклу наступних операцій:

- підготовки кокілю до заливання, яке складається з підігрівання його до 120...250 °С і фарбування робочої поверхні;
- установа стрижнів (якщо вилівок має порожнини) та збирання кокілю;
- заливання розплавленого металу в порожнину кокілю;
- видалення виливків з кокілю після тверднення металу і охолодження до необхідної температури.

Підготовка кокілю до заливання є однією з відповідальних операцій технології лиття в від якої залежить термін експлуатації кокілю і якість виливків, які виготовляють в ньому. Основна операція підготовки кокілю до роботи – фарбування або нанесення покриття. Призначення покриття – усунути безпосередній контакт розплаву з металом кокілю і попередити цим приварювання вилівка до його стінок, а також зменшити швидкість охолодження вилівка. У зв'язку з цим покриття повинні мати малу теплопровідність, хороше зчеплення з робочою поверхнею кокілю і міцно утримуватися на ній. Ці вимо-

ги до покриттів, в основному, досягаються внаслідок введення до їх складу як наповнювачів порошків графіту, маршаліту, циркону, оксиду цинку або ін., а як зв'язувальних компонентів – рідкого скла, полісилоксану або термореактивних смол.

На робочу поверхню кокілю покриття наносять за допомогою пульверизатора або пензля, при цьому вища стійкість покриття досягається при пошаровому нанесенні фарб.

Товщина шару фарби на робочій поверхні кокілю має великий вплив на швидкість кристалізації залитого металу: чим товщий шар фарби, тим менше теплоакумуюча здатність, і тим повільніше охолоджується виливок. Тому товщиною покриття можна регулювати тепловіддачу від залитого металу до кокілю і створювати умови для направленої кристалізації виливка. З цією метою поверхні кокілів, такі як радіуси переходів, бобишки, виступи, фарбуються тоншим шаром фарби, а ливникові системи – товстим шаром або утеплювальним облицьовуванням на основі вогнетривких матеріалів.

### **Техніка безпеки при кокільному литві**

1. Під час виконання досліджень необхідно виконувати загальні правила з техніки безпеки, які наведено в розділі «Техніка безпеки».
2. Неприпустима робота з кокілями, які мають в зібраному під заливання стані щілини по лінії розніму.
3. Кокілі, ковші і ложки перед заливанням повинні бути просушені і підігріті.
4. Для попередження опіків роботу з кокілем здійснювати в рукавицях, а виливок виймати з кокілю кліщами.
5. Розливання металу здійснювати тільки в спецодязі і захисних окулярах або в масці.

### **Устаткування, інструменти і матеріали**

Машина моделі МР-100 для випробування металевих зразків на тимчасовий опір розриванню, кокіль для виливків стандартних циліндричних зразків; пензель для нанесення покриттів на кокілі; штангенциркуль для контролю товщини покриття кокілю; мішалка для приготування покриттів; ваги; ножівка; тигельна піч для плавлення алюмінію; ковші для розливання металу; алюмінієвий сплав; оксид цинку; рідке скло; спецодяг.

### **Порядок виконання роботи**

1. Приготувати 0,1 кг фарби складу, мас.ч.: оксид цинку – 4...6; рідке скло – 1,5...2,0; вода – 92,0...94,5.
2. Нагріти кокіль для виливків стандартних зразків до 150...220 °С і пофарбувати його робочу поверхню за допомогою пензля на умовну товщину  $\approx 0,0001$  м.
3. Підготувати алюмінієвий сплав і відлити по черзі три зразки. Зразки охолодити до кімнатної температури, відокремити ножівкою від ливникової

системи, визначити їх міцність на тимчасовий опір розриванню і заміряти діаметр зразка в трьох місцях, визначити середній діаметр.

4. Нанести на кокіль шар фарби умовною товщиною  $\approx 0,0003$ ;  $0,0006$  і  $0,0010$  м шляхом багатошарового фарбування і повторити операції по п. 3 для кожної товщини шару. Одержані дані занести в табл. 4.1.

5. Оцінити якість литої поверхні зразків, порівнюючи з литвом, виготовленим в піщаних формах, і залежно від товщини покриття кокілю.

6. Побудувати графік залежності міцності при розриванні від товщини покриття кокілю. Проаналізувати експериментальні дані.

7. Розрахувати відносну і абсолютну похибку вимірювань.

**Таблиця 4.1 – Експериментальні дані**

Товщина покриття, м	Діаметр зразка, м				Навантаження при розриванні, кН				Тимчасовий опір при розриванні, $\sigma_B$ , МПа
	1	2	3	сер	1	2	3	сер	

### **Контрольні питання**

1. Сутність лиття в кокіль.
2. Основні переваги і недоліки цього методу в порівнянні з литтям у піщано-глинясті форми.
3. Галузь застосування способу литва в кокіль.
4. Схема технологічного процесу лиття в кокіль.
5. Призначення покриттів для кокілів.
6. Основні заходи з охорони праці при кокільному литті.
7. Основні рецептури термостійких покриттів.
8. Яка необхідність нагрівання кокілю.
9. Вагові чинники теплового режиму кокілю.

### **Оброблення результатів роботи**

Оброблення результатів досліджень виконати за допомогою програми MS Excel відповідно до наведеної методики.

### **Зміст звіту**

Звіт має містити такі матеріали:

- назву та мету роботи, короткі теоретичні відомості;
- послідовність виконання роботи та схему установки;
- результати досліджень з відповідними розрахунками у вигляді таблиць та графіків;
- висновки.

## МАТЕМАТИЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### Оброблення результатів вимірювань.

Під час оброблення результатів вимірювань можна послідовно виконати наступні операції:

1. Обчислити середнє значення з  $n$  вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

2. Визначити абсолютні похибки окремих вимірювань:

$$\Delta x = x_i - \bar{x};$$

3. Обчислити квадрати похибок окремих вимірювань  $\Delta x^2$ :

$$\Delta x^2 = (x_i - \bar{x})^2;$$

4. Якщо кілька вимірів різко відрізняються за своїми значеннями від інших вимірів, то слід перевірити, чи не є вони промахом. При виключенні одного або декількох вимірювань п.п. 1 ... 4 повторити;

5. Визначити стандартне відхилення (середньоквадратичне відхилення або середню квадратичну похибку) результату серії вимірювань:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x^2}{n \cdot (n-1)}}$$

6. Визначити коефіцієнт Стьюдента  $t_{\alpha}(n)$  для обраної надійності  $\alpha$  (задаємося) і числа проведених вимірювань  $n$ .

7. Як межі довірчого інтервалу серії вимірювань слід взяти величину:

$$\delta = t_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}}$$

8. Записати остаточний результат:

$$x = \bar{x} \pm \delta; \quad \alpha = 0,95$$

9. Якщо величина абсолютної похибки результатів вимірювань (п.5) виявиться порівняною з величиною похибки приладу  $\delta_{\text{пр}}$ , то як межі довірчого інтервалу слід взяти величину:

$$\delta = \sqrt{t_{\alpha}^2(n) \cdot S_{\bar{x}}^2 + \left[ \frac{t_{\alpha}(\infty)}{3} \right]^2 \cdot \delta_{\text{пр}}^2}$$

10. Записати остаточний результат:  $x = \bar{x} \pm \delta$ .

11. Оцінити відносну похибку результату серії вимірювань:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

### Стандартне відхилення (середньоквадратичне відхилення).

Стандартне відхилення або середньоквадратичне відхилення, позначається як  $S$  або  $\sigma$  – у теорії ймовірності і статистиці найпоширеніший показник розсіювання значень випадкової величини відносно її математичного очіку-

вання. Вимірюється в одиницях виміру самої випадкової величини. По суті, якщо взяти прикладні задачі, то стандартне відхилення – це найбільш використовуваний індикатор мінливості об'єкта, який показує, на скільки в середньому відхиляються індивідуальні значення ознаки  $x_i$  від їх середньої величини  $\bar{x}$ .

Використання. Стандартне відхилення використовують під час розрахунку стандартної похибки середнього арифметичного, для побудови довірчих інтервалів, статистичної перевірки гіпотез, виміру лінійного взаємозв'язку між випадковими величинами.

Середньоквадратичне відхилення дорівнює кореню квадратному з дисперсії випадкової величини:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Відповідно до формул з обчислення дисперсії:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

при невеликій вибірці ( $n \leq 50$ ) вводиться поправка Бесселя:

$$S = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

де  $S$  – стандартне відхилення, незміщена оцінка середньоквадратичного відхилення випадкової величини  $X$  відносно її математичного очікування;

$\sigma^2$  – дисперсія;

$x_i$  –  $i$ -й елемент вибірки;

$\bar{x}$  – середнє арифметичне вибірки:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$n$  – обсяг (розмір) вибірки.

Слід звернути увагу на відмінність стандартного відхилення (у знаменнику  $n-1$ ) від кореня з дисперсії (у знаменнику  $n$ ). Для малих обсягів вибірки оцінка дисперсії є дещо зміщеною на величину  $n/(n-1)$ , для нескінченно великого обсягу вибірки різниця між вказаними величинами зникає.

Стандартне відхилення в ряді випадків виявляється кращим для використання, ніж дисперсія, по тій причині, що виражається в тих же одиницях, що і середня арифметична величина.

Порівняння особливостей розподілу варіантів у різних вибірках лише за показниками нормованого відхилення ( $\sigma$ ) недостатньо, а іноді неможливо (коли необхідно порівнювати варіаційні ряди, де ознаки вимірювалися в різних одиницях вимірювання, наприклад, одна вибірка – вага людини в кілограмах, а інша – зріст людини в сантиметрах). Для таких порівнянь застосовується відносний показник, який позначається символом  $t$  і зветься нормованим відхиленням.



## Правило 3-х сигм

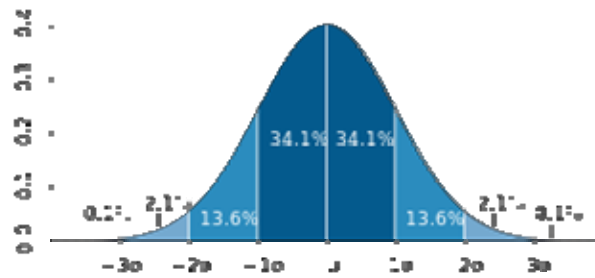


Рисунок 1 – Графік нормального розподілу

Правило 3-х сигм ( $3\sigma$ ) – практично всі значення нормально розподіленої випадкової величини лежать в інтервалі  $[\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma]$ . Точніше – не менш, ніж із 99,7% достовірністю, значення нормально розподіленої випадкової величини лежить у вказаному інтервалі (за умови що величина  $\bar{x}$  достеменно відома, а не отримана в результаті обробки вибірки). Якщо істинне значення величини невідоме, то слід користуватися не  $\sigma$ , а  $S$ . Таким чином, правило 3-х сигм перетвориться в правило трьох  $S$ .

Згідно ймовірнісної теореми П.Л. Чебишева, слід очікувати, що незалежно від форми розподілу, 75% значень ознаки будуть перебувати в діапазоні  $(x \pm 2\sigma)$ , а 89% значень – в діапазоні  $(x \pm 3\sigma)$ . У нормально розподілених і близьких до них рядах ймовірнісні оцінки діапазонів розсіювання значень ознаки такі (співвідношення відоме як правило «трьох сигм»):

- 68,3% увійде в діапазон  $(x \pm \sigma)$ ;
- 95,4% потрапить в діапазон  $(x \pm 2\sigma)$ ;
- 99,7% з'явиться в діапазоні  $(x \pm 3\sigma)$ .

Для вибіркової сукупності значення  $x$  і  $\sigma$  розраховані і є точними, тому, ґрунтуючись на правилі «трьох сигм», можна точно оцінити межі всіх трьох діапазонів розсіювання ознаки і визначити, скільки значень  $x_i$  потрапляє в кожен з діапазонів. У разі генеральної сукупності точно відома тільки величина  $\sigma$ , а для середньої  $x$  розраховані лише граничні помилки вибірки. По-цьому для генеральної сукупності оцінки розсіювання значень ознаки за трьома діапазонами є прогнозними і зазвичай задаються в формі з конкретним числовим значенням параметра  $\sigma$ . Враховуючи правило «трьох сигм», у статистичній практиці величину  $3\sigma$  вважають в умовах нормального і близьких до нього розподілів максимально допустимою помилкою спостереження і відкидають результати спостережень, для яких  $|x_i - \bar{x}| > 3\sigma$

Для нормального розподілу справедлива рівність розмаху регулювання  $R = 6\sigma$ .

В умовах близькості розподілу одиниць генеральної сукупності до нормального це співвідношення використовується для прогнозної оцінки розмаху варіації ознаки у генеральній сукупності.

### Довірчий інтервал.

**Знаючи  $S$**  – стандартне відхилення або дисперсію  $\sigma$  – можна розрахувати довірчий інтервал за допомогою критерію Ст'юдента.

Довірчий інтервал – граничні значення статистичної величини, яка з заданою довірчою ймовірністю знаходитиметься в цьому інтервалі у випадку виборки більшого обсягу. Позначається як:  $P(\theta - \varepsilon < x < \theta + \varepsilon) = \gamma$ .

Мірою довіри оцінці  $\theta$  вважається ймовірність  $\gamma$  того, що похибка оцінки  $|\theta - x|$  не перевищить заданої точності  $\varepsilon$ :  $P(|\theta - \bar{\theta}| < \varepsilon) = \gamma$ . На практиці обирають довірчу ймовірність з достатньо близьких до одиниці значень 0,9; 0,95; 0,99 ( $\gamma = 0,9$ ,  $\gamma = 0,95$ ,  $\gamma = 0,99$ ).

Алгоритм знаходження довірчого інтервалу:

1. Задається довірна ймовірність  $\gamma$  (надійність).
2. У вибірці визначається оцінка параметра  $\alpha$ , що досліджується.
3. Із співвідношення  $P(\alpha_1 < a < \alpha_2) = \gamma$  визначається помилка  $\varepsilon$ .
4. Розраховується довірчий інтервал ( $a - \varepsilon$ ;  $a + \varepsilon$ ).

**Прوماхи** (рос. *промах*, англ. *miss, gross (crude), error*) – результати, які різко відрізняються від інших результатів вимірювань і є наслідком порушення умов досліду, зокрема вимірювання (неправильні дії спостерігача-експериментатора, несправність вимірювальної апаратури, різка зміна зовнішніх умов тощо).

Статистичні оцінки випадкової величини (середнє арифметичне  $\bar{x}$  і стандартне відхилення  $S_x$  або дисперсія  $\sigma$ ) розраховуються з припущення, що вибірка  $x_i$  не містить результатів з надмірною похибкою (промахів). Для виключення промахів з великої вибірки можна користуватися правилом  $2\sigma$  ( $2S_x$ ) або  $3\sigma$  ( $3S_x$  і навіть  $1\sigma$  ( $1S_x$ )). Для промаху  $x'$  розраховується абсолютне значення різниці  $|x' - \bar{x}|$ . При довірчій імовірності  $P = 0,95$   $x'$  відкидається, якщо  $|x' - \bar{x}| > 2\sigma$ , а при  $P = 0,997$ , якщо  $|x' - \bar{x}| > 3\sigma$ .

Для невеликих вибірок, коли  $S_x$  суттєво відрізняється від середнього квадратичного відхилення  $\sigma$ , користуються критерієм Ст'юдента, при цьому порівнюють:  $t = \frac{|x' - \bar{x}|}{S_x}$  з табличним значенням  $t_p$ . Якщо  $t > t_p$ , то з довірчою

імовірністю  $P$  можна вважати, що результат вимірювання  $x'$  є промахом, але й при  $t \leq t_p$  не можна говорити про відсутність промаху, а можна тільки говорити про недостатні підстави для виключення даного вимірювання. Після виключення промаху  $\bar{x}$  і  $S_x$  необхідно знов перерахувати та розглянути питання про промахи у вибірці, що залишилась.

**Похибка вимірювання** – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної фізичної величини:

$$\Delta = x - x_{\text{ист}}$$

де  $x$  – результат вимірювання величини  $X$ ;

$x_{\text{ист}}$  – її істинне значення.

*Наприклад, результат зважування деякого тіла на терезах становив 1 кг. Для визначення похибки зважування була використана еталонна гиря, номінальної маси 1 кг. Її дійсна маса, встановлена під час її перевіряння і вказана в свідоцтві про перевірку, рівна 1,00003 кг. При зважуванні вказаної гири на цих же вагах, за тим же методом і за тих же умов, що і тіла, одержали значення 0,99998 кг. Тоді оцінка похибки зважування еталонної гири  $\Delta \approx (0,99998 - 1,00003) = -0,00005$  кг. Оскільки результат зважування тіла близький до результату зважування гири, це розраховане значення похибки можна прийняти за оцінку похибки результату зважування тіла.*

### **Класифікація похибок вимірювання**

Залежно від обраної класифікаційної ознаки існують різні класифікації похибок вимірювання, серед яких можна виділити найпоширеніші:

- за формою вираження;
- за джерелами виникнення;
- за закономірностями виникнення та прояву.

За формою вираження похибки вимірювання поділяються на **абсолютні** та **відносні**.

**Абсолютна похибка вимірювання** – це похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини.

**Відносна похибка вимірювання** – це похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної похибки до дійсного чи виміряного значення.

Відносну похибку у частках вимірюваної величини або у відсотках знаходять із співвідношень:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \text{ або } \delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100\%$$

де  $x$  – результат вимірювання або дійсне значення вимірюваної фізичної величини;

$\Delta$  – абсолютна похибка.

Вираження похибок вимірювання в абсолютній або відносній формі обумовлено історичними традиціями, які склалися в певних галузях вимірювань. Ці традиції часто знаходять закріплення в нормативних документах.

**За джерелами виникнення** похибки вимірювання бувають **інструментальні**, **методичні** та **особисті** (похибки оператора). Дана класифікація зручна для ідентифікації компонентів повної похибки вимірювання з метою її оцінювання.

**Інструментальна похибка** – складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями засобу вимірювання. Ця похибка в свою чергу може містити кілька компонентів, зокрема, похибку засобу вимірювання та похибку, обумовлену взаємодією засобу вимірювання з об'єктом вимірювання.

**Методична похибка** – складова похибки вимірювання, обумовлена недосконалістю методу вимірювання або невідповідністю об'єкта вимірювання його моделі, прийнятій для вимірювання.

**Похибка оператора** – складова похибки вимірювання, обумовлена індивідуальними властивостями оператора.

За **закономірностями** виникнення та прояву розрізняють **систематичні** та **випадкові** похибки.

**Систематична похибка** – складова загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини.

**Випадкова похибка** – складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Таким чином, повна похибка вимірювання є сумою систематичної та випадкової похибок. Випадкові похибки можна виявити шляхом проведення повторних вимірювань, оскільки вони призводять до мінливості їх результатів. В цьому відношенні небезпечнішими є систематичні похибки, оскільки вони часто лишаються непоміченими. Якщо змінну систематичну похибку ще можна виявити за результатами повторних вимірювань методами дисперсійного аналізу або інженерними методами, то не існує математичних методів для виявлення постійних систематичних похибок. Постійні систематичні похибки можуть бути виявлені в результаті ретельного аналізу вимірювальної процедури (методики вимірювання) або експериментально в результаті спеціальних досліджень.

Класифікація похибок за закономірностями виникнення та прояву використовується:

1. Під час розрахунку характеристик похибки вимірювання. В залежності від того, до систематичних чи випадкових відносяться ті чи інші похибки, використовуються різні методи їх сумування.

2. Під час вибору способів зменшення повної похибки, якщо вона перевищує прийнятне значення. Способи усунення, врахування або зменшення похибки кінцевого результату вимірювання залежать також від того, до якої групи – систематичних чи випадкових похибок – відносяться ті чи інші компоненти повної похибки вимірювання.

В окрему групу слід виділити надмірні похибки. **Надмірна похибка** – похибка вимірювання, яка істотно перевищує очікувану за даних умов похибку. Результати, що містять надмірну похибку, називаються промахами. Такі результати необхідно виявляти та вилучати.

#### **Характеристики похибок вимірювання**

Використання оцінок похибок пов'язане з певними проблемами. По-перше, доволі часто в зв'язку з відсутністю еталонів, мір фізичних величин належної точності чи точніших методик прийнятне наближення до істинного значення (дійсне значення) є недоступним. По-друге, експериментальне оцінювання похибок може бути неприйнятним економічно через великі затрати на постановку відповідного експерименту. І, нарешті, якщо похибка має істотну випадкову складову, приписування оцінки похибки, одержаної під час пе-

вного вимірювання, результатам інших вимірювань є некоректним в силу того, що значення їх похибок можуть значно відрізнятись.

З урахуванням того, що похибка вимірювання має випадкову складову, тобто є випадковою величиною, найбільш повно охарактеризувати похибку вимірювання можна за допомогою її закону розподілу. Однак встановлення виду закону розподілу вимагає значних затрат ресурсів та часу. Тому на практиці для опису похибок найчастіше використовують певні характеристики, які можуть бути оцінені за менших затрат.

Характеристики похибок вимірювання поділяються на точкові та інтервальні.

Точковою характеристикою похибки є її середнє квадратичне (стандартне) відхилення. Стандартне відхилення виражається одним числом, якому на числовій осі відповідає точка. Тому цей параметр і отримав назву точкової характеристики.

Інтервальна характеристика задається у вигляді границь, в яких похибка знаходиться з певною ймовірністю  $P$ . Самі границі називають довірчими границями похибки, а вказану ймовірність – довірчою ймовірністю. Оскільки границі обмежують на числовій осі певний інтервал значень, який називають довірчим інтервалом, цю характеристику і називають інтервальною.

**Ширина довірчого інтервалу** залежить від значення довірчої ймовірності – при її зростанні ширина також зростає. Значення  $P$  повинно бути достатньо високим, оскільки це визначає довіру до результату, однак, в той же час, необхідно забезпечити, щоб довірчий інтервал був не занадто широким, оскільки тоді він буде непридатним для практичного використання. За умовчанням для технічних вимірювань приймається  $P=0,95$ . Для особливо відповідальних вимірювань, які мають важливе значення для життя чи здоров'я людей, довірна ймовірність може бути  $0,99$  і вище.

*Приклад.* Нехай при вимірюванні напруги одержали значення  $U=150\text{В}$  з похибкою  $\Delta=\pm 2\text{В}$  при  $P=0,95$ . Це означає, що істинне значення похибки вимірювання з ймовірністю  $0,95$  знаходиться в межах від  $-2$  до  $+2$  В і існує ймовірність  $1-0,95=0,05$  виходу похибки за вказані границі. Від довірчого інтервалу похибки, користуючись формулою  $x_{\text{іст}} = x - \Delta$ , досить просто перейти до довірчого інтервалу результату вимірювання. Права границя цього інтервалу -  $(150+2)\text{В}=152\text{В}$ , ліва границя -  $(150-2)\text{В}=148\text{В}$ . Таким чином, істинне значення напруги з ймовірністю  $0,95$  лежить в діапазоні від  $148$  до  $152\text{В}$ . В той же час існує ймовірність  $0,05$  знаходження істинного значення напруги за межами вказаного інтервалу.

Якщо результат вимірювання є кінцевим, придатним для вирішення конкретної технічної задачі і не буде використовуватися спільно з іншими результатами для розрахунку величин, функціонально з ним пов'язаних, користуються переважно інтервальними характеристиками похибки. У випадку, коли результат вимірювання буде використовуватися спільно з іншими резуль-

татами вимірювань для розрахунку величин, які з ними функціонально пов'язані, переважно використовують точкові характеристики.

Характеристики похибки можуть бути оцінені як статистичними, так і нестатистичними методами.

Причинами виникнення систематичних похибок є:

– відхилення параметрів реальних засобів вимірювань від розрахункових значень, передбачених схемою;

– невірноваженість деяких деталей засобів вимірювань відносно їх осі обертання;

– пружна деформація деталей засобів вимірювань, які мають малу жорсткість, що призводить до додаткових переміщень;

– похибки градування чи невеликий зсув шкали приладу;

– неточність мір фізичних величин;

– старіння матеріалів, із яких виготовлені засоби вимірювань;

– відхилення значень впливових величин (температури, вологості повітря, напруженості зовнішніх електричних та магнітних полів тощо) під час вимірювання від їх значень під час градування засобів вимірювання.

### **Класифікація систематичних похибок**

Залежно від обраної класифікаційної ознаки існують різні класифікації систематичних похибок, серед яких можна виділити найбільш поширені:

– за формою вираження;

– за джерелами виникнення;

– за характером зміни.

За формою вираження систематичні похибки поділяються на **абсолютні** та **відносні**.

**Абсолютна систематична похибка** – це систематична похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини.

**Відносна систематична похибка** – це систематична похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної систематичної похибки до дійсного чи виміряного значення.

Відносну систематичну похибку в долях вимірюваної величини або в процентах знаходять із співвідношень

$$\delta = \frac{\Delta_c}{x} \text{ або } \delta = \frac{\Delta_c}{x} \cdot 100\%$$

де  $x$  – результат вимірювання або дійсне значення вимірюваної фізичної величини;

$\Delta_c$  – абсолютна систематична похибка.

За характером зміни систематичні похибки поділяються на **постійні** та **змінні**. Змінні систематичні похибки, в свою чергу, поділяються на **періодичні** та **прогресивні**.

**Періодичною** називається похибка, яка змінюється за періодичним законом. Наприклад, періодичною є похибка, обумовлена зміною температури протягом доби.

**Прогресивними** називаються похибки, які змінюються монотонно (збільшуються або зменшуються) в загальному випадку за складним, найчастіше невідомим законом. До таких похибок, зокрема, належать похибки, обумовлені зміною властивостей елементів приладів, наприклад, внаслідок нагрівання електронних приладів в процесі експлуатації.

**Випадкова похибка** – складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини.

#### **Причини виникнення випадкових похибок**

Випадкові похибки обумовлені як випадковим характером прояву фізичних процесів у засобах вимірювання, так і випадковими змінами умов вимірювань, що практично неможливо врахувати. Серед основних причин виникнення випадкових похибок можна виділити:

- конструктивні та технологічні недосконалості вузлів та деталей приладів;
- випадкові коливання зовнішніх величин – температури, вологості повітря, атмосферного тиску, напруженості зовнішніх електричних та магнітних полів тощо;
- нестабільність живлення електронних приладів;
- суб'єктивні помилки оператора;
- вібрації;
- теплові шуми в електронних приладах;
- просторова (неоднорідність) та часова нестабільність об'єкта вимірювання.

#### **Основні властивості випадкових похибок**

1. Імовірність виникнення великих випадкових похибок менша за імовірність появи малих.
2. Імовірність появи однакових за модулем, але протилежних за знаком випадкових похибок однакова.

#### **Методи виявлення та зменшення випадкових похибок**

Оскільки випадкова похибка змінюється під час проведення повторних вимірювань навіть за однакових умов, то це призводить до мінливості результатів вимірювань. Таким чином, випадкова похибка може бути виявлена на основі аналізу результатів повторних вимірювань, проведених за умов збіжності (за одних і тих же умов).

Непрогнозований характер мінливості випадкових похибок призводить до практичної неможливості коригування результатів вимірювань, тобто до внесення поправок на величину випадкової похибки, оскільки для конкретного результату її значення лишається невідомим. Тим не менше, часто існує необхідність зменшити випадкову похибку результату вимірювання, наприклад,

якщо вона перевищує прийнятне значення. Для цього можуть бути використані такі методи:

1. Усунення причин виникнення випадкових похибок.

Наприклад, якщо відомо, що джерелом істотної випадкової похибки є випадкові коливання напруги в мережі живлення приладу, можна його живлення здійснювати через стабілізатор напруги. Зрозуміло, що усунення всіх ефектів, які призводять до появи випадкової похибки, неможливе або через фізичні причини, або через економічні причини.

2. Математична обробка результатів повторних вимірювань, спрямована на зменшення випадкової похибки.

Усереднення результатів повторних вимірювань завдяки другій властивості випадкових похибок дозволяє зменшити випадкову похибку кінцевого результату вимірювання. В ідеалі, за нескінченно великої кількості вимірювань, усереднення дозволило б звести випадкову похибку до нуля, оскільки однакові за модулем, але протилежні за знаком випадкові похибки, які за другою властивістю зустрічаються однаково часто, при усередненні себе повністю б компенсували. На практиці, звичайно, через обмежену кількість результатів вимірювань повної компенсації добитися не вдається (слід зазначити, що і практичної потреби в цьому немає), однак все ж випадкова похибка середнього значення зменшується зі зростанням кількості результатів повторних спостережень.

Вибір методу зменшення випадкової похибки результату вимірювання залежить як від можливості впливу на ті чи інші джерела виникнення випадкових похибок, так і від економічних чинників, оскільки і заходи з усунення причин, і проведення повторних вимірювань вимагають додаткових затрат часу та ресурсів.

**Математичний опис та оцінювання випадкових похибок**

Найповніше випадкова похибка як випадкова величина може бути описана з допомогою закону розподілу. В термінах теорії ймовірності випадкова похибка – це відхилення похибки вимірювання від її математичного очікування:

$$e = \Delta - M(\Delta),$$

де  $e$  – випадкова похибка вимірювання;

$\Delta$  – похибка вимірювання;

$M(\Delta)$  – математичне очікування похибки.

Таким чином, випадкова похибка є центрованою випадковою величиною – її математичне очікування рівне нулю.

Встановлення закону розподілу випадкової похибки вимагає значних затрат часу та ресурсів, тому на практиці часто замість встановлення закону розподілу оцінюють певні її характеристики – середнє квадратичне відхилення (точкова характеристика) або довірчі границі (інтервальна характеристика).



Вказані характеристики можуть бути оцінені за менших затрат в порівнянні із затратами на встановлення закону розподілу.

Статистично середнє квадратичне відхилення випадкової похибки  $\sigma(x)$  результату вимірювання  $x$  може бути наближено оцінено за результатами повторних вимірювань  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , одержаними в умовах збіжності, як:

$$\sigma(x) \approx S(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

де  $\bar{x}$  – середнє значення результатів повторних вимірювань.

В формулі величина  $x_i - \bar{x}$  є оцінкою випадкової похибки  $e_i$  результату  $i$ -го вимірювання.

Середнє квадратичне відхилення використовується не лише як характеристика похибки, але і як проміжний параметр під час розрахунку довірчих границь випадкової похибки. Якщо випадкова похибка розподілена за нормальним законом розподілу, то довірчі границі похибки  $e(P)$  для довірчої ймовірності  $P$  можуть бути оцінені за формулою:

$$e(P) = \pm t(P) \cdot \sigma(x)$$

де  $t(P)$  – відповідний квантіль нормального розподілу,

$\sigma(x)$  – надійна нестатистична оцінка середнього квадратичного відхилення випадкової похибки.

Квантіль нормального розподілу рівний 1,96 для  $P=0,95$  та 2,57 для  $P=0,99$ .

Якщо замість середнього квадратичного відхилення випадкової похибки використовується його статистична оцінка  $S(x)$ , розрахована за числом результатів повторних вимірювань менше 30, то за нормального розподілу довірчі границі випадкової похибки оцінюють за формулою

$$e(P) = \pm t(P, n-1) \cdot S(x),$$

де  $t(P, n-1)$  – значення коефіцієнту Стьюдента для довірчої ймовірності  $P$  та числа ступенів свободи  $n-1$ .

### **Практична обробка результатів досліджень.**

На першому етапі на новому аркуші MS EXCEL слід створити таблицю з експериментальними даними у вигляді, представленому на рис.1. Для наочності вхідний фактор (кількість модифікатора) позначимо  $X$ , а вихідний фактор (тимчасовий опір розриванню) позначимо  $Y_1, Y_2, Y_3$  (по кількості паралельних досліджень). Середнє арифметичне (математичне очікування) позначимо  $Y$ . Ще два стовпчика додамо для розрахунку стандартного відхилення та довірчого інтервалу.

Для розрахунку середнього арифметичного, стандартного відхилення та довірчого інтервалу у відповідні комірки введемо формули і скопіюємо їх для усіх восьми точок як на рис. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	№	X	Y1	Y2	Y3	Y	Стандартне відхилення	Довірчий інтервал	
2	1	0	153	162	156	157	4,582575695	4,35187324	
3	2	0,2	163	164	174	167	6,08276253	5,776535565	
4	3	0,4	185	177	181	181	4	3,798626388	
5	4	0,6	183	180	186	183	3	2,848969791	
6	5	0,8	175	176	180	177	2,645751311	2,512555186	
7	6	1	168	164	160	164	4	3,798626388	
8	7	1,2	156	163	158	159	3,605551275	3,424035554	
9	8	1,4	159	157	155	157	2	1,899313194	
10									
11			=СРЗНАЧ(С9:Е9)				=ДОВЕРИТ(0,1;G9;3)		
12			=СТАНДОТКЛОН(С9:Е9)						

Рисунок 2 – Введення експериментальних даних в таблицю MS EXCEL

По отриманим даним побудуємо графік залежності середніх значень тимчасового опору розриванню від кількості модифікатора і позначимо на ньому довірчі інтервали.

Для побудови графіка необхідно вибрати команду меню „Вставка-діаграма-графік”. Потім необхідно натиснути кнопку „Далі” і перейти на ярлик „Ряд”. На ярлику „Ряд” необхідно натиснути кнопку „Додати” і ввести в графу „Значення” діапазон комірок F2:F9 а в графу „Підписи під X” – діапазон B2:B9. Після цього необхідно натиснути на кнопку „Готово”.

Отриманий графік необхідно відформатувати. Для форматування необхідно двічі клацнути по одній із точок. В меню що відкриється необхідно прибрати лінію і залишити тільки маркери, поміняти колір фону, додати вертикальну сітку. Перейшовши на ярлик „Y-погрішності” встановити планки погрішностей – обидві, величину погрішності – користувача. В додатні і від’ємні погрішності ввести діапазон комірок H2:H9.

В результаті повинен з’явитися графік, представлений на рис. 2.

### Приклад № 2 оброблення експериментальних даних у MS EXCEL.

Передбачається наприклад, що ми провели серію з 10 дослідів, вимірюючи деяку величину X. Номери дослідів від 1 до 10 легко ввести простяганням, а ось чисельні значення X треба послідовно ввести (табл. 1). Записи в колонках D і E – це підказки, які допоможуть розібратися з тим, які характеристики ми будемо розраховувати. Колонка F у Вас повинна бути поки порожньою, в неї будемо розміщувати наші формули.

Оброблення результатів почнемо з розраховування числа дослідів n. Здавалося б, це очевидне число, але в ході роботи, якийсь результат ми може-

мо відкинути, або провести ще пару дослідів. Бажано, щоб нам не довелося при цьому переробляти всі формули.

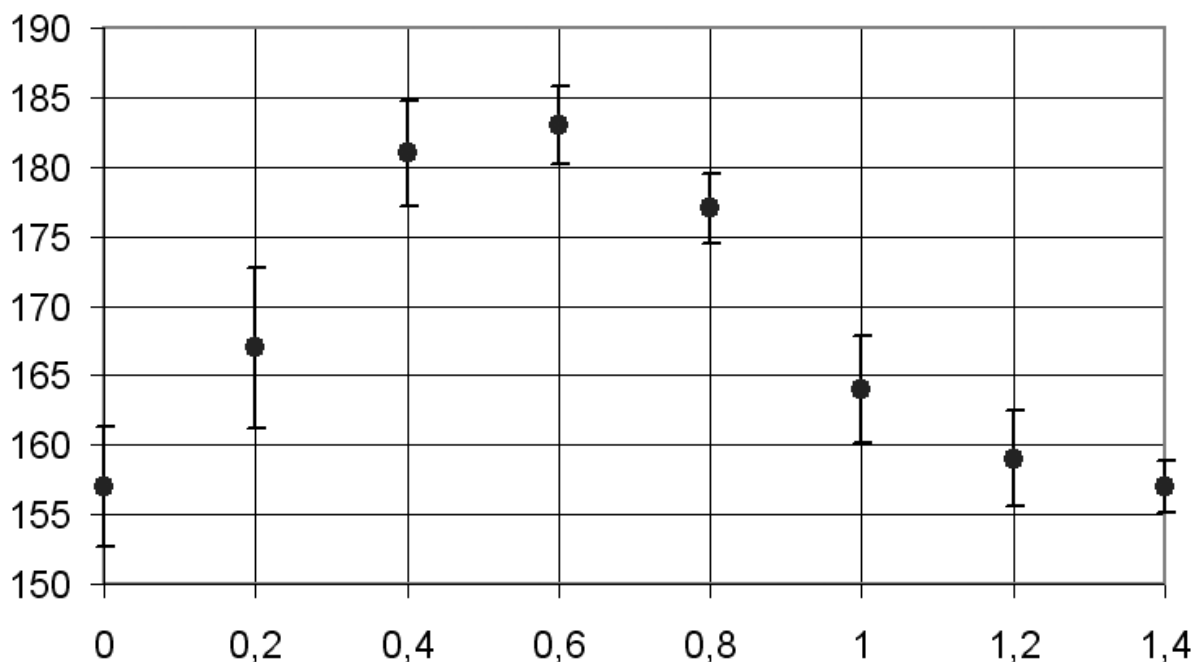


Рисунок 3 – Графік середніх значень дослідів з довірчими інтервалами

Для визначення числа значень використовується спеціальна функція, яка називається РАХУНОК. Для введення формули з функціями використовується Майстер функцій, який запускається командою «Вставка функції» через меню «Вставка» - «Функція» або кнопкою на панелі інструментів з позначенням fx. Натиснути мишкою по комірці F6, де повинен знаходитися результат і запустимо «Майстер функцій».

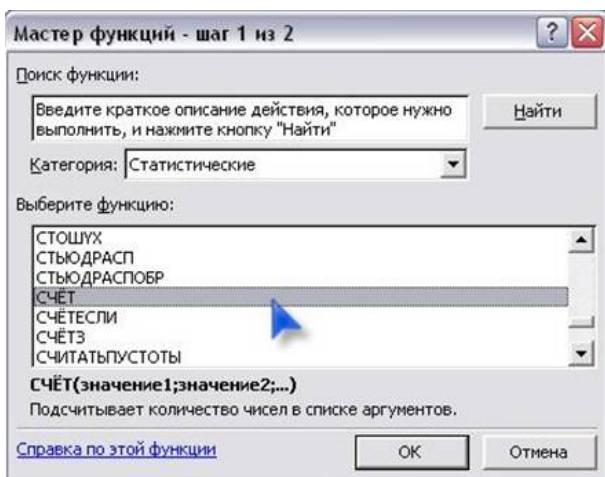
Перший крок роботи (рис. 4) служить для вибору потрібної функції. Всі функції розділені, в залежності від свого призначення на кілька категорій (математичні, логічні та ін.) Для обробки даних експерименту використовуються в основному статистичні функції. Тому, перш за все в списку категорій вибираємо категорію «Статистичні». У другому вікні з'являється список статистичних функцій. Якщо клацнути по будь-якій з них, внизу з'являється короткий опис функції. Спеціальним посиланням можна викликати систему допомоги Excel, в якій функція буде розібрана детально, з прикладами. Список функцій впорядкований за алфавітом, що дозволяє знайти без труднощів потрібну нам функцію РАХУНОК («Підраховує кількість чисел у списку аргументів»). Виділивши клацанням цю функцію, натискаємо кнопку ОК і переходимо до кроку 2.

Другий крок (рис. 5) служить для завдання аргументів функції. Функції РАХУНОК треба вказати, які числа їй треба перераховувати, або в яких осередках знаходяться ці числа.

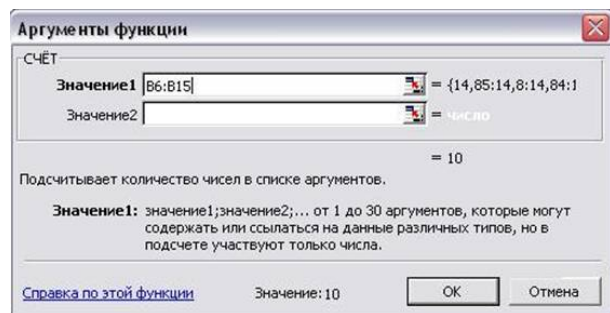
**Таблиця 1. – Зразковий вид аркуша «Помилки»**

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	Данные эксперимента			Обработка		
4						
5	№	X				
6	1	14,85	Число значений $n$	СЧЕТ		10
7	2	14,80	Среднее значение $\bar{X}_{ср}$	СРЗНАЧ		14,803
8	3	14,84	Станд. отклонение $S$	СТАНДОТКЛОН		0,0643
9	4	14,81	Ст. откл. среднего $S_{ср}$	= $S / \text{КОРЕНЬ}(n)$		0,0203
10	5	14,63	К Стюд (5%, n-1) $t$	СТЮДРАСПОБР		2,2622
11	6	14,81	Доверит. интервал ДИ	= $t * S_{ср}$		0,046
12	7	14,80	Относит ошибка $\delta$	= $ДИ / \bar{X}_{ср}$		0,0031
13	8	14,85				
14	9	14,84				
15	10	14,80				

Діапазон клітинок вказується адресами першої та останньої комірки, записаними через двокрапку, в нашому випадку дані знаходяться в комірках B6: B15. Як і в інших випадках ці адреси краще не вводити, а показати мишкою. Для цього встановлюємо покажчик мишки на перший осередок, натискаємо ліву кнопку і ведемо до останньої. Зверніть увагу, що вікно аргументів можна переміщати, якщо воно затуляє потрібну частину екрана.



*Рисунок 4 – Майстер функцій fx*



*Рисунок 5 – Аргументи функції "РАХУНОК"*

Крім того, поряд з полем для введення є маленька кнопка з червоною стрілочкою. При клацанні по ній вікно аргументів згортається до вузької смужки. Коли ми показуємо в основному вікні діапазон комірок, у вікні аргументів з'являється запис діапазону адрес, а поруч з ним - значення чисел з перших

осередків. Попереднє значення функції теж показується після введення її аргументів. Це допомагає уникати помилок. Допомагає роботі з майстром функцій і підказка під полем для введення аргументів, в якій роз'яснюється їх зміст і можливі значення. Закінчується робота з майстром функцій натисненням кнопки "ОК" або клавіші "Enter". Якщо все зроблено правильно, в комірці F6 з'явиться потрібне значення "10".

Наступні два етапи обробки серії дослідів проводяться аналогічно. В комірці F7 за допомогою функції СРЗНАЧ розраховується середнє значення вибірки, в комірці F8 – стандартне відхилення вибірки, за допомогою функції СТАНДОТКЛОН. . Будьте акуратні при виборі функцій – серед них є дуже схожі за назвою. Аргументами цих функцій служить все той же діапазон комірок.

Наступна формула складна, частково вона набирається як звичайна формула, починаючи з символу "=". Вказавши, де знаходиться подільне S і набравши знак операції (= F8 /), викликаємо майстер функцій. Функція КОРИНЬ – математична, тому на першому кроці вибираємо категорію математичних функцій. Аргументом цієї функції служить число дослідів, яке ми розраховували в комірці F6. Остаточний вигляд формули "= F8 / КОРИНЬ (F6)".

Для розрахунку довірчого інтервалу необхідно визначити коефіцієнт Стьюдента. Він залежить від імовірності помилки (зазвичай задається надійності 95% вірогідність помилки складає 5%), і від числа ступенів свободи n-1). Для знаходження коефіцієнта Стьюдента використовується статистична функція Excel СТЬЮДРАСПОБР ("Стьюдента розподіл зворотне"). Особливістю цієї функції є те, що перший аргумент, число 5% (або 0,05) вводиться у відповідне вікно з клавіатури. Для другого вказуємо адресу комірки, де знаходиться значення n, потім дописуємо у вікні "-1". Отримуємо запис "F6-1".

Для знаходження довірчого інтервалу використовується звичайна формула множення. Звичайно, замість букв там повинні стояти адреси комірок, де знаходяться коефіцієнт Стьюдента і стандартне відхилення середнього. Як правило, значення довірчого інтервалу округлюється до однієї значущої цифри, такий же порядок округлення має бути і у середнього. Тому остаточний результат можна записати так: з 95%-ної надійністю  $X = 14,80 \pm 0,05$ . На закінчення порахуємо відносну помилку визначення X:  $\delta = \text{ДІ} / X_{\text{ср}}$  (формула: "= F11/F7"). Значення відносної помилки зазвичай виражають у відсотках, у нас 0,3%.

## ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

### **Під час знаходження в лабораторії необхідно:**

1. Приступати до експериментів тільки після отримання офіційного допуску від викладача.
2. На робоче місце брати з собою тільки протоколи лабораторних робіт, ручки та олівці, калькулятор (з цією метою може бути використаний мобільний телефон).
3. Перебуваючи на робочому місці, уважно стежити за станом обладнання.
4. Виконувати дослідження бригадами мінімум по дві особи. В разі особистого виконання роботи студентом його дії контролює викладач.
6. У разі несправності або неповноцінного функціонування обладнання звернутись до викладача.
6. Після закінчення роботи прибрати робоче місце.

### **Під час знаходження в лабораторії заборонено:**

1. Знаходитися на робочому місці іншої бригади.
2. Знаходитися у верхньому одязі на робочих місцях.
3. Брати на робочі місця із собою сумки, портфелі, рюкзаки, елементи одягу та інші сторонні предмети, не передбачені протоколом роботи.
4. Вмикати або вимикати обладнання без дозволу викладачів.
5. Вмикати або вимикати установки, які не відносяться до виконання даної лабораторної роботи.
6. Намагатися полагодити або налаштувати обладнання або інструмент без дозволу викладачів.
7. Під час робочого циклу не перешкоджати роботі обладнання, інструменту своїм втручанням, не доторкатися до частин, які рухаються або мають високу температуру.
8. Використовувати мобільні телефони, фото-, відео-, Інтернет-техніку та інше побутове приладдя, яке створює шум, радіоперешкоди та заважає роботі лабораторного устаткування.
9. Заносити в лабораторію напої, їжу, пакувальні матеріали.
10. Самовільно покидати лабораторію або заходити до неї.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология литейного производства: Специальные виды литья: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Э.Ч.Гини, А.М.Зарубин, В.А.Рыбкин; под ред. В.А.Рыбкина. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 352 с.
2. Соколов Н.А. Литье в оболочковые формы. – М.: Машиностроение, 1978. – 461 с.
3. Специальные способы литья /В.А.Ефимов, Г.А.Анисович, В.Н.Бабич и др.; под ред. В.А.Ефимова. – М.:Машиностроение, 1991. – 736 с.
4. Литье в кокиль. (Под ред. А.И.Вейника. – М.:Машиностроение, 1978. – 415 с.
5. Кечин В.А., Селихов Г.Ф., Афонин А.Н. Проектирование и производство литых заготовок: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2002. – 228 с.
6. Цветное литье: справочник / Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф. – М.: Машиностроение, 1989. – 519 с.
7. МакКрайт, Тим. Практическое литье. Руководство для мастерской.: Пер. с англ. -перераб. изд. – Омск: Издательство Наследие. Диалог-Сибирь, 2002. – 164 с: ил.
8. ДСТУ 2541-94 Ливарне виробництво. Терміни та визначення.
9. ГОСТ 16234-70 - ГОСТ 16262-70. Формы металлические (кокиля).
10. Юдин С.Б., Розенфельд С.Е., Левин Н.М. Центробежное литье. – М.: Машиностроение, 1972. – 279 с.