МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою
програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Укладачі: О. А. Сливінський, В. М. Коперсак

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент *Позняков В. Д.*, д-р техн. наук, член-кореспондент НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

Відповідальний редактор *Квасницький В. В.*, д-р техн. наук, проф.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол № 3 від 01.12.2022 р.)
За поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
(Протокол № 10/22 від 28.11.2022 р.)

Навчальний посібник містить інструктивно-методичні рекомендації з підготовки та проведення лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теорія процесів зварювання». Наведено основні теоретичні відомості, порядок і рекомендації щодо виконання експериментальної частини та обробки результатів лабораторних робіт, присвячених дослідженню фізичних процесів в зварювальній дузі та фізико-хімічним особливостям нагрівання та плавлення металу при зварюванні.

Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» спеціальності 131 Прикладна механіка очної та заочної форми навчання.

Реєстр. № НП 22/23-283. Обсяг 2,2 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua/
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

Вступ 3
Організація проведення лабораторних робіт та заходи безпеки 4
Лабораторні роботи:
1. Властивості зварювальної дуги 6
2. Іонізуюча дія компонентів електродного покриття 12
3. Дослідження зварювальної дуги змінного струму 20
4. Нагрівання та плавлення штучних електродів 25
5. Перенесення електродного металу у зварювальній дузі 35
6. Пори в зварних швах 41
Список рекомендованої літератури 47
Перелік посилань..... 48
Додатки 49
Додаток А. Зразок оформлення титульного аркушу звіту з лабораторних робіт 49
Додаток Б. Бланки протоколів лабораторних робіт 50

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Теорія процесів зварювання» є нормативною в циклі професійної підготовки бакалаврів за освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій». В дисципліні вивчаються фундаментальні положення фізичних, фізико-хімічних, металургійних процесів при зварюванні та споріднених процесах і технологіях, що розвиваються в наступних освітніх компонентах з підготовки сучасних, високоерудованих фахівців зі зварювального виробництва та споріднених процесів і технологій.

Лабораторні роботи передбачені робочою програмою дисципліни та грають важливу роль при вивченні курсу. Лабораторні роботи проводяться для поглибленого закріплення теоретичного матеріалу і ілюструють основні положення, що викладаються в рамках освітнього компоненту. Разом із цим, для студентів кожна лабораторна робота являє собою своєрідний невеликий науковий дослід, що служить для експериментального доказу певного теоретичного положення. Їх підготовка та проведення, одержання й обробка результатів, формулювання висновків – типовий приклад учбової дослідницької роботи студентів.

Головна мета лабораторних робот з «Теорії процесів зварювання» – засвоєння студентами методів експериментального і розрахункового рішення практичних завдань в області зварювання та споріднених процесів і технологій (термічного різання, наплавлення, нанесення покриттів), наочна демонстрація доказів окремих теоретичних положень в областях фізики електродугового розряду постійного та змінного струму, нагрівання та плавлення електроду, перенесення електродного металу, механізмів пороутворення під час кристалізації металу рідкої ванни тощо.

Організація проведення лабораторних робіт та заходи безпеки

Лабораторні роботи проводяться, як правило, після засвоєння студентами відповідного теоретичного матеріалу в лекційному курсі. На одній лабораторній установці працює бригада з 3-6 осіб. Студенти з'являються на заняття із заготовленими протоколами для лабораторних робіт, заздалегідь вивчивши теоретичні положення по відповідним розділам дисципліни та ознайомившись з інструктивно-методичними рекомендаціями даного навчального посібника.

Викладач розпочинає заняття з короткої доповіді змісту лабораторної роботи, акцентує увагу на особливо важливих питаннях теоретичного та прикладного характеру. Після чого проводиться опитування студентів. При цьому, перевіряються знання основних теоретичних положень, що передбачені матеріалом даної лабораторної роботи, порядку виконання роботи, у тому числі послідовність виконання дослідів, з'єднання електричних схем, принципу дії відповідного устаткування та обладнання. Студенти повинні вміти визначати точність та встановлювати ціну ділення вимірювальних пристроїв.

На першому занятті вивчається техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт. Викладач доводить до відома студентів перелік шкідливих та небезпечних факторів зварювального процесу, скеред яких наявність викидів шкідливих речовин у повітря, оптичне випромінювання електричної дуги, небезпека ураження електричним струмом, а також іскри, бризки та можливі викиди розплавленого металу; проводить інструктаж із заходів безпеки при проведенні лабораторних робіт, що реєструється особистими підписами студентів в «Журналі техніки безпеки».

Перед початком проведення кожної роботи викладач перевіряє знання студентами правил техніки безпеки. До виконання роботи допускаються тільки студенти, що пройшли інструктаж з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт і розписалися в журналі. Самостійна робота студентів з обладнанням дозволяється тільки після перевірки викладачем або навчаль-

ним майстром (лаборантом) їхнього вміння правильної експлуатації обладнання та знання вимог електробезпеки зварювальних робіт.

Для захисту від випромінювання зварювальної дуги і бризок розплавленого металу необхідно застосовувати щитки (зварювальні маски) з захисними склофільтрами і спецодяг.

Робота на стаціонарних зварювальних постах проводиться з ввімкненими пристроями місцевої витяжної вентиляції.

Результати вимірів та інших досліджень, одержані студентами в ході роботи, занесені у відповідні таблиці, пред'являються викладачу наприкінці лабораторного заняття. Після чого викладач доводить студентам вимоги стосовно оформлення протоколів, акцентує увагу на особливостях розрахунків, що передбачені при виконанні даної лабораторної роботи і висновках.

Належним чином оформлені протоколи здаються студентами для перевірки на початку наступного заняття.

Остаточно оформлені звіти по проведеним лабораторним роботам здаються студентами на останньому за розкладом занятті по лабораторному курсу. Викладачем оцінюється якість оформлення звітів та знання студентами теоретичної частини робот та в межах контрольних питань. Звіти зберігаються на кафедрі протягом одного року.

Лабораторна робота № 1
ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

МЕТА РОБОТИ

Встановити зв’язок між електричними і геометричними параметрами зварювальної дуги та виявити особливості існування дугового розряду при застосуванні катодів різних типів.

ЗАДАЧІ

1. Ознайомитись з візуальним зображенням проекції зварювальної дуги та особливостями світлового випромінювання характерних її областей.
2. Встановити вплив полярності на форму зварювальної дуги.
3. Встановити вплив типу катодів на процес та особливості існування дугового розряду.
4. Встановити залежність падіння напруги на зварювальній дузі від її довжини та полярності.
5. За експериментальними даними розрахувати значення коефіцієнтів Айртон, порівняти з існуючими і у разі розбіжностей пояснити причини їх виникнення.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Візуальне спостереження дугового розряду, збільшеного в розмірах.
2. Заміри падіння напруги та електричного струму в дузі.
3. Розрахунки за рівнянням Айртон.

ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- Джерело живлення зварювальної дуги – випрямляч ВС-300Б.
- Баластний реостат РБ-300.
- Штатив для закріплення і переміщення електрода в вертикальному напрямку.
- Оптична система, змонтована на підставці.

- Графітові електроди, діаметром 4 мм.
- Графітова пластина та пластина з низьковуглецевої сталі, розмірами 100×100×10 мм.
- Шаблон для встановлення довжини дуги.
- Вольтметр.
- Мілівольтметр з відповідним шунтом.
- Екран.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В зварювальній дузі можуть бути виділені наступні характерні області: катодна, анодна, та стовп зварювальної дуги. Відповідно довжина зварювальної дуги ($L_д$) складається із арифметичної суми довжини всіх трьох її характерних областей:

$$L_д = L_к + L_а + L_{ст}.$$

На відміну від довжини стовпа зварювальної дуги ($L_{ст}$), що в значній мірі залежить від загальної довжини дуги, протяжності катодної ($L_к$) і анодної ($L_а$) областей практично не залежать від $L_д$ і приблизно дорівнюють довжині вільного пробігу електрона.

Форма зварювальної дуги залежить від діаметрів катодної і анодної плям та розподілу електромагнітного поля в стовпі зварювальної дуги.

Падіння напруги у зварювальній дузі ($U_д$) дорівнює сумі падінь напруги в катодній ($U_к$), анодній області ($U_а$) та стовпі зварювальної дуги ($U_{ст}$):

$$U_Д = U_к + U_а + U_{ст}.$$

Значення падіння напруги у зварювальній дузі може бути розраховано за рівнянням Айртон [1]:

$$U_Д = a + bL_Д + \frac{c + dL_Д}{I_{зв}},$$

де a; b; c; d – коефіцієнти рівняння Айртон; $L_д$ – довжина зварювальної дуги, мм; $I_{зв}$ – сила зварювального струму, А.

Значення коефіцієнтів рівняння Айртон наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. **Значення коефіцієнтів в рівнянні Айртон [2]**

Матеріал катода	Матеріал анода	*a*, В	*b*, В/мм	*c*, Вт	*d*, Вт/мм
Графіт	Графіт	30…38	2,0	11…12	10,5
Графіт	Сталь	13,2…13,5	2,1…2,3	11…12	10,5
Сталь	Графіт	18,0…18,6	2,3…2,5	9…10	15,0

При достатньо великих значеннях сили зварювального струму, останній додаток рівняння Айртон можна не враховувати. Тоді спрощено рівняння може бути представлене у вигляді:

$$U_д = a + bL_д .$$

Коефіцієнти рівняння мають фізичний зміст: a – сумарне падіння напруги у катодній та анодній областях [В], b – градієнт падіння напруги в стовпі зварювальної дуги [В/мм]. Значення коефіцієнта a залежить від матеріалу катода і анода, а коефіцієнта b – від складу суміші плазмоутворюючих газів в стовпі зварювальної дуги.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ[1]

1. Дослідження дуги, що горить між двома графітовими електродами.
   1.1. Зібрати експериментальну установку за схемою на рис. 1, підключивши до електричного кола дуги графітові електроди.
   1.2. Встановити пряму полярність.
   1.3. За допомогою шаблона встановити довжину зварювальної дуги 2 мм.
   1.4. Запалити дугу між графітовими електродами. Знайти на збільшеному оберненому зображенні зварювальної дуги (на екрані) її характерні

[1] Через значний обсяг та трудомісткість експериментальних дослідів на виконання даної лабораторної роботи відводиться 4 аудиторні години. Протягом 1-ї пари здійснюється інструктаж з техніки безпеки, проводиться опитування студентів та виконується прибл. 40% експериментальних дослідів. На 2-й парі експериментальні досліди завершуються.

області. В протоколі зобразити форму зварювальної дуги на прямій полярності.

1.5. Експериментально визначити падіння напруги в дузі та зварювальний струм, зафіксувавши отримані данні в табл. 1.2.

1.6. Повторити експерименти згідно з пп. 1.4 – 1.5, встановивши довжину зварювальної дуги 4 мм і 6 мм.

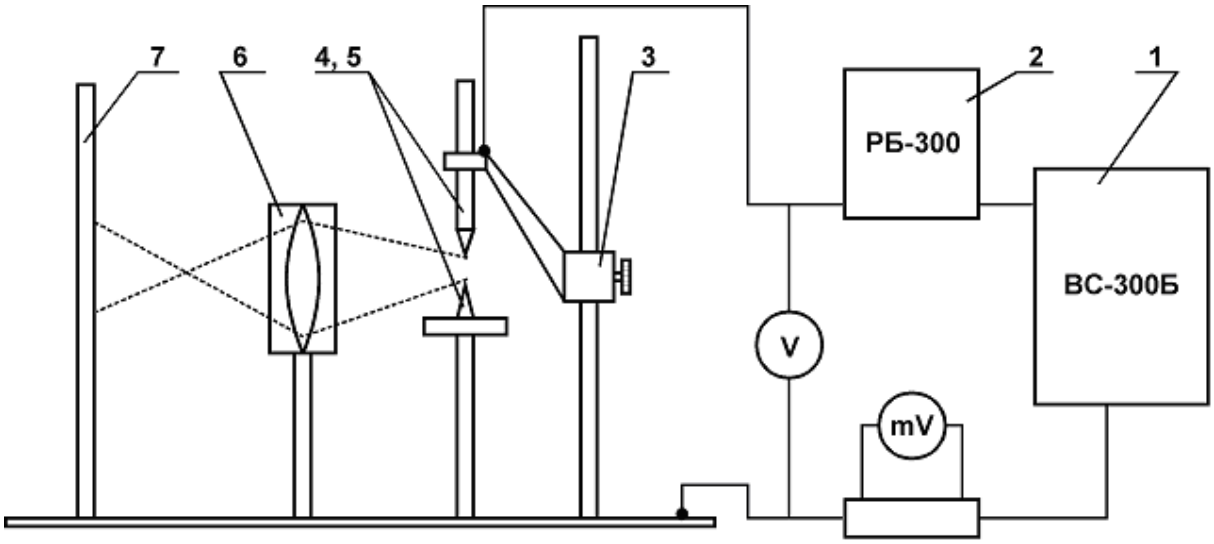


Рис. 1. Схема експериментальної установки [2]: 1 – джерело живлення; 2 – баластний реостат; 3 – штатив; 4, 5 – електроди; 6 – оптична система; 7 – екран

1.7. Встановити зворотну полярність і провести експерименти згідно з пп. 1.3 – 1.6. Звернути увагу на особливості руйнування електродів на прямій та зворотній полярності.

2. Дослідження дуги, що горить між графітовим електродом і графітовою пластиною.

2.1. По аналогічній методиці провести експерименти на прямій та зворотній полярності, послідовно встановлюючи довжину дуги 2, 4 і 6 мм (див. пп. 1.2 – 1.7).

3. Дослідження дуги, що горить між графітовим електродом і сталевою пластиною.

3.1. Провести експерименти на прямій та зворотній полярності, послідовно встановлюючи довжину дуги 2, 4 і 6 мм (див. пп. 1.2 – 1.7).

Таблиця 1.2. **Експериментальні дані енергетичних параметрів дуги**

1) графітовий електрод / графітовий електрод				
$L_д$, мм	пряма полярність		зворотна полярність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В
2				
4				
6				
2) графітовий електрод / графітова пластина				
$L_д$, мм	пряма полярність		зворотна полярність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В
2				
4				
6				
3) графітовий електрод / сталева пластина				
$L_д$, мм	пряма полярність		зворотна полярність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В
2				
4				
6				

4. За результатами експериментів для різних пар електродів побудувати графіки функцій: $U_д = f(L_д)$, $I_{зв} = f(L_д)$ та $U_д = f(I_{зв})$.
5. Знайти значення коефіцієнтів рівняння Айртон графічним і аналітичним методами і порівняти їх з наведеними в табл. 1.1.
6. Зробити висновки по виконаній роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чим дуговий розряд відрізняється від інших електричних розрядів у газах?
2. Дайте характеристику фізичних процесів, які мають місце в різних областях зварювальної дуги.

3. Яким чином полярність, геометрія та матеріал електродів можуть впливати на форму зварювальної дуги ?
4. Як падіння напруги розподіляється по довжині дуги ?
5. Що таке вольт-амперна характеристика (ВАХ) дуги, при виконанні якої умови вона є статичною ?
6. Назвіть експериментальні та розрахункові методи отримання ВАХ дуги.
7. Дайте характеристику вільної та стисненої дуги.
8. Як падіння напруги залежить від струму на різних ділянках ВАХ дуги ?

Лабораторна робота № 2
ІОНІЗУЮЧА ДІЯ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОДНОГО ПОКРИТТЯ

МЕТА РОБОТИ

Встановити вплив типу електродного покриття та його окремих компонентів на сталість горіння зварювальної дуги.

ЗАДАЧІ

1. Ознайомитися з методикою оцінки сталості горіння зварювальної дуги по її розривній довжині.
2. Оцінити вплив типу електродного покриття на розривну довжину зварювальної дуги.
3. Вивчити вплив окремих компонентів, що зустрічаються у складі електродного покриття на сталість горіння зварювальної дуги за експериментальною та розрахунковою методиками.
4. Визначити зв’язок між іонізуючою властивістю окремих компонентів та стабільністю існування дугового розряду.
5. Оцінити вплив полярності на сталість горіння зварювальної дуги.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Експериментальна методика визначення розривної довжини зварювальної дуги.
2. Спільне розв’язання рівняння Саха, рівняння Фролова, рівняння Хрєнова.

ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- Джерело живлення зварювальної дуги – випрямляч ВС-300Б.
- Баластний реостат РБ-300.
- Пристрій для визначення розривної довжини дуги – штатив із регульованим в вертикальному напрямку електродним затискачем і пружиною.
- Вольтметр.

- Мілівольтметр з відповідним шунтом.
- Штангенциркуль.
- Штучні покриті електроди УОНІ-13/55, АНО-21 та голий сталевий дріт діаметрами 3 мм.
- Порошки окремих компонентів електродного покриття: флюориту CaF_2, мармуру $CaCO_3$, кварцового піску SiO_2 та рутилу TiO_2.
- Пластина з низьковуглецевої сталі, розмірами 100×100×10 мм.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Широкого застосування набула методика оцінки сталості горіння зварювальної дуги за її розривною довжиною запропонована академіком Костянтином Хрєновим. Розповсюдженість цієї методики пояснюється її надзвичайною простотою та наочністю.

Розривною довжиною зварювальної дуги називають її довжину у момент природного обриву. Більшій сталості горіння зварювальної дуги відповідає її більша розривна довжина. Таким чином, знаходячи розривну довжину зварювальної дуги, ми посередньо оцінюємо сталість її горіння.

Для встановлення впливу типу електродного покриття на сталість горіння зварювальної дуги, знайдемо розривну довжину дуги для електродів основного типу (УОНІ-13/55), рутилового типу (АНО-21) та голого сталевого дроту без покриття.

Для встановлення впливу окремих компонентів електродного покриття на сталість горіння зварювальної дуги, знайдемо розривну довжину дуги, що послідовно збуджується між голим дротом без покриття та сталевою пластиною, на яку насипано шар порошку, що складається відповідно з чистого флюориту CaF_2, кварцового піску SiO_2, мармуру $CaCO_3$ та рутилу TiO_2.

Необхідною умовою сталого горіння зварювальної дуги являється достатня кількість вільних електронів у її стовпі. Вільні електрони утворюються внаслідок іонізації газової атмосфери дугового проміжку, в ході прямого протікання реакції іонізації нейтральних атомів:

$$A^0 \rightarrow A^+ + e_0,$$

де A^0 – нейтральний атом; A^+ – позитивний іон; e_0 – електрон.

Більшій сталості горіння зварювальної дуги відповідає більша кількість вільних електронів та більший ступінь термічної іонізації плазмоутворювального газу у стовпі зварювальної дуги. Для обчислення ступеня термічної іонізації газів користуються рівнянням Саха, яке для зовнішнього нормального атмосферного тиску в системі одиниць СІ має вигляд:

$$\frac{x^2}{1-x^2} = 3,29 \cdot 10^{-7} a^2 T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{11604 U_{\text{i}}}{T}\right), \qquad (2.1)$$

де x – ступінь термічної іонізації газу; a^2 – квантовий коефіцієнт (див. табл. 2.1); T – середня температура плазми зварювальної дуги, К; $\exp(x) = e^x$ – число Непера (основа натурального логарифма) e ≈ 2,718282...; U_{i} – потенціал іонізації плазмоутворювального газу в стовпі дуги, В.

Таблиця 2.1. **Значення потенціалів іонізації U_{i} та квантових коефіцієнтів a^2 атомів деяких хімічних елементів [1]**

Елемент	U_{i}, В	a^2	Елемент	U_{i}, В	a^2
Ca	6,03	4	O	13,56	8/3
F	18,60	3	Ti	6,81	4/3
Si	7,94	4/3			

В реальних умовах зварювання газова атмосфера стовпа дуги завжди складається із суміші кількох газів і парів металів. Суміш двох, або кількох газів іонізується інакше, ніж кожна з цих речовин окремо, тому що вільні електрони в цьому випадку будуть спільними для всіх складових газової суміші.

Для спрощених розрахунків ступеня іонізації суміші газів стовпа дуги можна скористатись рівнянням (2.1), але в ньому замість значення потенціалу іонізації плазмоутворювального газу U_{i} необхідно підставити значення ефективного потенціалу іонізації цієї суміші. Для його обчислення користуються наступною залежністю, відомою нині як рівняння Фролова:

$$U_{еф} = -\frac{T}{5800}\ln\sum_{i=1}^{n}\left[p_i^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{5800U_i}{T} \right) \right], \qquad (2.2)$$

де $U_{\text{еф}}$ – ефективний потенціал іонізації суміші плазмоутворювальних газів, В; p_i – парціальний тиск і-того компоненту суміші, атм.; $U_{\text{і}}$ – потенціал іонізації *і*-того компоненту суміші, В (див. табл. 2.1).

Температура суміші плазмоутворювальних газів у стовпі зварювальної дуги, у свою чергу, також залежить від їх ефективного потенціалу іонізації. Ця залежність для ручного дугового зварювання покритим електродом описується рівнянням Хрєнова:

$$T = 800U_{\text{еф}} \qquad (2.3)$$

Таким чином, кожна суміш плазмоутворювальних газів, є термодинамічною системою з нульовим ступенем свободи, тобто для заданого зовнішнього тиску кожному складу суміші відповідає своя (унікальна) комбінація значень температури, ефективного потенціалу іонізації та ступеня термічної іонізації. Для спільного розв'язання системи рівнянь (2.1)…(2.3) з точністю розрахунків по температурі до 10 К може бути використаний алгоритм послідовних наближень, представлений на рис. 2.

При введенні до складу електродного покриття флюориту CaF_2, стовп зварювальної дуги збагачується продуктами його дисоціації за реакцією:

$$CaF_2 \rightarrow Ca^{+} + 2F^{-}$$

Кварцовий пісок SiO_2, мармур $CaCO_3$ і рутил TiO_2 в плазмі дуги присутні у вигляді продуктів їх часткової дисоціації – газів, що далі дисоціюють за наступними схемами:

$$SiO \rightarrow Si^{+} + O^{-}$$
$$CaO \rightarrow Ca^{+} + O^{-}$$
$$TiO \rightarrow Ti^{+} + O^{-}$$

Таким чином, для розрахункової оцінки впливу на сталість горіння зварювальної дуги окремих компонентів електродного покриття необхідно обчислити температуру, ефективний потенціал та ступінь іонізації сумішей га-

зів, які утворюються внаслідок термічної дисоціації відповідних компонентів електродного покриття.

Для того, щоб встановити, порошок якого саме компоненту електродного покриття насипано на металеву пластину, необхідно порівняти значення розрахункового ступеня термічної іонізації суміші газів та експериментально встановлені значення розривної довжини зварювальної дуги. Більшим значенням розривної довжини зварювальної дуги відповідають більші значення ступеня термічної іонізації.

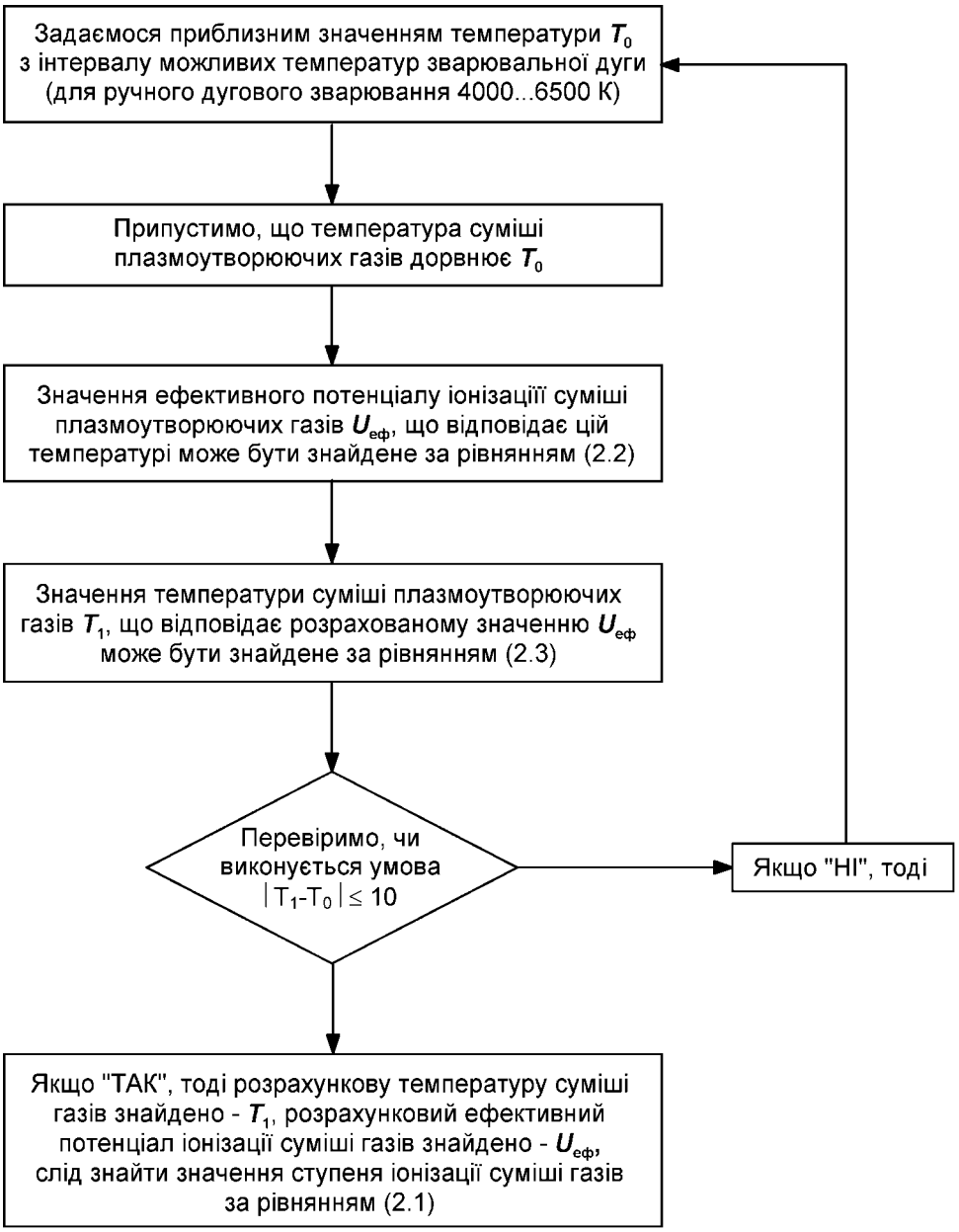


Рис. 2. Алгоритм спільного розв’язання системи рівнянь (2.1)…(2.3) методом послідовних наближень

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Дослідження впливу типу електродного покриття на сталість горіння зварювальної дуги на прямій та зворотній полярності.

1.1. Зібрати експериментальну установку за схемою на рис. 3.

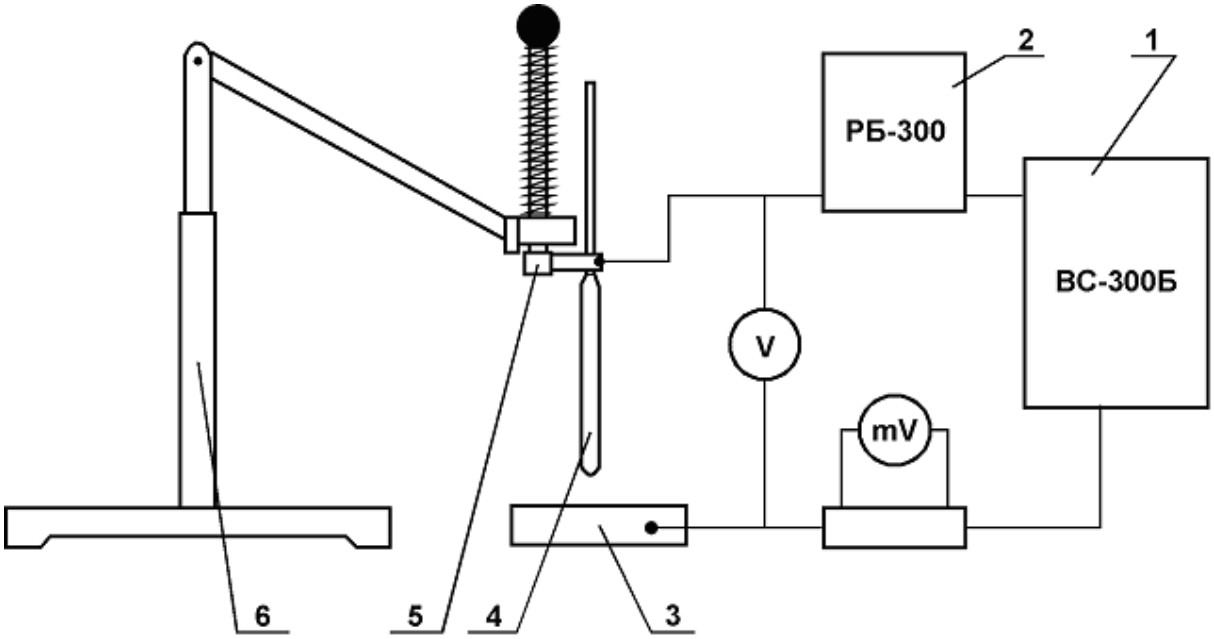


Рис. 3. Схема експериментальної установки [2]: 1 – джерело живлення; 2 – баластний реостат; 3 – сталева пластина; 4 – електрод; 5 – електродний затискач; 6 – штатив

1.2. Експериментально встановити розривну довжину зварювальної дуги для електрода з покриттям основного типу (УОНІ-13/55), при зварюванні на прямій полярності. (Значення розривної довжини зварювальної дуги знайти як середньоарифметичне за результатами трьох вимірювань).

1.3. Провести аналогічні вимірювання на зворотній полярності.

1.4. Повторити експерименти за методикою пп. 1.2 – 1.3 для електроду з покриттям рутилового типу (АНО-21)

1.5. Повторити експерименти за методикою пп. 1.2 – 1.3 для голого дроту без покриття.

1.6. За результатами експериментів побудувати гістограму впливу типу електродного покриття на розривну довжину дуги.

2. Дослідження впливу окремих компонентів електродного покриття на розривну довжину зварювальної дуги.

2.1. Обчислити значення температури, ефективного потенціалу іонізації та ступеня термічної іонізації для наступних сумішей газів:

I. Ca + 2F; II. Si + O; III. Ca + O; IV. Ti + O.

2.2. Експериментально встановити розривну довжину зварювальної дуги на прямої полярності, що горить між голим дротом без покриття та сталевою пластиною, на яку насипано шар порошку відповідного компоненту електродного покриття (по результатам трьох вимірювань для кожного компонента).

2.3. Повторити експерименти на зворотній полярності.

2.4. Порівняти результати розрахунків по п. 2.1 з результатами експериментально встановленої розривної довжини дуги для окремих компонентів електродного покриття.

3. Результати розрахунків та експериментів занести до табл. 2.2.

4. Зробити висновки по виконаній роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте визначення процесу іонізації та назвіть основні види іонізації.
2. Що називають розривною довжиною дуги і в чому полягає суть методики Костянтина Хрєнова по визначенню стабільності горіння зварювальної дуги?
3. Що таке ступінь іонізації газу і які методики її визначення Вам відомі?
4. В чому полягає особливість іонізації суміші газів в порівнянні з чистою речовиною в газоподібному стані?
5. Що таке ефективний потенціал іонізації?
6. Які заряджені частинки є головними носіями струму в стовпі дуги?
7. Які речовини у складі покриття зварювальних електродів УОНІ-13/55 та АНО-21 грають роль іонізуючих компонентів?

8. Дайте характеристику стабільності горіння дуги при використанні електродів УОНІ-13/55 та АНО-21 на прямій та зворотній полярності.

Таблиця 2.2. **Результати розрахунків та експериментальні дані по визначенню розривної довжини дуги**

Тип електроду	Полярність	Розривна довжина зварювальної дуги, мм			
		$L_{р1}$	$L_{р2}$	$L_{р3}$	$L_р$
УОНІ - 13/55	пряма				
	зворотна				
АНО - 21	пряма				
	зворотна				
Голий дріт без покриття	пряма				
	зворотна				

Компонент електродного покриття	Розрахункові значення параметрів суміші плазмоутворювальних газів			Полярність	Розривна довжина зварювальної дуги, мм			
	T, К	U_0, еВ	x		$L_{р1}$	$L_{р2}$	$L_{р3}$	$L_р$
CaF_2				пряма				
				зворотна				
SiO_2				пряма				
				зворотна				
$CaCO_3$				пряма				
				зворотна				
TiO_2				пряма				
				зворотна				

Лабораторна робота № 3
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

МЕТА РОБОТИ

Встановити вплив матеріалу електродів на осцилограми зварювального струму та падіння напруги на дузі.

ЗАДАЧІ

1. Ознайомитися з методикою осцилографування електричних параметрів зварювальної дуги за допомогою персонального комп'ютера з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).
2. Зареєструвати осцилограми зварювального струму та падіння напруги на дузі для електродів з різних матеріалів.
3. Обробити отриманні осцилограми та побудувати динамічну вольт-амперну характеристику (ВАХ) зварювальної дуги.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Осцилографування електричних параметрів зварювальної дуги за допомогою персонального комп'ютера з АЦП.

ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- Джерело живлення зварювальної дуги – зварювальний трансформатор СТШ-250.
- Баластний реостат РБ-300.
- Шунт.
- Вольтметр та мілівольтметр.
- Дільник напруги.
- Персональний комп'ютер з АЦП.
- Графітові електроди, діаметром 5 мм.
- Штучні покрити електроди АНО-21 діаметром 3 мм.

- Пластина з низьковуглецевої сталі, розмірами 100×100×10 мм.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Параметри, які характеризують існування електричної дуги змінного струму, традиційно оцінюють ґрунтуючись на аналізі осцилограм шлейфних та електронних осцилографів. У той же час, тривалість перехідних процесів при електродуговому зварюванні на змінному струмі складає $10^{-3}...10^{-4}$ с, що, відповідно до теореми Найквіста, вимагає частоти дискретизації сигналу відповідно 2...200 кГц. Роздільна здатність вимірювальних пристроїв шлейфних осцилографів може досягати 10 кГц, що в принципі може бути достатнім для виявлення деяких особливостей перехідних процесів. Однак, зі збільшенням частоти сигналу, який може реєструватися механічною системою вібратора шлейфного осцилографа, різко знижується його чутливість. Це призводить до того, що для реєстрації параметрів процесу горіння дуги при зварюванні, можливо використовувати шлейфи, які дозволяють записувати сигнали з частотою до 2...4 кГц. Цього явно недостатньо для реєстрації процесів, тривалість яких складає $10^{-3}...10^{-4}$ с. Використання електронних осцилографів, у тому числі запам'ятовувальних, так само не дозволяє фіксувати ці процеси з достатньою точністю. Пов'язано це з обмеженням по тривалості розгорнення електронного променя (2×10^{-3} с) і складністю синхронізації моменту початку розгорнення і моменту існування дугового розряду, що вивчається. Ще одним недоліком використання описаних приладів для реєстрації процесу горіння дуги є відсутність на осцилограмах синхронізованої з вхідним сигналом нульової лінії і представлення отриманих даних у графічному форматі, наступне оцифровування якого накладає істотні погрішності.

Для перетворення аналогового сигналу, що характеризує зміни процесу існування дугового розряду при зварюванні в цифровий сигнал, можна використовувати аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Аналоговий сигнал, що надходить до АЦП може реєструватись з частотою дискретизації до 500 кГц. Наявність відповідного програмного забезпечення дозволяє оперативно проглядати отриманні осцилограми, зберігати їх на жорсткому диску ПК, та

одержувати дані, що характеризують процес зварювання, у вигляді текстового файлу, який, в подальшому, можна оброблювати за допомогою різноманітного програмного забезпечення.

На осцилограмах струму та напруги виділяють наступні характерні параметри:

- напруга холостого ходу джерела живлення ($U_{\text{х}}$);
- напруга підпалу дуги ($U_{\text{п}}$);
- час підпалу ($t_{\text{п}}$);
- час існування дуги ($t_{\text{д}}$);
- час зсуву фаз між струмом та напругою ($t_{\text{з}}$);
- максимальні амплітудні значення струму та напруги ($U_{\text{А}}$, $I_{\text{А}}$).

Під час горіння дуги змінного струму між електродами з однакового матеріалу, осцилограми струму і падіння напруги на дузі симетричні відносно осі ординат. При зварюванні штучним покритим електродом, за рахунок впливу компонентів електродного покриття виникає деяка асиметрія в осцилограмах електричних параметрів зварювальної дуги. У випадку, коли зварювальна дуга існує між різними матеріалами (дуга графіт – сталь), асиметрія проявляється ще більш значної мірою. Пов’язано це, насамперед, з катодними та анодними процесами.

Ускладнений процес збудження дугового розряду змінного струму проявляться на осцилограмі у наявності великого піка запалювання. Відсутність піка запалювання свідчить про існування залишкової іонізації дугового проміжку після зникнення дуги, що суттєво покращує умови виникнення дуги у наступному полуперіоді. Час існування дуги також залежить від ступеня іонізації дугового проміжку та потенціалу іонізації елементів, що входять до складу зварювальних матеріалів. При наявності у зварювальних матеріалах елементів з низьким потенціалом іонізації час існування дуги більший (дуга стабільніша).

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з лабораторним устаткуванням для дослідження зварювальної дуги змінного струму. Замалювати в протоколі лабораторної роботи схему експериментальної установки (рис. 4).

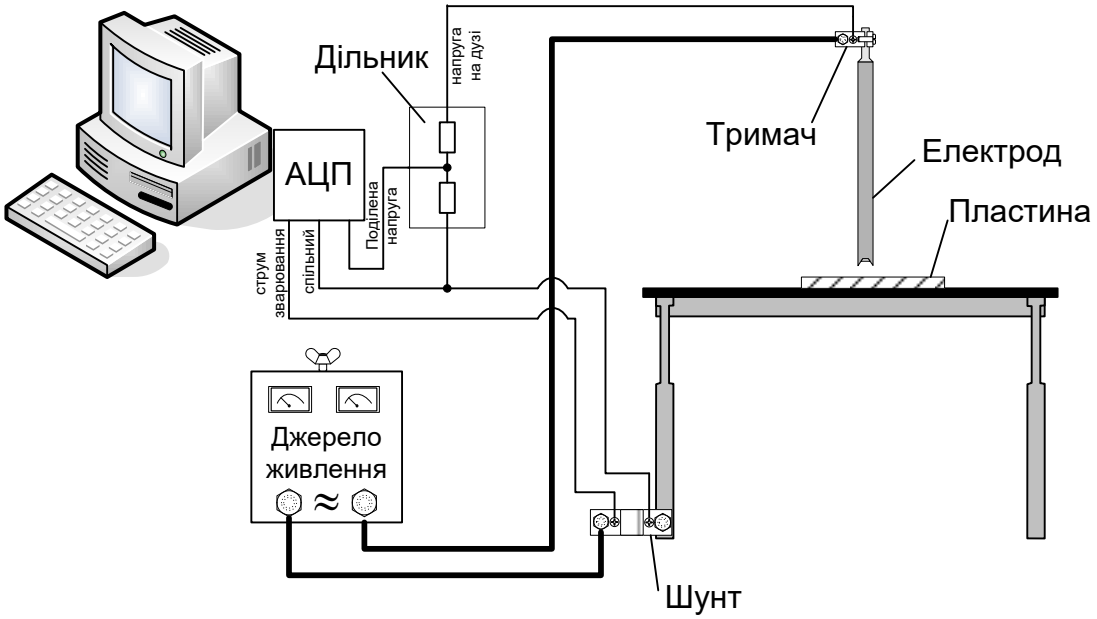


Рис. 4. Схема експериментальної установки для дослідження зварювальної дуги змінного струму [3]

2. Зобразити осцилограму холостого ходу джерела живлення зварювальної дуги змінного струму. Провести тарування АЦП.
3. Зобразити осцилограми падіння напруги на зварювальній дузі та сили зварювального струму для наступних пар електродів:
   1. графіт - графіт;
   2. графіт - сталь;
   3. штучний електрод АНО-21 - сталева пластина.
4. Розшифрувати осцилограми, зробивши відповідні записи у табл. 3.1, та позначивши характерні ділянки.
5. Побудувати динамічну ВАХ дуги змінного струму, тривалістю 1 період для різних пар електродів.
6. Зробити висновки по виконаній роботі.

Таблиця 3.1. **Характеристики осцилограм електричних параметрів зварювальної дуги**

Електроди	Прямий полуперіод		Зворотн. полуперіод		Асиметричність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$\Delta I_{зв}$, А	$\Delta U_д$, В
графіт - графіт						
графіт - сталь						
АНО-21 – стальна пластина						

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які умови визначають можливість існування електричної дуги, що живиться зварювальним джерелом струму ?
2. Назвіть процеси, які мають місце при підпалі зварювальної дуги.
3. Охарактеризуйте особливості горіння дуги на змінному струмі.
4. Який зв’язок між напругою джерела живлення, та напругою на дузі ?
5. Який зв’язок між осцилограмами струму та напруги при існуванні дуги змінного струму ?
6. Поясніть причини виникнення асиметрії на різних полуперіодах.
7. Яке розміщення електродів прийнято називати прямою та зворотною полярністю ?
8. У чому полягає сутність вентильного ефекту ?

Лабораторна робота № 4
НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ШТУЧНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

МЕТА РОБОТИ

Дослідити тепловий стан покритих електродів під час зварювання за допомогою розрахункової та експериментальної методик. Визначити особливості нагрівання штучних електродів теплом Джоуля-Ленца.

ЗАДАЧІ

1. Встановити вплив електродного покриття на характер його нагрівання теплом Джоуля–Ленца.
2. Експериментальним та розрахунковим методами визначити вплив густини зварювального струму, що проходить через електрод, на процес його нагрівання.
3. Експериментально визначити розподіл температур вздовж електрода поблизу зварювальної дуги.
4. Дослідити нерівномірність плавлення електрода по його довжині. Визначити значення коефіцієнту розплавлення електрода на ділянках, що досліджуються.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Розрахунковий метод оцінки теплового стану електрода за Рикаліним.
2. Експериментальна методика реєстрації термічного циклу за допомогою термопар.
3. Експериментальна методика визначення коефіцієнта розплавлення ділянки електрода.

ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- Джерело живлення зварювальної дуги – випрямляч ВС-300Б.
- Баластний реостат РБ-300.
- Вольтметр.

- Мілівольтметр з відповідним шунтом.
- Штучні покриті електроди типу АНО-21 та голий сталевий дріт діаметрами 3 мм.
- Секундомір.
- Хромель-алюмелєві (тип К) термопари.
- Електронний прилад для реєстрації температури.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При зварюванні нагрівання електрода здійснюється за рахунок тепла електричної дуги і тепла, що виділяється при проходженні зварювального струму через електрод як активний опір (тепло Джоуля-Ленца). При цьому, електричний струм викликає тепловиділення по всій довжині електрода, починаючи від місця підводу струму, а дуга нагріває електрод лише поблизу торця електрода, в місці її горіння.

При ручному дуговому зварюванні поступове нагрівання штучного покритого електрода струмом може привести до його значного перегріву, що, в свою чергу, істотно впливає на властивості покриття, протікання хімічних реакцій в ньому і, відповідно, на якість захисту реакційної зони зварювання. Це ставить суттєві обмеження на підвищення зварювального струму з метою збільшення продуктивності процесу зварювання покритими електродами. Так, вже при температурі 400...500 °С, може відбуватися відокремлювання покриття від електродного стержня, що робить процес зварювання неможливим.

В ході даної лабораторної роботи пропонується окремо дослідити питання нагрівання електрода струмом і теплом дуги, а також їх сумісну дію на плавлення електрода.

Нагрівання електрода струмом. Розрахунок нагрівання електрода струмом проводять за допомогою номограми, розробленої академіком Миколою Рикаліним (рис. 5) за наступним алгоритмом:

1) Для своїх умов вибрати значення емпіричних величин A, D_1, m (див. табл. 4.1).

2) Для своїх значень діаметра електрода (d, мм), густини зварювального струму (j, А/мм^2), початкової температури електрода (T_0, °С), яка дорівнює температурі навколишнього середовища, розрахувати граничну температуру ($T_{гр}$,°С), до якої нагрівається електрод при нескінченно довгому протіканні через нього струму заданого значення:

$$T_{гр} = m\, d\, j^2 + T_0\,. \qquad (4.1)$$

Таблиця 4.1. **Значення емпіричних параметрів для розрахунку нагрівання електрода струмом [2]**

Електрод		Струм	A, (мм^2 · °С)/(А · с)	D_1, °С	m, (мм^2 · °С)/(А^2)
Стержень	Покриття				
Низьковуглецева сталь	Рутил-органічне (АНО–21)	Постійний	0,031	240	2,65
		Змінний	0,037	300	2,65
	Основне УОНІ -13/45	Постійний	0,024	200	2,50
		Змінний	0,027	240	2,50

3) Розрахувати значення коефіцієнта n:

$$n = \frac{A}{md}\left(\frac{T_{гр}}{D_1} + 1\right). \qquad (4.2)$$

4) З урахуванням значення часу нагріву електрода струмом (t, с) і безрозмірних критеріїв $T_{гр}/D_1$ та nt по номограмі (рис. 5) знайти значення $T_{ел}/D_1$. Тут $T_{ел}$, °С і буде розрахованою температурою електрода в момент часу t після початку нагрівання його струмом.

Нагрівання електрода теплом дуги. Вплив тепла дуги на нагрівання електрода стає помітним лише на ділянці довжиною 5…10 мм, що безпосередньо прилягає до його торця. В цьому випадку, розподіл температури в електроді внаслідок його нагрівання зварювальною дугою (з урахуванням одночасного нагрівання електрода струмом) розраховується за допомогою наступного рівняння:

$$T(x) - T_{ел} = (T_к - T_{ел})\exp\left(-\frac{W x}{a}\right), \qquad (4.3)$$

де $T(x)$ – температура на відстані x від торця електрода, °С; $T_{ел}$ – температура нагрівання електрода струмом (див. вище), °С; $T_к$ – температура нагрівання дугою торця електрода, яку умовно прирівнюють до температури крапель електродного металу (для сталі 2300…2500 °С); W – середня швидкість плавлення ділянки електрода (приймається постійною протягом всього часу його нагрівання і рівною швидкості подавання електрода в дугу), м/с; x – відстань від торця електрода до перетину, нагрівання якого досліджується, м; a – коефіцієнт температуропроводності який для низьковуглецевої сталі дорівнює $a = 8 \cdot 10^{-6}$ м/с^2.

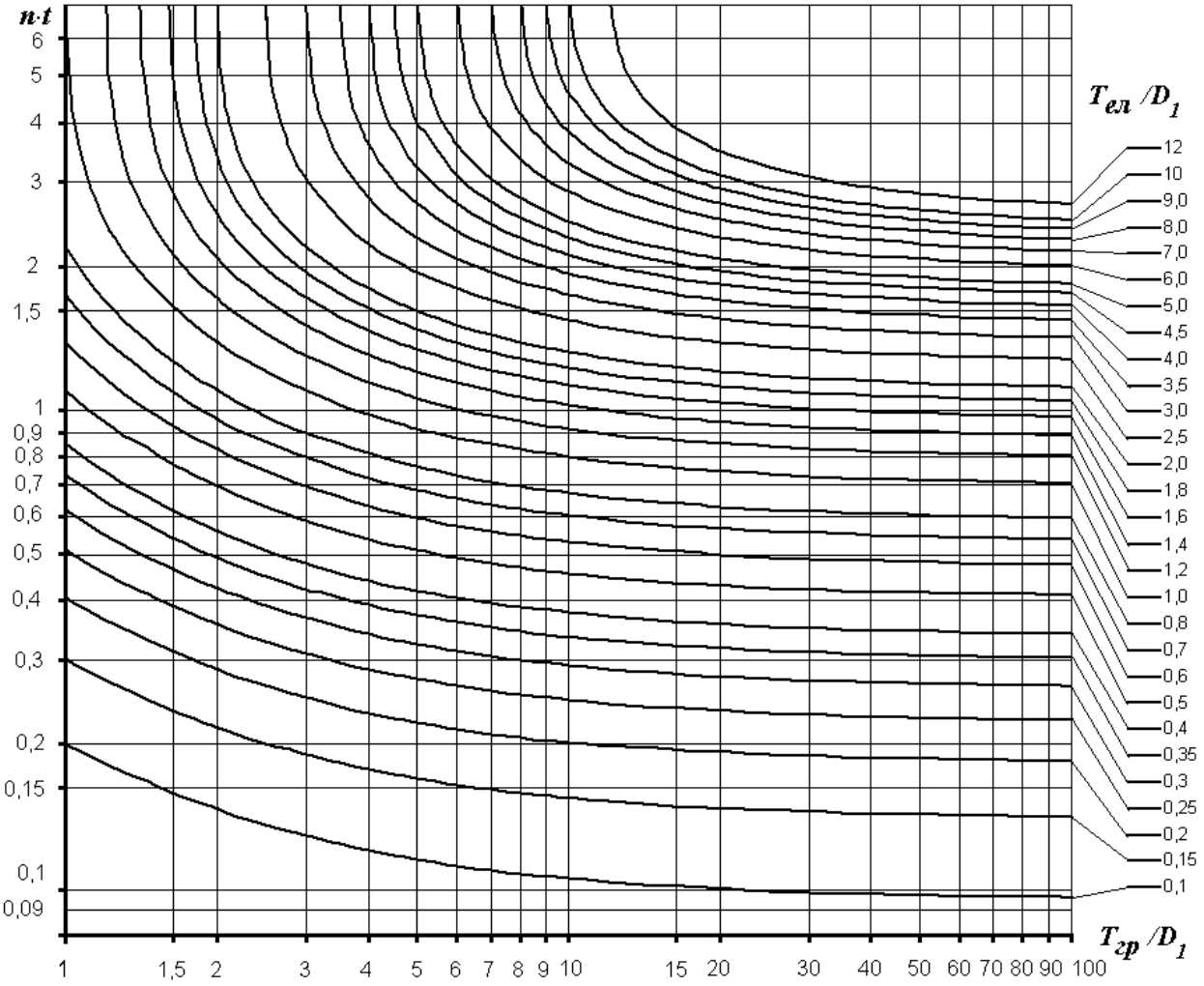


Рис. 5. Номограма для розрахунку процесу нагрівання струмом електрода з низьковуглецевої сталі [2]

Характеристики плавлення ділянки електрода. Швидкість плавлення електрода (W, см/с) на ділянці довжиною (l, см), якщо ділянка розплавилася за час ($t_р$, с) дорівнює:

$$W = l / t_р . \quad (4.4)$$

Продуктивність плавлення електрода ($g_п$, г/с) з площею поперечного перерізу (F, см^2) та густиною металу (для низьковуглецевої сталі ρ = 7,83 г/см^3) визначається за формулою:

$$g_п = W F \rho . \quad (4.5)$$

Коефіцієнт розплавлення електрода ($\alpha_р$, г·А$^{-1}$·год$^{-1}$) в залежності від сили зварювального струму ($I_{зв}$, А) дорівнює:

$$\alpha_р = 3600\, g_п / I_{зв} . \quad (4.6)$$

Нерівномірність швидкості розплавлення електрода розраховується за наступною формулою:

$$\psi = \frac{W_к}{W_п} = \frac{\alpha_{р.к}}{\alpha_{р.п}}, \quad (4.7)$$

де $W_к$, $W_п$ – значення швидкості плавлення електрода, відповідно на кінцевій та початковій ділянках; $\alpha_{р.к}$, $\alpha_{р.п}$ – значення коефіцієнта розплавлення електрода, відповідно на кінцевій та початковій ділянках.

Принцип вимірювання температури за допомогою термопари. *Термопара* являє собою чутливий елемент термоелектричного перетворювача у вигляді двох ізольованих провідників із різнорідних матеріалів, з'єднаних на одному кінці, принцип дії якого ґрунтується на використанні термоелектричного ефекту для вимірювання температури.

Термоелектричний ефект, або *ефект Зеєбека* полягає у виникненні електрорушійної сили (ЕРС) між двома контактами різнорідних провідників в замкненому ланцюзі, якщо місця контактів перебувають при різній температурі.

Між з'єднаними провідниками є контактна різниця потенціалів; якщо стики замкнених у ланцюг провідників перебувають за однакової темпера-

тури, сума таких різниць потенціалів дорівнює нулю. Коли ж стики різнорідних провідників перебувають за різних температур, різниця потенціалів між ними залежить від різниці температур (рис. 6 *а*). Коефіцієнт пропорційності у цій залежності називають коефіцієнтом термо-ЕРС. У різних металів коефіцієнт термо-ЕРС різний і, відповідно, різниця потенціалів, що виникає між кінцями різних провідників, буде різною. Поміщаючи спай з металів з відмінними від нуля коефіцієнтами термо-ЕРС у середовище з температурою T_1, ми отримаємо напругу між протилежними контактами, що знаходяться при іншій температурі T_2, яка буде пропорційна різниці температур: T_1–T_2.

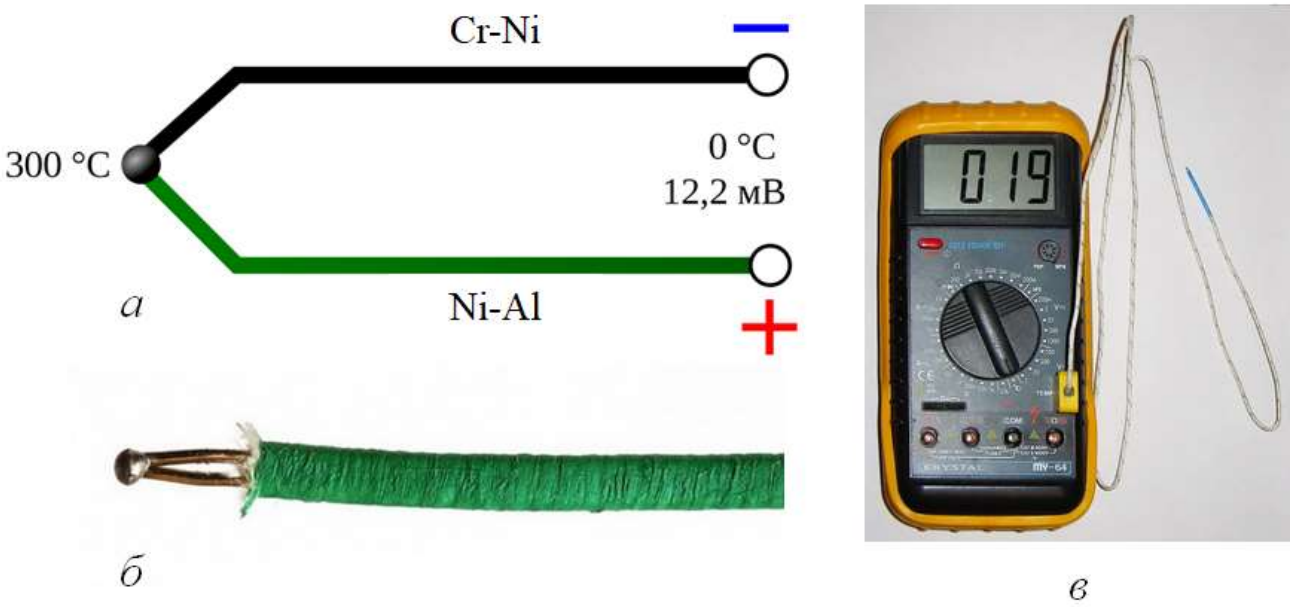


Рис. 6. Схема термопари типу К: при температурі спаю ніхрому і алюміній-нікелю 300 °С термо-ЕРС становить 12,2 мВ (*а*); загальний вигляд термопари (*б*); термопара, підключена до вторинного вимірювального приладу (*в*)

Термопара, що на практиці застосовується для вимірювання температури, являє собою металевий провід з особливих сплавів, дві жили якого спаяні між собою (рис. 6 *б*), і спай розміщений в середовищі, температура якого вимірюється. Вільні кінці проводу виведені за межі області вимірювання температури та з'єднані з приладом, що показує перетворений сигнал одержаний від спаю термопари (рис. 6 *в*).

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ[1]

1. Ознайомитись з лабораторним устаткуванням, його електричною схемою, розрахувати ціну поділки шкали вимірювального обладнання.
2. Перевірити правильність підключення термопари до вимірювального пристрою (нагрівання полум'ям сірника). Встановити в держак електрод АНО-21. Щільно закріпити термопару посередині електрода (в місті закріплення термопари видалити покриття, так щоб термопара безпосередньо контактувала із електродним стержнем).
3. Закоротити електрод на сталеву пластину і ввімкнути подачу струму на джерелі живлення. Одночасно включити секундомір і фіксувати через кожні три секунди значення температури електрода та напруги і струму короткого замикання. Не нагрівати електрод вище 900 °С ! При досягненні цієї температури спочатку вимкнути струм, а потім звільнити електрод з держака.
4. Експериментальні дані занести в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. **Експериментальні дані по нагріванню струмом електрода АНО-21**

Час *t*, с	Температура *T*, °С	Напруга К.З. *U*, мВ	Струм К.З. *I*, А
3			
6			
9			
...			

5. Провести аналогічні експерименти, згідно з пп. 2 – 3, але з голим електродним дротом без покриття.
6. Експериментальні дані занести в табл. 4.3.
7. Мідними скрутками поділити електрод АНО-21 на ділянки однакової довжини l = 5 см. В кінці електрода, поблизу держака закріпити тер-

[1] Через значний обсяг та трудомісткість експериментальних дослідів на виконання даної лабораторної роботи відводиться 4 аудиторні години. Протягом 1-ї пари здійснюється інструктаж з техніки безпеки, проводиться опитування студентів та виконується прибл. 40% експериментальних дослідів. На 2-й парі експериментальні досліди завершуються.

мопару. Виконати наплавлення цим електродом на сталеву пластину. У момент підпалу зварювальної дуги ввімкнути секундомір і фіксувати у табл. 4.4 координати часу, які відповідають моменту розплавлення кожної зі скруток. Одночасно фіксувати через кожні три секунди значення температури електрода, падіння напруги на дузі і зварювального струму та заносити дані в табл. 4.5. Наплавлення виконувати без перерв.

***Таблиця 4.3*. Експериментальні дані по нагріванню струмом дроту без покриття**

Час t, с	Температура T, °С	Напруга К.З. U, мВ	Струм К.З. I, А
3			
6			
9			
...			

8. Результати розрахованих за формулами (4.4) – (4.6) характеристик плавлення ділянок електрода занести в табл. 4.4.

***Таблиця 4.4*. Характеристики плавлення ділянок електрода**

Координата ділянки від початку електрода, мм	Координата часу, яка відповідає закінченню плавлення ділянки, с	$t_р$, с	W, см/с	$g_п$, г/с	$\alpha_р$, $г \cdot А^{-1} \cdot год^{-1}$
0…50					
50…100					
100…150					
150…200					
200…250					
250…300					
300…350					

9. За формулою (4.7) розрахувати нерівномірність швидкості розплавлення електрода.

10. За даними табл. 4.2 і 4.3 побудувати термічні цикли нагрівання струмом електрода АНО-21 та дроту без покриття.

***Таблиця 4.5*. Експериментальні дані по плавленню електрода АНО-21**

Час t, с	Температура T, °С		Напруга $U_д$, мВ	Струм $I_{зв}$, А
	Експериментальні дані	Розрахункові дані		
3				
6				
9				
...				

11. За формулами (4.1) – (4.3) розрахувати температуру нагрівання електрода АНО-21 струмом під час наплавки і занести розраховані дані в табл. 4.5.
12. За даними табл. 4.5 побудувати експериментальний та розрахунковий термічні цикли нагрівання електрода струмом під час наплавки і порівняти їх.
13. Зробити висновки по виконаній роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які складові теплоти можна виділити в ефекті нагрівання та плавлення електрода ?
2. Як густина струму впливає на нагрівання електрода ?
3. З яким джерелом нагрівання електрода пов’язана зміна швидкості його плавлення ?
4. Як змінюється електричний опір металевого стержня електрода при збільшенні його температури ?
5. Як ефект нагріву електрода теплом Джоуля-Ленца впливає на фізичні і технологічні властивості покритого електрода, порошкового і суцільного дроту ?

6. Який штучний електрод, за рівних вимог, нагрівається швидше: з покриттям, чи без ?
7. Розкажіть про розрахункові та експериментальні методики дослідження нагрівання електрода струмом.
8. Розкажіть про розрахункові та експериментальні методики дослідження спільного нагрівання електрода струмом і теплом зварювальної дуги.
9. Що таке термопара і для чого вона може застосовуватись ?
10. Поясніть фізичну природу термоелектричного ефекту (ефекту Зеєбека).

Лабораторна робота № 5
ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ У ЗВАРЮВАЛЬНІЙ ДУЗІ

МЕТА РОБОТИ

Дослідити вплив типу електродного покриття на розміри крапель електродного металу.

ЗАДАЧІ

1. Ознайомитися з методикою відбору крапель електродного металу шляхом наплавлення на масивний мідний диск, що обертається.
2. Ознайомитися з методикою оцінки фракційного складу крапель електродного металу.
3. Встановити вплив типу електродного покриття та полярності на фракційний склад крапель електродного металу.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Методика відбору крапель електродного металу.
2. Методи математичної статистики.

ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- Джерело живлення зварювальної дуги – випрямляч ВС-300Б.
- Баластний реостат РБ-300.
- Вольтметр.
- Мілівольтметр з відповідним шунтом.
- Штучні покриті електроди УОНІ-13/55, АНО-21 та голий сталевий дріт діаметрами 3 мм.
- Експериментальна установка для наплавлення на масивний мідний диск, що обертається.
- Терези.

- Набір сит.
- Секундомір.
- Інструменти: молоток, зубило, сталева щітка.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Як відомо, теплопровідність міді набагато більша (приблизно на один порядок) ніж теплопровідність сталей, незалежно від їх класу і системи легування. Так коефіцієнт теплопровідності λ для технічної міді сягає 376,0 Вт/(м · К), в той час як для низьковуглецевих конструкційних і неіржавких аустенітних сталей цей показник складає відповідно 41,9 і 25,1 Вт/(м · К). На цьому явищі і базується методика відбору крапель електродного металу шляхом наплавлення на масивний мідний диск, що обертається. Внаслідок високої теплопровідності міді, зварювальна ванна під час наплавлення штучним електродом не утворюється і краплі електродного металу не приварюються до поверхні диску.

При цьому, для полегшення збирання крапель електродного металу наплавлення на диск рекомендовано проводити по спіралі, як це показано на схемі (рис. 7).

Після наплавлення, краплі електродного металу легко видаляються з поверхні диску за допомогою слюсарного інструменту (молотка, зубила і сталевої щітки). Далі їх розділяють на фракції шляхом послідовного просіювання через сита з отворами різних діаметрів. Діаметри отворів сит вибирають виходячи з умови, щоб маси фракцій, отриманих при просіюванні крапель через сита, відрізнялись між собою незначно. Таким чином, отримують шість фракцій крапель електродного металу, які відрізняються діаметром крапель:

$$0 < d_{к1} \le D_1$$

$$D_1 < d_{к2} \le D_2$$

$$\ldots$$

$$D_4 < d_{к5} \le D_5$$

$$D_5 < d_{к6} \le d_{max},$$

де $d_{к1}$, $d_{к2}$, ..., $d_{к6}$ – середній діаметр електродних крапель у межах відповідної фракції, мм; D_1, D_2, ..., D_5 – діаметри отворів сит, мм; d_{max} – значення діаметра краплі електродного металу, що має найбільші розміри з усіх відібраних крапель, мм.

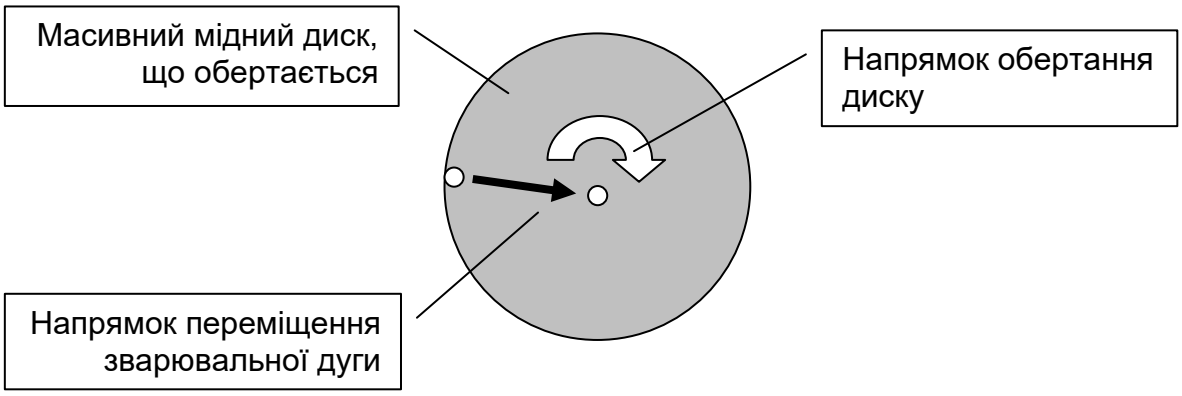


Рис. 7. Схема наплавки на масивний мідний диск, що обертається

Середній діаметр крапель виступає основним критерієм при оцінці фракційного складу крапель електродного металу і розраховується за формулою:

$$d_к = \frac{m_1 \frac{D_1}{2} + m_2 \frac{D_1 + D_2}{2} + ... + m_6 \frac{D_5 + d_{max}}{2}}{m_1 + m_2 + ... + m_6}, \quad (5.1)$$

де m_1, m_2, ..., m_6 – маси кожної з відібраних фракцій крапель, визначені їх зважуванням на терезах, г.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ[1]

1. За допомогою терезів визначити вагу всіх залучених до експериментів електродів $m_{ел}$.
2. Встановивши пряму полярність, провести наплавлення електродом АНО-21 на масивний мідний диск, що обертається. При цьому,

[1] Через значний обсяг та трудомісткість експериментальних дослідів на виконання даної лабораторної роботи відводиться 4 аудиторні години. Протягом 1-ї пари здійснюється інструктаж з техніки безпеки, проводиться опитування студентів та виконується прибл. 40% експериментальних дослідів. На 2-й парі експериментальні досліди завершуються.

наплавляти не менше одного електрода, фіксуючи фактичні значенні зварювального струму та напруги на дузі.

3. Всі нанесені на поверхню диску краплі змести з диску на аркуш паперу та вилучити з їх складу видимі частинки шлаку.
4. За допомогою вище наведеної методики встановити фракційний склад крапель електродного металу.
5. За допомогою терезів визначити вагу кожної фракції крапель m_1, ..., m_6 та залишку електроду $m_{зал}$.
6. Повторити експерименти згідно з пп. 2 – 5, встановивши зворотну полярність.
7. Провести аналогічні дослідження, згідно з п.п. 2 – 6, з електродами УОНІ-13/55 та голим дротом без покриття.
8. Для кожного з проведених експериментів побудувати гістограми фракційного складу крапель електродного металу (див. рис. 8) та визначити середній діаметр краплі $d_к$ за формулою (5.1).

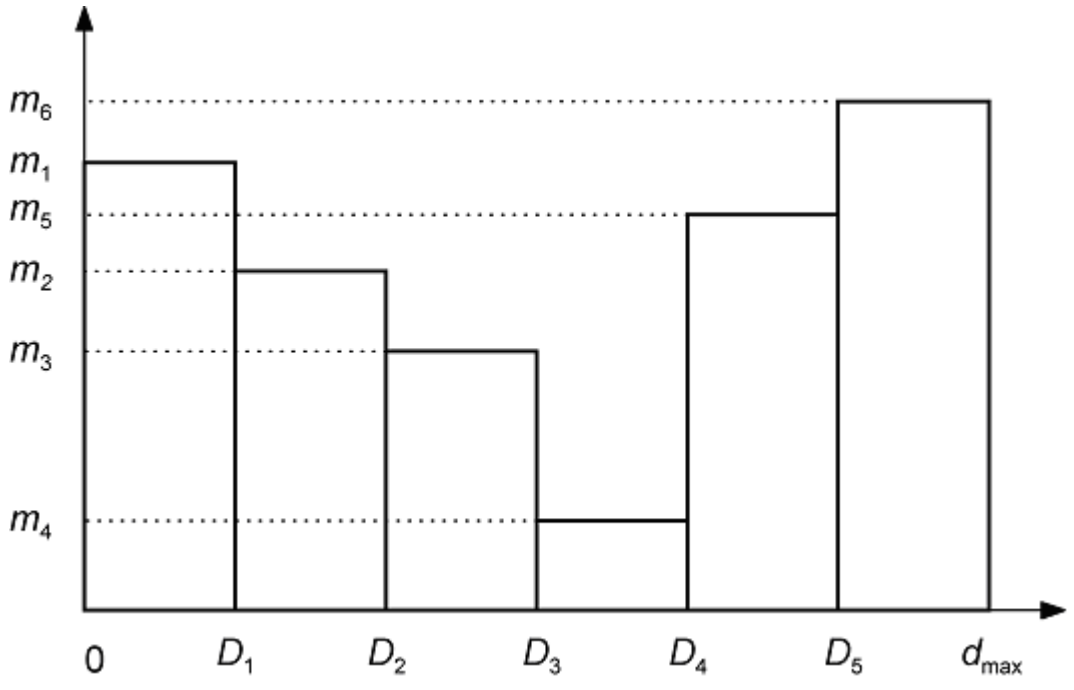


Рис. 8. Фракційний склад крапель електродного металу

9. Для кожного з проведених експериментів розрахувати коефіцієнт угару $k_у$ за формулою:

$$k_у = \frac{(m_{ел} - m_{зал}) - (m_1 + m_2 + ... + m_6)}{m_{ел} - m_{зал}} \cdot 100\%,$$

де $m_{ел}$ – вага електроду, г; $m_{зал}$ – вага залишку електроду, г; m_1, ..., m_6 – вага кожної з відібраних фракцій крапель, г.

10. Для кожного з проведених експериментів розрахувати коефіцієнт покриття електроду $k_п$ за формулою:

$$k_п = \frac{m_{ел} - m_{зал}}{m_{ел}} \cdot 100\%.$$

11. Результати вимірів та розрахунків занести в табл. 5.1
12. Зробити висновки по виконаній роботі.

Таблиця 5.1. **Результати розрахунків та експериментальні дані по фракційному складу крапель електродного металу**

Результати експери-ментів		Пряма полярність			Зворотна полярність		
		АНО-21	УОНІ-13/55	Голий дріт	АНО-21	УОНІ-13/55	Голий дріт
$I_{зв}$, А							
$U_д$, В							
Маси, г	m_1						
	m_2						
	m_3						
	m_4						
	m_5						
	m_6						
	$m_{ел}$						
	$m_{зал}$						
$d_к$, мм							
$k_у$, %							
$k_п$, %							

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвіть види перенесення електродного металу.
2. Назвіть сили, які діють на краплю електродного металу в процесі її формування та перенесення.
3. Які особливості перенесення електродного металу при ручному дуговому зварюванні покритим електродом?
4. Як зварювання у верхньому (стельовому) положенні впливає на перенесення електродного металу?
5. Які методи управління перенесенням електродного металу Вам відомі ?
6. Охарактеризуйте вплив полярності, густини зварювального струму та складу електродного покриття на розміри крапель.
7. У чому полягає методика відбору крапель електродного металу ?
8. Виходячи з результатів лабораторної роботи дайте характеристику, щодо використання електродів типу АНО-21 та УОНІ-13/55 при зварюванні на прямій та зворотній полярності.

Лабораторна робота № 6
ПОРИ В ЗВАРНИХ ШВАХ

МЕТА РОБОТИ

Дослідити вплив складу зварювального флюсу на стійкість зварних швів до утворення пор.

ЗАДАЧІ

1. Ознайомитися з методикою оцінки стійкості металу зварного шва до утворення пор за методикою Любавського.
2. Порівняти стійкість до утворення пор званих швів, зварених під фтористими та безфтористими флюсами.
3. Оцінити вплив азоту у складі металу зварювальної ванни на утворення пор.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика оцінки стійкості металу зварного шва до утворення пор.

ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

- Пост автоматичного дугового зварювання під флюсом, обладнаний джерелом живлення ТДФ-1001У3 і зварювальним трактором ТС-17М.
- Флюси плавлені АН-348А, АН-44.
- Зразок з низьковуглецевої сталі з попередньо виконаними поздовжніми канавками.
- Зразок з низьковуглецевої сталі з поперечними наплавками, які виконані покритим електродом та голим електродним дротом без покриття.
- Гідрат окису заліза (іржа) $Fe(OH)_3$.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Пори являють собою наповнені газами пустоти в металі зварного шва. Вони відносяться до небажаних дефектів у зварних швах. Виникнення пор

визначається металургійними процесами в реакційній зоні зварювання, взаємодією металу з навколишнім середовищем і умовами кристалізації металу зварювальної ванни.

В загальному випадку пори в металі зварного шва утворюються, коли в період кристалізації зварювальної ванни має місце інтенсивне газоутворення і пухирці газів не встигнуть видалитися з металу до його затвердіння.

Можна виділити дві головні причини газовиділення з металу:

а) хімічні реакції в розплавленому металі, при яких продуктами реакції є гази, нерозчинні, або малорозчинні в ньому;

б) виділення з розчину газів, що його перенасичують (якщо утворився пересичений розчин).

Типовим для першого випадку є утворення закису вуглецю (чадного газу) при взаємодії наявних в металі окислів з вуглецем, наприклад:

$$FeO + C \rightarrow Fe + CO\uparrow.$$

Закис вуглецю CO практично нерозчинний в розплавленому залізі, тому, в результаті такої реакції, відбудеться значне перенасичення металу газом і з'явиться пухирець, заповнений CO, який прагне пересуватись у ванні відповідно до різниці його густини і густини оточуючої його рідкого металу. При зварюванні в нижньому положенні видалення таких пухирців здійснюється через верхню поверхню зварювальної ванни.

Значна кількість вуглецю в окисленому металі ванни приводить до інтенсивного утворення чадного газу CO. Інколи, наприклад, у випадку газового зварювання чавуна, при наявності в корені шва (на дні ванни) твердих окислів заліза газоутворення може бути таким інтенсивним, що у ванні утвориться суцільний газовий канал-трубка від дна ванни до її поверхні. Більш звичайним є утворення пор, пов'язаних з CO, у вигляді окремих пухирів, що послідовно спливають у ванні.

При малій концентрації вуглецю в рідкому металі і достатніх концентраціях розкислювачів (Ti, Si, Mn, ін.) основні реакції розкислення будуть відбуватися за рахунок цих елементів. В цьому випадку виділення може бути в значній мірі подавлено. Тому в зварювальних матеріалах (електрод-

ному дроті) для зварювання сталей прагнуть мати вміст вуглецю невеликим, а кількість інших розкислювачів достатньою для пригнічування реакції утворення закису вуглецю.

Щодо другого варіанту пороутворення в зварних швах, слід враховувати, що ряд газів, присутніх в реакційній зоні зварювання, добре розчиняються в металах, особливо рідких. Так, наприклад, розчинність водню й азоту у твердому і рідкому залізі відрізняється на порядок і більше (рис. 9). Як випливає з цих залежностей, при зниженні температури рідкого металу, й особливо рід час кристалізації, розчинність цих газів значно зменшується. Стрибкоподібне зменшення розчинності в момент кристалізації викликає при рівноважному чи понад рівноважному вмісті водню або азоту у перегрітій сталі інтенсивне виділення газів.

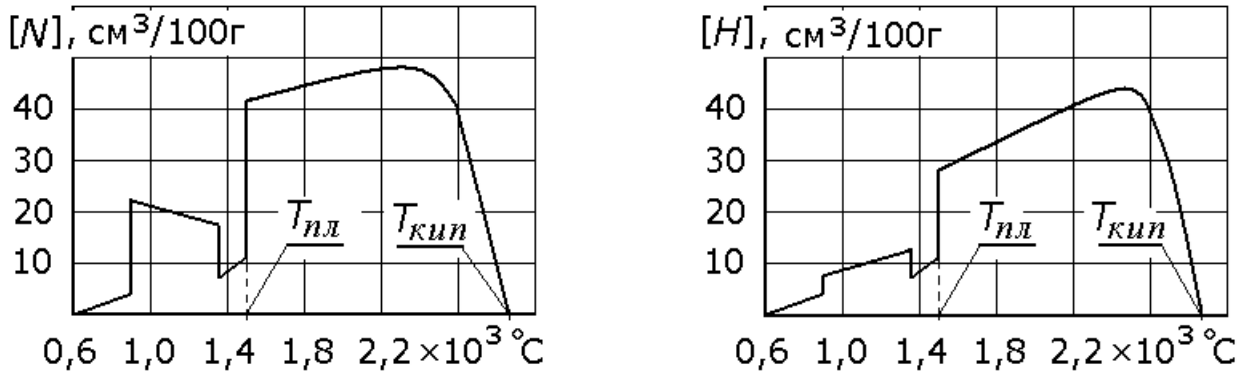


Рис. 9. Температурні залежності розчинності азоту [N] та водню [H] в залізі [4]

Таким чином, пори в зварних швах зазвичай заповнені невиділеними з металу бульбашками водню, азоту, водяної пари або закису вуглецю.

Методика розроблена Костянтином Любавським [5] дозволяє оцінити стійкість металу зварного шва до утворення пор водневого походження. За цією методикою у зразку (рис. 10) виконують поздовжні канавки, розбиті на ділянки довжиною 100 мм. На кожну ділянку насипають певну кількість пороутворюючої речовини (зазвичай іржі) та рівномірно розподіляють її по всій довжині ділянки. Потім виконують наплавлення по канавці в умовах, які досліджуються. За критерій стійкості металу зварного шва, що досліджується

приймають мінімальну кількість пороутворюючої речовини на 100 мм шва, яка приводить до появи зовнішніх пор у шві.

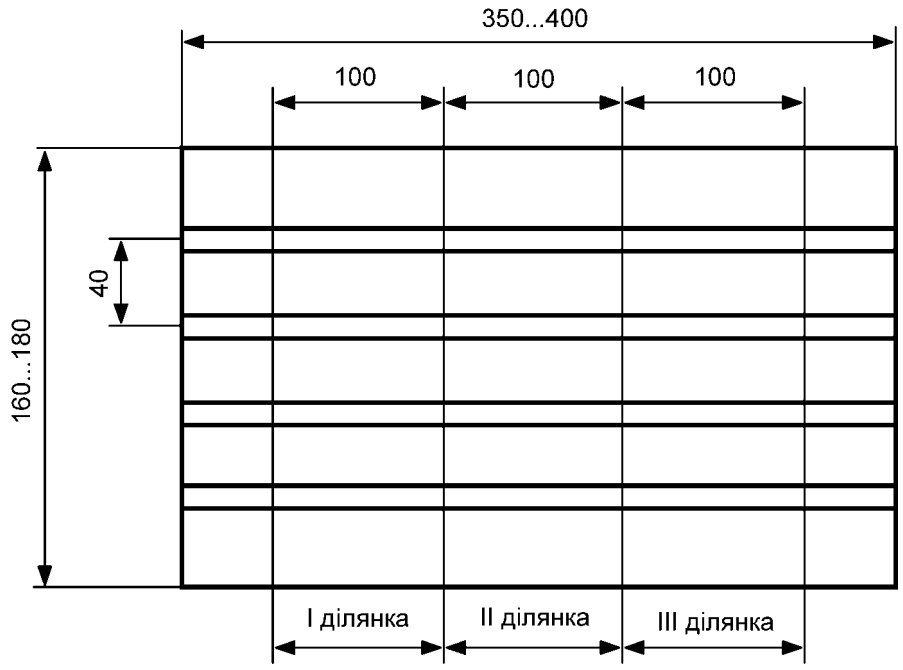


Рис. 10. Зразок для випробувань за методикою Любавського [2]

При оцінці стану наплавленого металу звертають увагу на шлакову корку та на поверхню власне зварного шва. Виникнення «побитості» шва, тобто вм'ятин на поверхні наплавленого валика, вказує на присутність в металі шва критичної кількості водню і служить ознакою можливого пороутворення.

Метал шва якісно оцінюють за наступною шкалою: побитість шва, одиничні пори, сітка пор, повне розпушення металу.

При проведенні цього дослідження необхідно уникати видування дугою іржі з канавки.

Вплив азоту у складі металу зварювальної ванни на утворення пор оцінюють за результатами автоматичного наплавлення валика під флюсом вздовж пластини (рис. 11), на якій попередньо були виконані дві поперечні наплавки (якісним покритим електродом та голим дротом цього ж електроду без покриття), що імітують прихватки, які зазвичай виконуються при складанні виробу перед зварюванням.

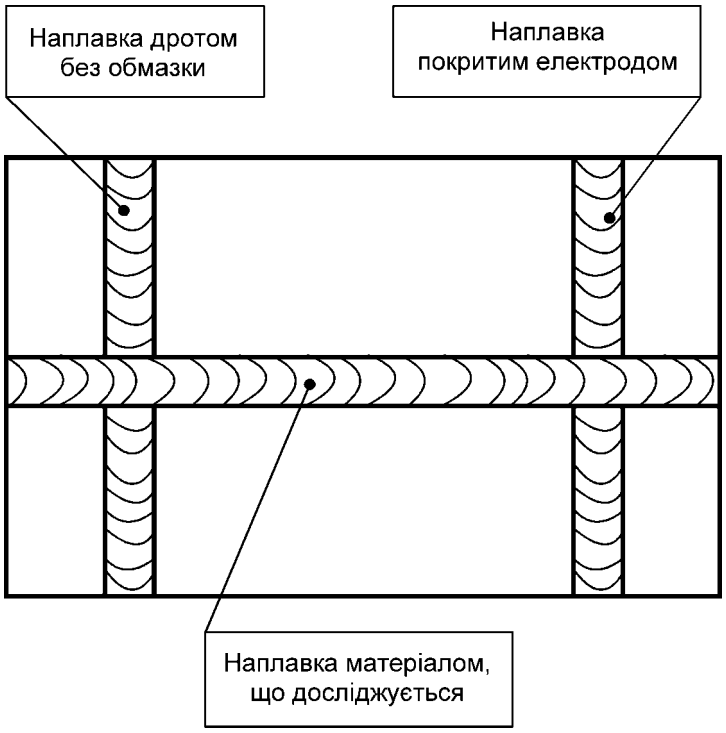


Рис. 11. Зразок з наплавками, що імітують прихватки [2]

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. За методикою Любавського порівняти стійкість металу швів до утворення водневих пор при автоматичному зварюванні під флюсами типів АН-348А та АН-44. Вміст основних компонентів зварювальних флюсів АН-348А та АН-44 наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. **Хімічний склад плавлених флюсів загального призначення [6]**

Флюс	Середній вміст компонентів, % ваг.							
	SiO_2	MnO	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	CaF_2	FeO
АН-348А	43	36	-	4	6	6	5	-
АН-44	40	-	15	-	35	-	-	10

2. Результати проведеного аналізу занести до табл. 6.2.

3. Оцінити вплив азоту, що міститься в металі зварювальної ванни при зварюванні під флюсом АН-348А електродним дротом Св-08А. Описати пори, що при цьому утворюються.
4. Порівняти результати експериментів згідно пп. 1 і 3 та зробити висновки по виконаній роботі.

Таблиця 6.2. **Стійкість металу зварного шва до утворення пор**

Флюс	Кількість внесеної іржі, мг			Опис пор, що утворилися		
	I ділянка	II ділянка	III ділянка	I ділянка	II ділянка	III ділянка
АН-348А						
АН-44						

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвіть гази, що приводять до утворення пор в металі зварного шва.
2. Перерахуйте джерела насичення зварювальної ванни воднем та азотом при різних способах дугового зварювання.
3. Опишіть механізм утворення водневих пор при зварюванні.
4. Опишіть механізм утворення азотних пор при зварюванні.
5. Назвіть технологічні методи запобігання утворенню пор при зварюванні.
6. Назвіть металургійні методи запобігання утворенню пор при зварюванні.
7. Які методики оцінки стійкості металу зварного шва до утворення пор Вам відомі ?
8. За результатами роботи опишіть вплив хімічного складу зварювального флюсу на стійкість металу зварного шва до утворення пор.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні : текст лекцій / В. М. Коперсак. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 384 с.
2. Теорія процесів зварювання-2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні : текст лекцій / В. М. Коперсак. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 252 с.
3. Квасницький В. В. Теорія зварювальних процесів. Дослідження фізико-хімічних і металургійних процесів та здатності металів до зварювання : навч. посібник / В. В. Квасницький. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – 184 с.
4. Свідерський В. П. Термодинаміка і теплові процеси зварювання : навч. посібник / В. П. Свідерський, В. С. Яремчук. – Хмельницький : ХНУ, 2014. – 375 с.
5. Теоретичні основи процесів зварювання : навчальний посібник для студентів спеціальності "Технологія та устаткування зварювання" / В.М. Мілютін [та ін.] ; Міністерство освіти і науки України ; Дніпродзержинський державний технічний університет. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. – 629 с.
6. Теорія процесів зварювання : навч. посіб. для студ. спец. "Технології та устакування зварювання". Ч. 1 / В.М. Карпенко [та ін.] ; МОН України, Донбаська держ. машинобудівна академія (ДДМА). – Краматорськ : ДДМА, 2013. – 191 с.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні [Текст] : текст лекцій / В. М. Коперсак. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 384 с.
2. Теорія процесів зварювання [Електронний ресурс] : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни, для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології та інжиніринг у зварюванні» та «Автоматизовані технологічні системи у зварюванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. О. А. Сливінський. – Електронні текстові данні (1 файл: 0,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.– 48 с.
3. Дослідження зварювальної дуги змінного струму за допомогою персонального комп’ютера [Текст] / Л. А. Жданов, А. М. Сливінський, В. М. Коперсак [та ін.] // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 3. – С. 49–55.
4. Теорія процесів зварювання-2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні [Текст] : текст лекцій / В. М. Коперсак. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 252 с.
5. Любавский К. В. К вопросу взаимодействия элементов и их окислов в сварочной ванне [Текст] / К. В. Любавский // Автогенное дело. – 1948. – № 10.
6. Костін О. М. Зварювальні матеріали [Текст] : навч. посібник / О. М. Костін. – Миколаїв : НУК, 2004. – 225 с.

Додаток А

Зразок оформлення титульного аркушу звіту з лабораторних робіт

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Кафедра зварювального виробництва

ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Виконав: студент групи _____

_____

Викладач: _____

Київ – 20___

Додаток Б

Бланки протоколів лабораторних робіт

Лабораторна робота № 1

ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

Мета роботи (заповнюється самостійно до л/р**):**

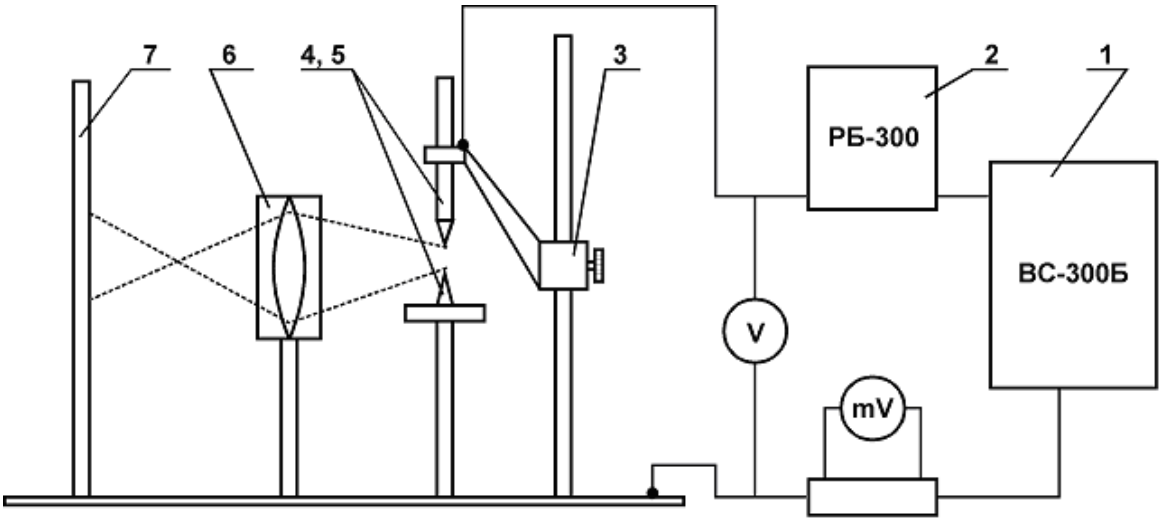


Схема експериментальної установки:
1 – джерело живлення; 2 – баластний реостат; 3 – штатив; 4 – вугільний електрод, 5 – вугільний електрод, вугільна та металева пластини; 6 – оптична система; 7 – екран.

Таблиця 1 **Експериментальні дані енергетичних параметрів дуги**

1) графітовий електрод / графітовий електрод				
$L_д$, мм	пряма полярність		зворотна полярність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В
2				
4				
6				

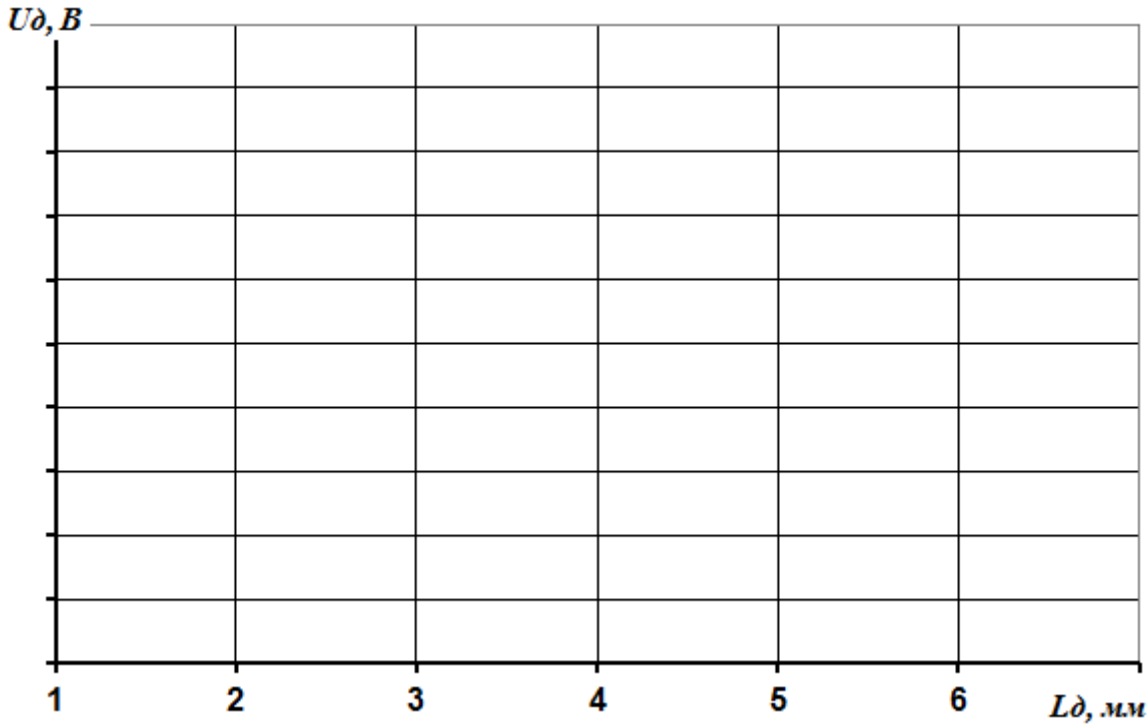
Продовження Табл. 1

2) графітовий електрод / графітова пластина				
$L_д$, мм	пряма полярність		зворотна полярність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В
2				
4				
6				
3) графітовий електрод / сталева пластина				
$L_д$, мм	пряма полярність		зворотна полярність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В
2				
4				
6				

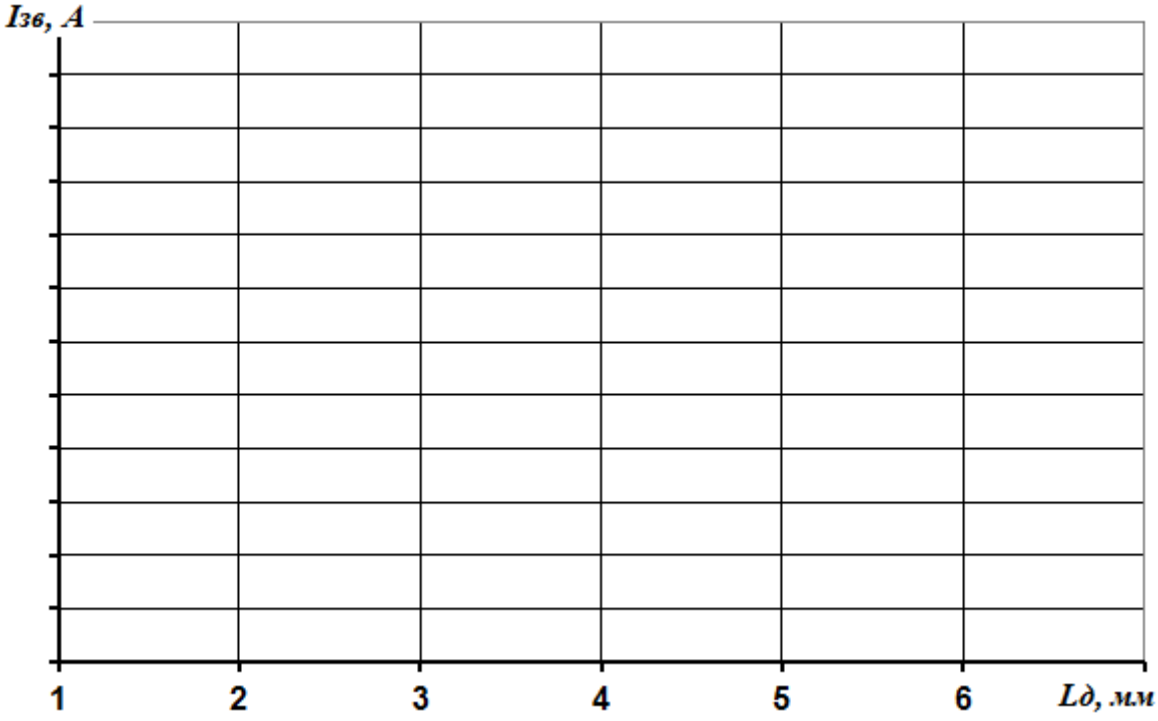
Зображення форми зварювальної дуги

- (катод) + (анод)	+ (анод) - (катод)
графітовий електрод / графітовий електрод **пряма полярність**	графітовий електрод / графітовий електрод **зворотна полярність**

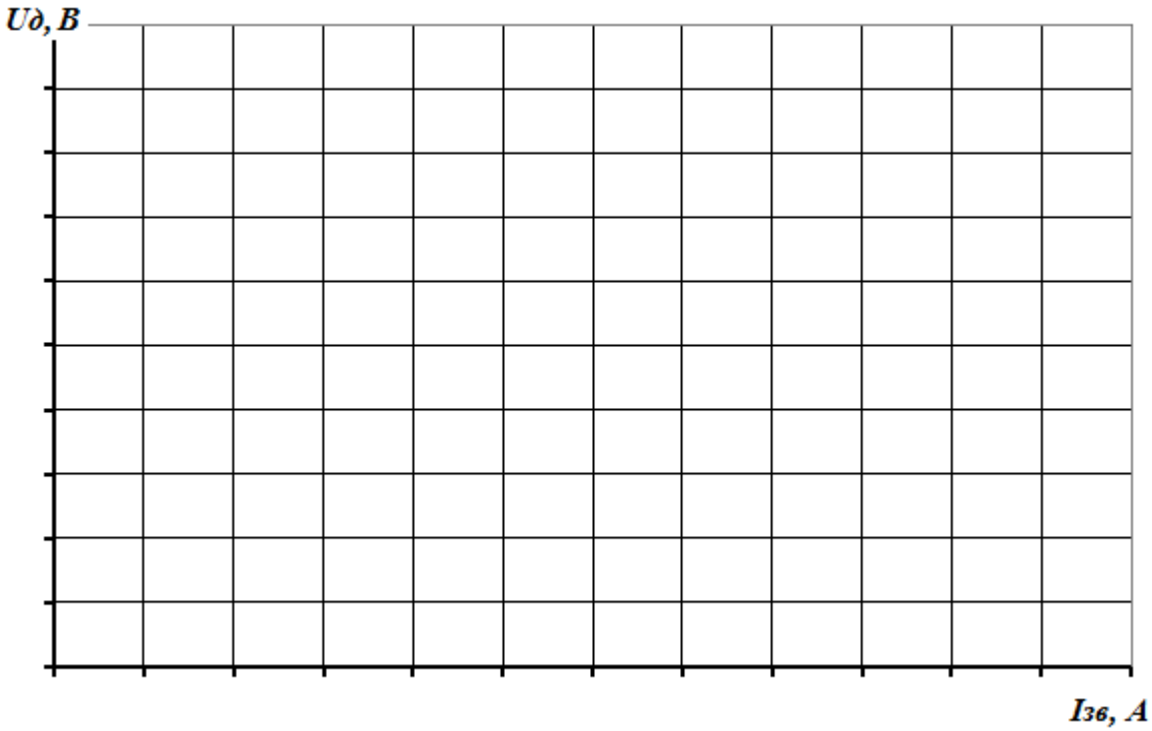
- (катод) + (анод)	+ (анод) - (катод)
графітовий електрод / графітова пластина **пряма полярність**	графітовий електрод / графітова пластина **зворотна полярність**
- (катод) + (анод)	+ (анод) - (катод)
графітовий електрод / сталева пластина **пряма полярність**	графітовий електрод / сталева пластина **зворотна полярність**



Експериментальний графік залежності напруги від довжини дуги.



Експериментальний графік залежності зварювального струму від довжини дуги.



Експериментальний графік залежності напруги на дузі від зварювального струму.

Висновки:

Лабораторна робота № 2

ІОНІЗУЮЧА ДІЯ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОДНОГО ПОКРИТТЯ

Мета роботи (заповнюється самостійно до л/р**):**

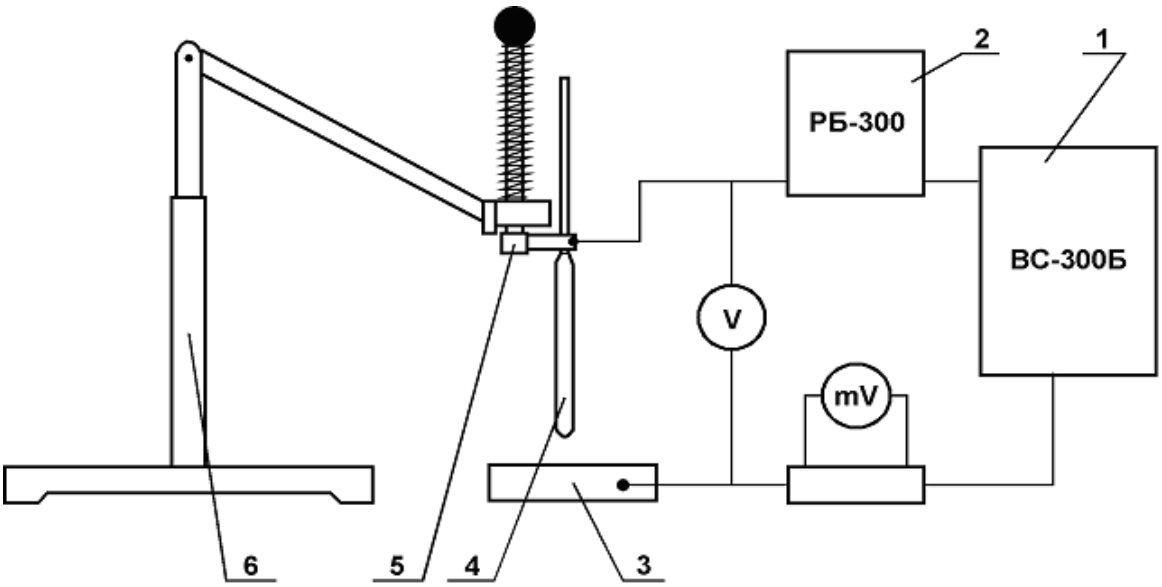


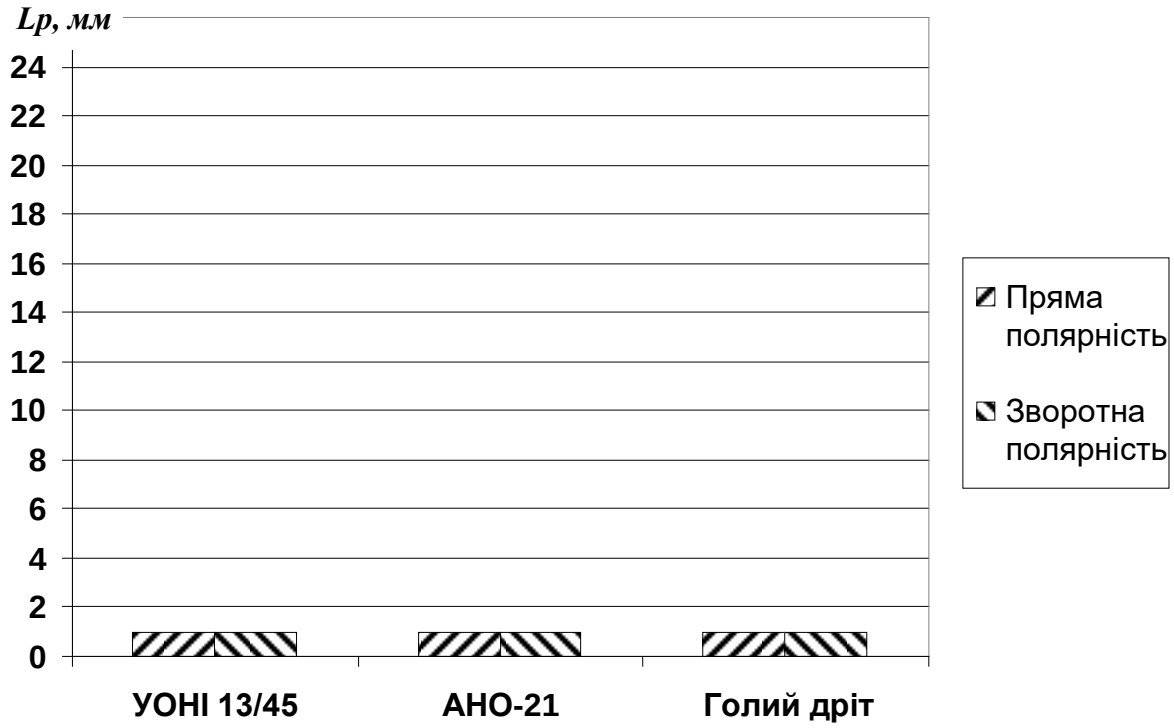
Схема експериментальної установки:
1 – джерело живлення; 2 – баластний реостат; 3 – сталева пластина; 4 – покритий електрод, що досліджується або металевий дріт; 5 – пружинний механізм підпалу електрода; 6 – штатив.

Таблиця 2 **Результати розрахунків та експериментальні дані по визначенню розривної довжини дуги**

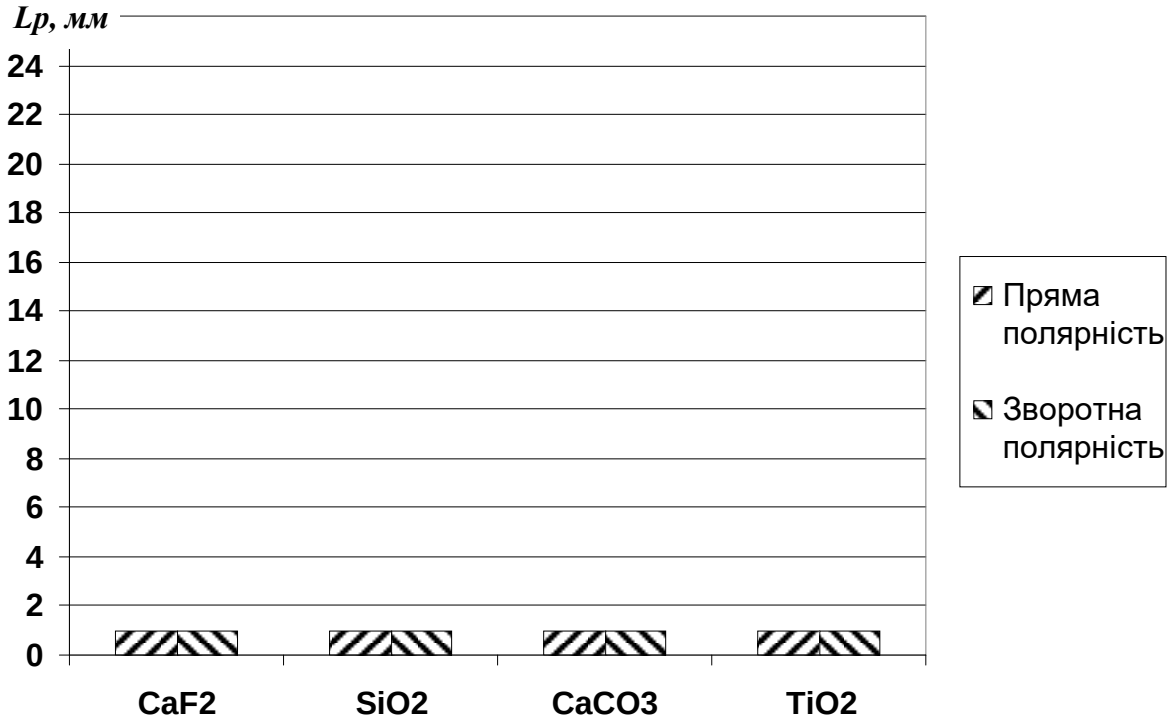
Тип електроду	Полярність	Розривна довжина зварювальної дуги, мм			
		$L_{р1}$	$L_{р2}$	$L_{р3}$	$L_{р}$
УОНІ - 13/45	пряма				
	зворотна				
АНО - 21	пряма				
	зворотна				
Голий дріт без покриття	пряма				
	зворотна				

Продовження Табл. 2

Ком-понент електрод-ного по-криття	Розрахункові значення параметрів суміші плазмоутворюючих газів			Полярність	Розривна довжина зварювальної дуги, мм			
	T, К	U_0, еВ	x		L_{p1}	L_{p2}	L_{p3}	L_p
CaF_2				пряма				
				зворотна				
SiO_2				пряма				
				зворотна				
$CaCO_3$				пряма				
				зворотна				
TiO_2				пряма				
				зворотна				



Гістограма впливу типу електродного покриття на розривну довжину дуги.



Гістограма впливу окремих компонентів електродного покриття на розривну довжину дуги.

Висновки:

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи (заповнюється самостійно до л/р):

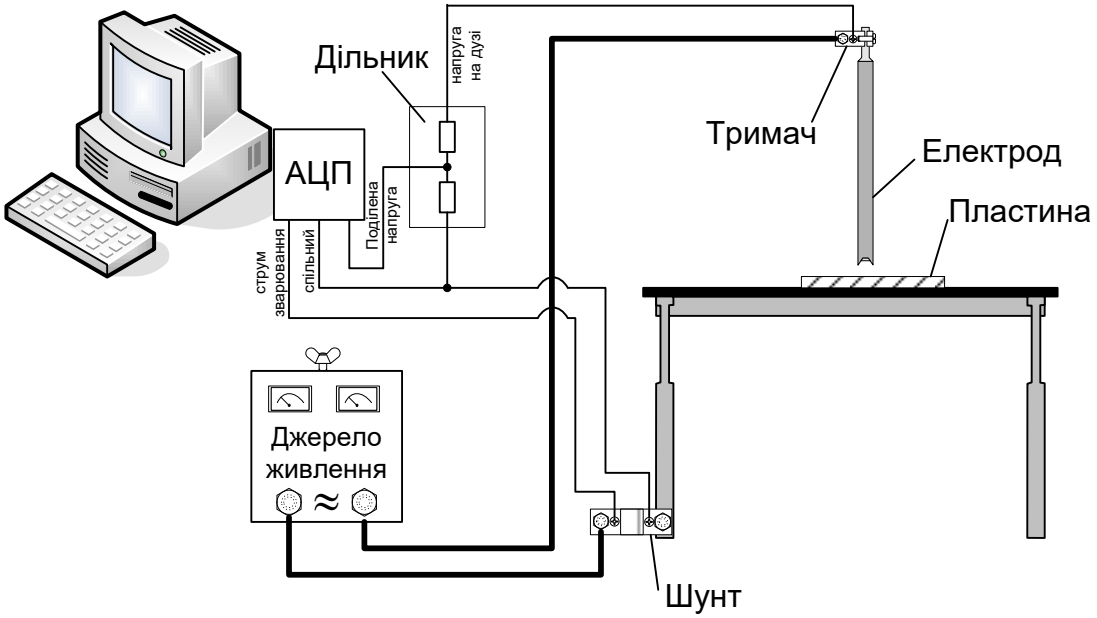
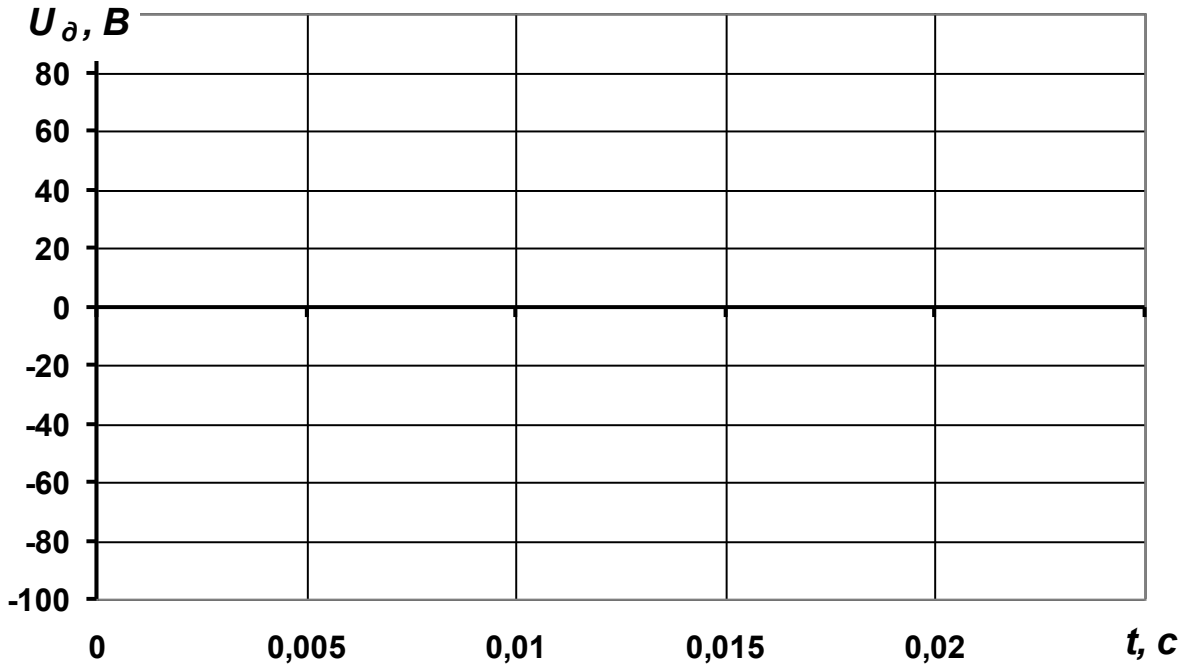


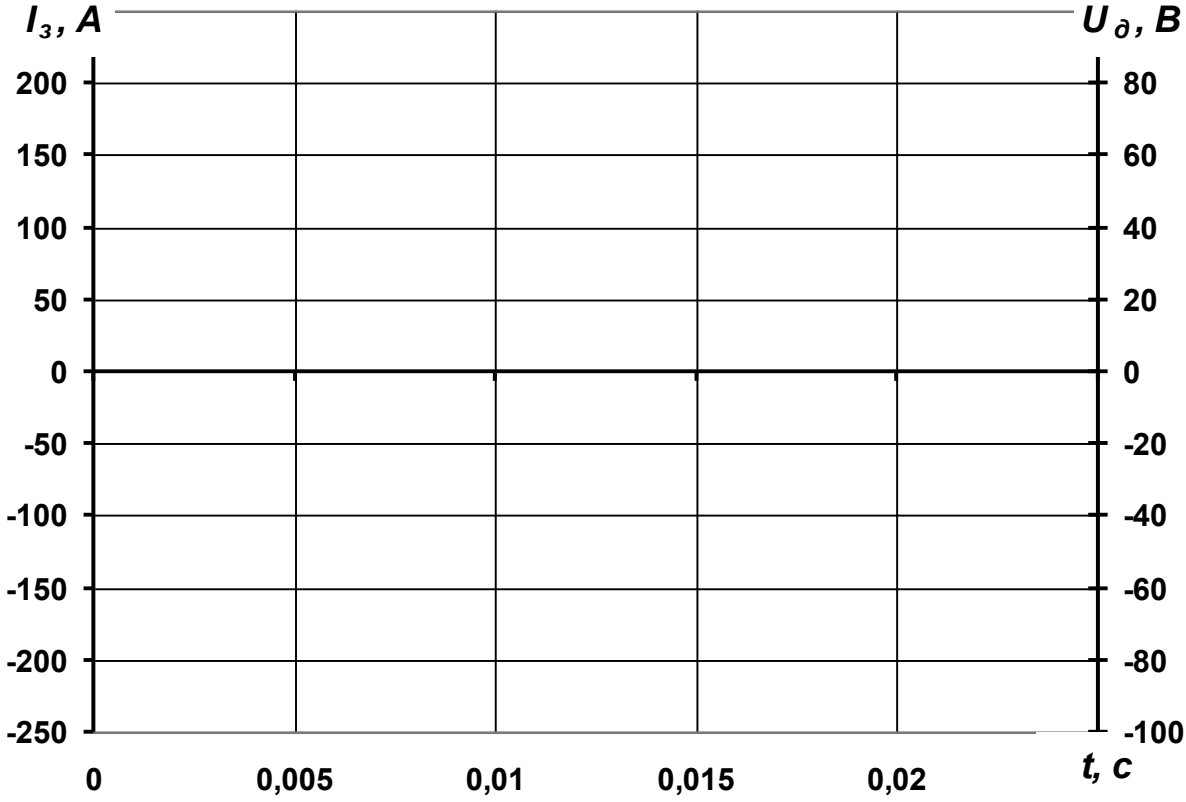
Схема експериментальної установки для дослідження зварювальної дуги змінного струму

Таблиця 3. **Характеристики осцилограм, енергетичних параметрів дугового розряду**

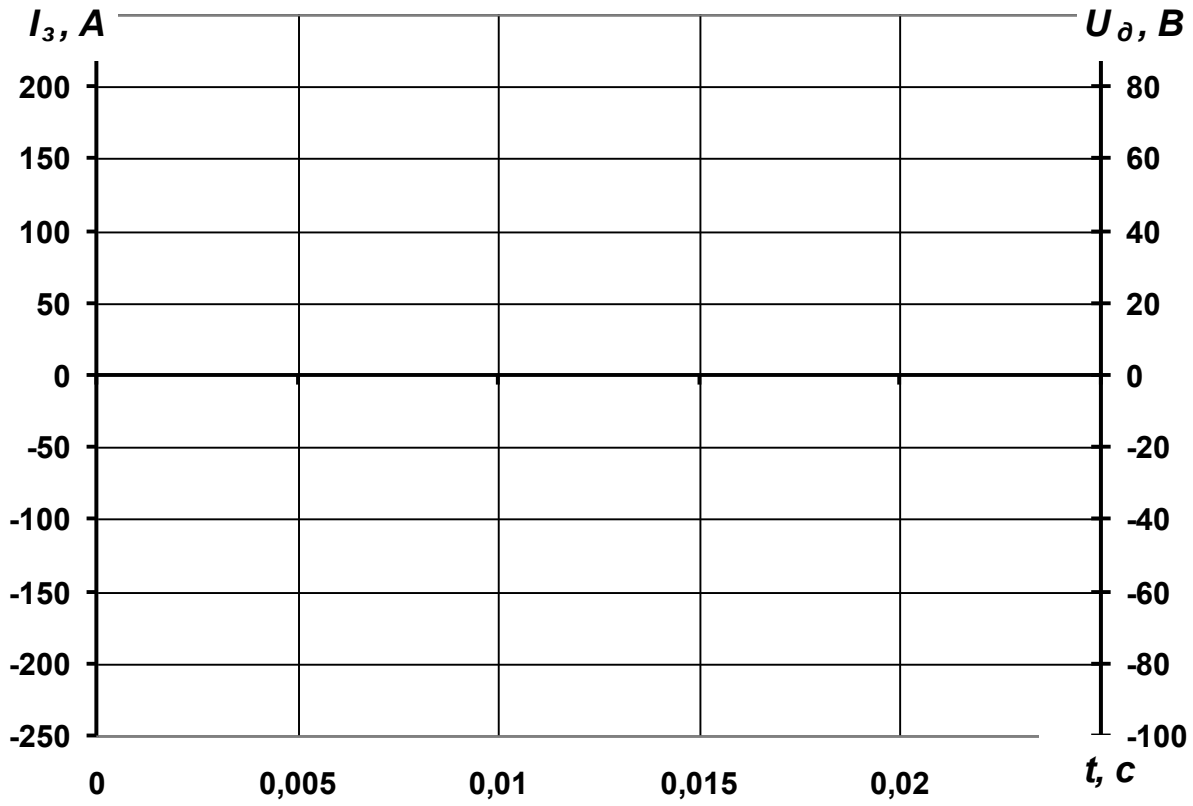
Електроди	Прямий полуперіод		Зворотн. полуперіод		Асиметричність	
	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$I_{зв}$, А	$U_д$, В	$\Delta I_{зв}$, А	$\Delta U_д$, В
графіт – графіт						
графіт – сталь						
АНО-21 – стальна пластина						



Осцилограма холостого ходу джерела живлення зварювальної дуги змінного струму



Осцилограма падіння напруги на зварювальній дузі та сили зварювального струму для електродів графіт – графіт



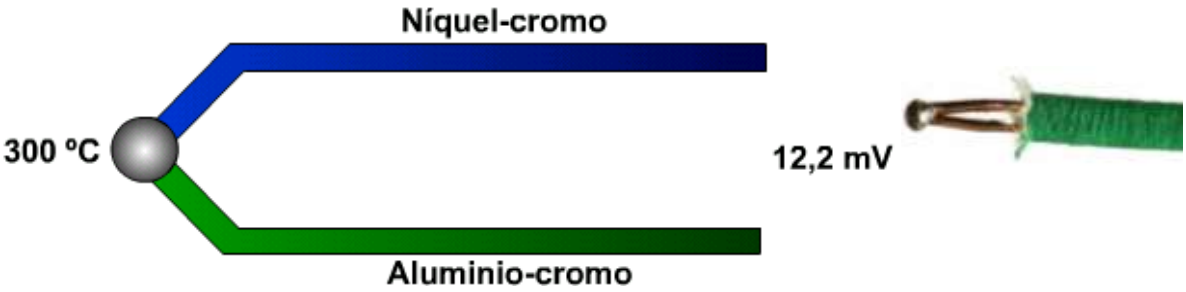
Осцилограма падіння напруги на зварювальній дузі та сили зварювального струму для електродів графіт – сталь

Висновки:

Лабораторна робота № 4

НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ШТУЧНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Мета роботи (заповнюється самостійно до л/р**):**



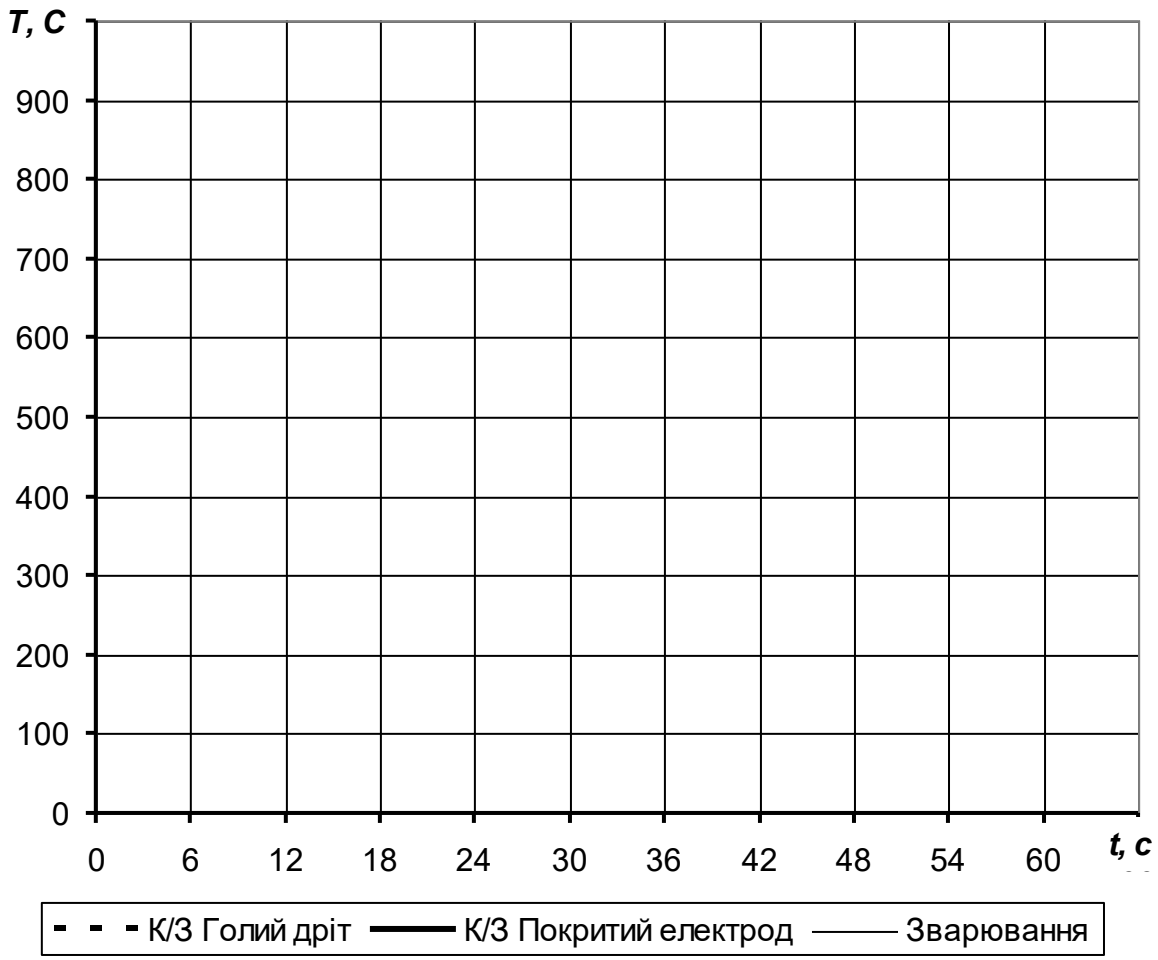
Термоелектричний перетворювач температури (термопара)

Таблиця 4.1. **Характеристики плавлення ділянок електроду**

№ ділянки електрода	t_p, *с*	*W*, *см/с*	g_n, *г/с*	α_p, $г \cdot А^{-1} \cdot год^{-1}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Таблиця 4.2. **Експериментальні дані по нагріванню струмом електродів при короткому замиканні та зварювальному процесах**

Час, с	К/З голий дріт		К/З покритий електрод		Зварювання		
	T, °C	$I_{кз}$, *A*	*T*, °C	$I_{кз}$, A	*T*, °C	$I_{зв}$, A	$U_д$, B
0							
3							
6							
9							
12							
15							
18							
21							
24							
27							
30							
33							
36							
39							
42							
45							
48							
51							
54							
57							
60							
63							
66							
69							



Термічні цикли нагрівання струмом покритого електроду та дроту без обмазки при короткому замиканні та під час наплавки

Висновки:

Лабораторна робота № 5
ПЕРЕНОС ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ У ЗВАРЮВАЛЬНІЙ ДУЗІ

Мета роботи (заповнюється самостійно до л/р):

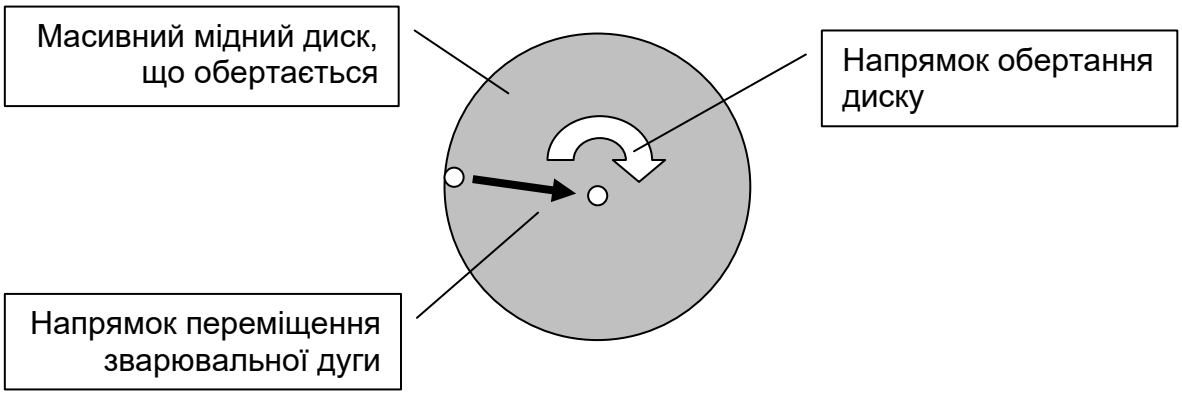
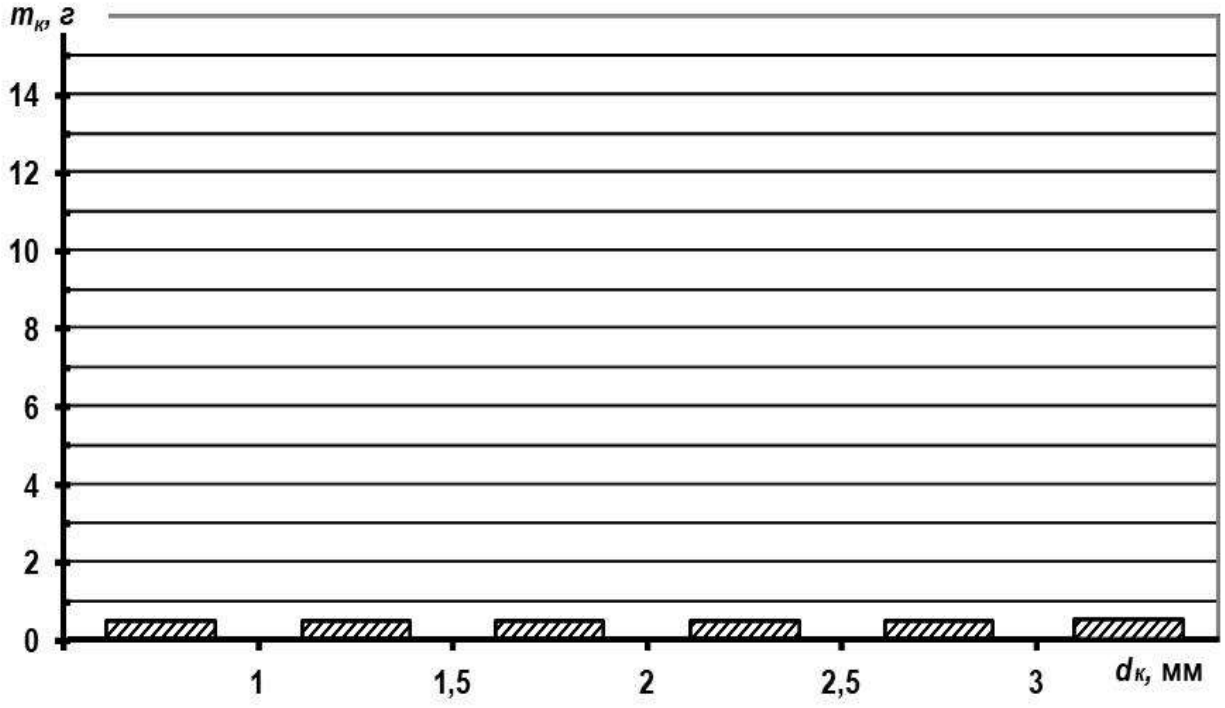


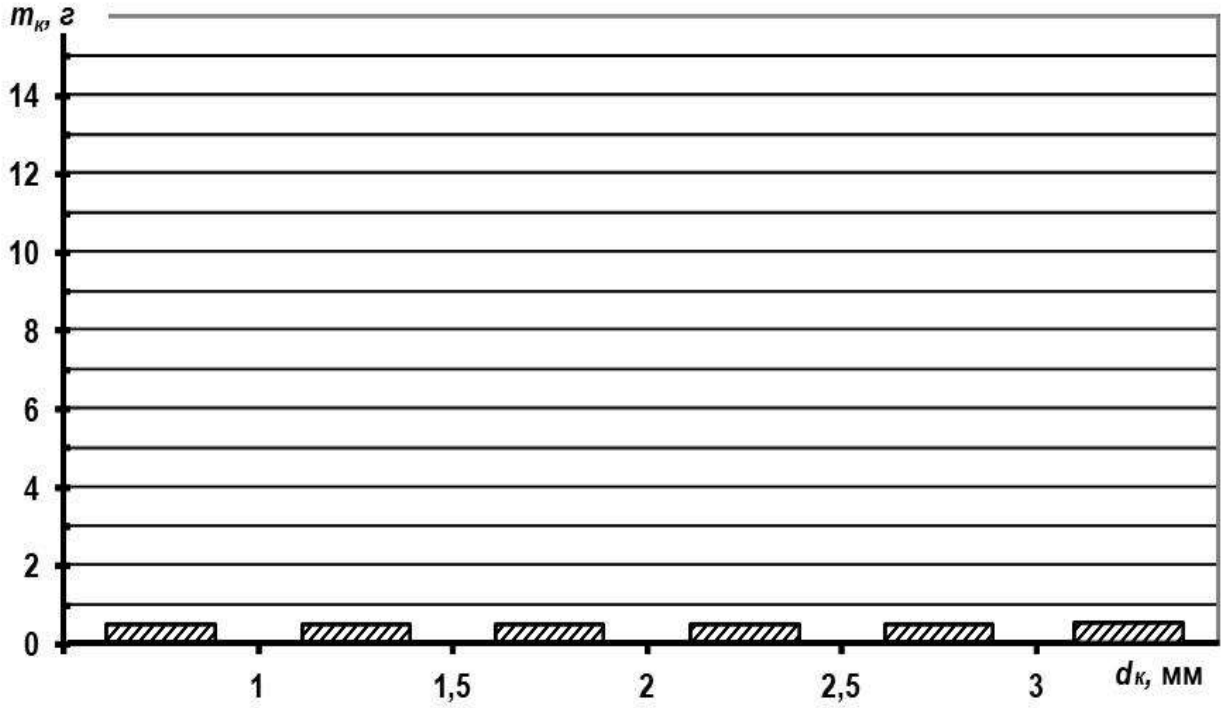
Схема наплавки на масивний мідний диск, що обертається

Таблиця 5. **Результати розрахунків та експериментальні дані по фракційному складу крапель електродного металу**

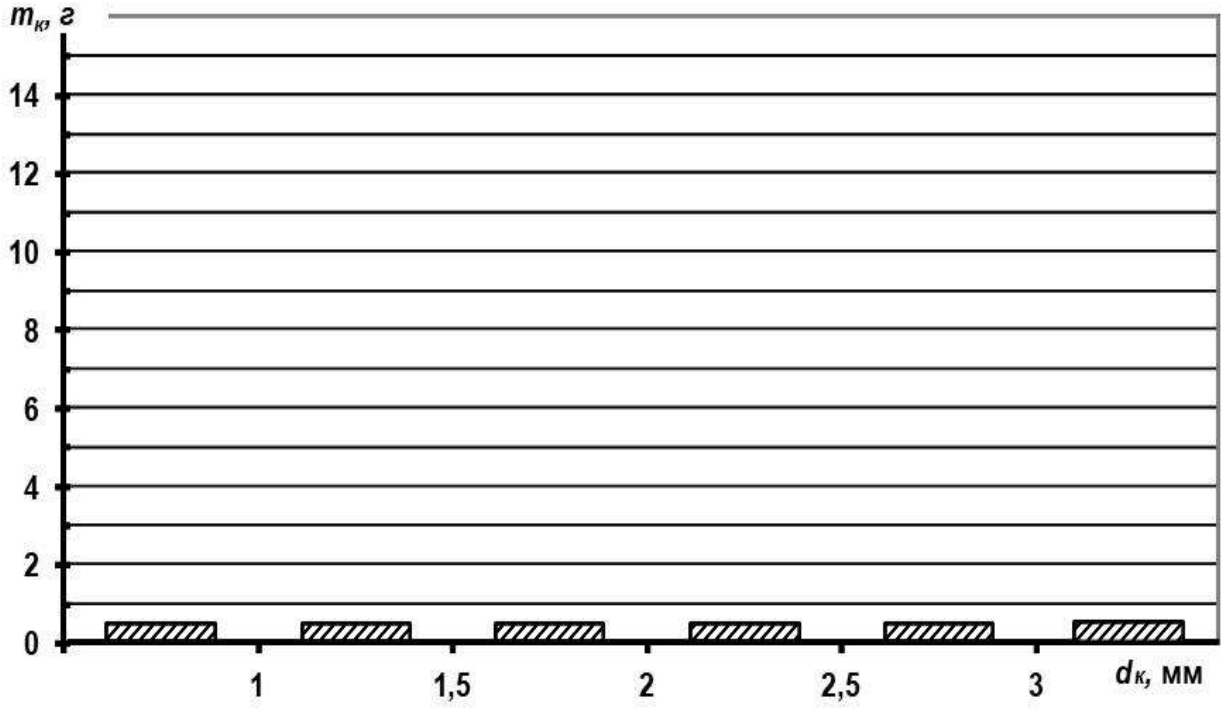
Результати експериментів		Зворотна полярність		
		АНО-21	УОНІ-13/45	Голий дріт
$I_{зв}$, А				
$U_д$, В				
Маси, г	m_1			
	m_2			
	m_3			
	m_4			
	m_5			
	m_6			
	$m_{ел}$			
	$m_{зал}$			
$d_к$, мм				
$k_у$, %				
$k_п$, %				



Гістограма фракційного складу крапель електродного металу (АНО-21)



Гістограма фракційного складу крапель електродного металу (УОНІ 13/45)

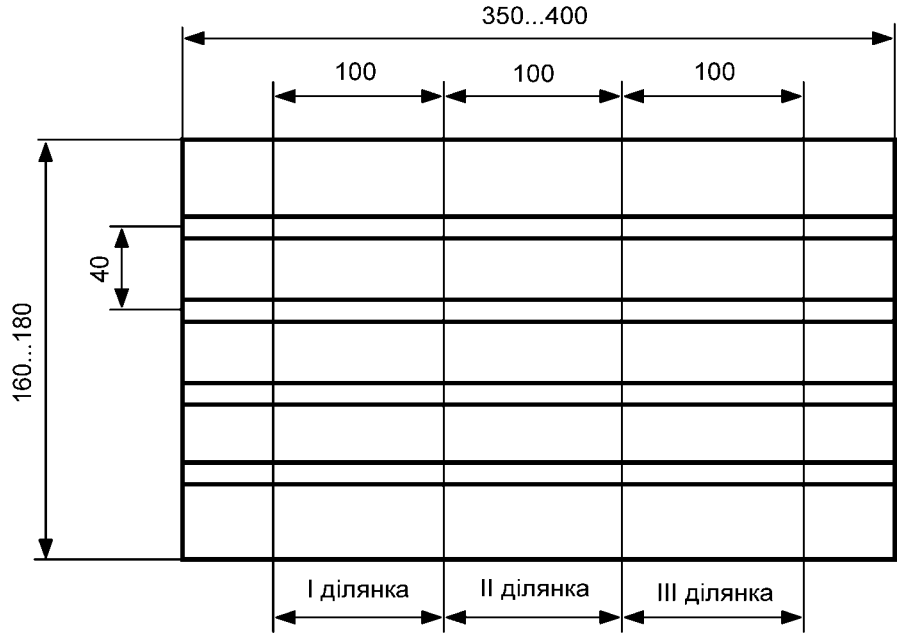


Гістограма фракційного складу крапель електродного металу (голий дріт)

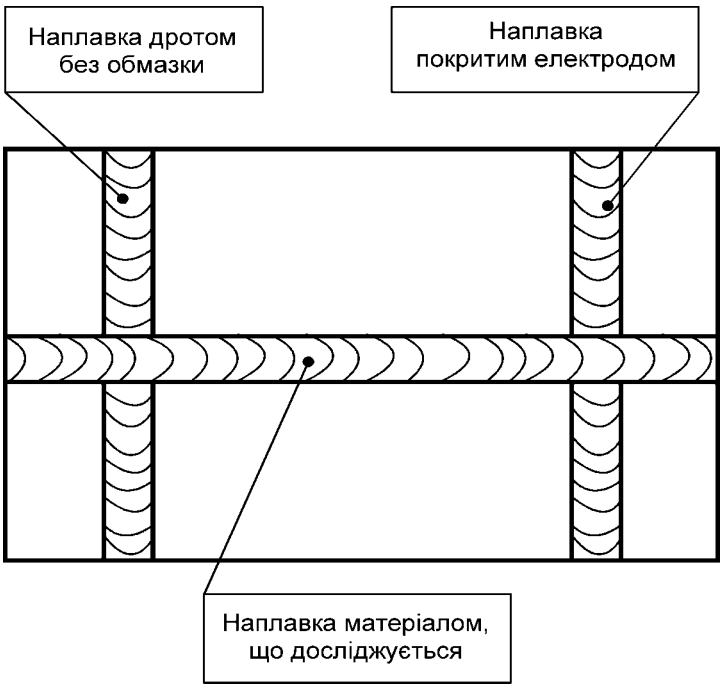
Висновки:

Лабораторна робота № 6
ПОРИ В ЗВАРНИХ ШВАХ

Мета роботи (заповнюється самостійно до л/р**):**



Зразок для випробувань за методикою Любавського



Зразок з наплавками, що імітують прихватки

Ескіз ділянок шва з отриманими порами

Висновки: