

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсового проекту
з дисципліни «Спеціальні методи зварювання тиском»
для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітньої програми
«Технології та устаткування зварювання»
всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Спеціальні методи зварювання тиском» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» всіх форм навчання. / Укл.: Р.А. Куликовський, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 46 с.

Укладачі: Р.А. Куликовський, канд. техн. наук., доцент
О.Є. Капустян, ст. викл.

Рецензент: М.Ю. Осіпов, канд. техн. наук, доцент

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск: Р.А. Куликовський

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 4 від 25.10.2018

Рекомендовано до видання
НМК ІФФ
Протокол № 3 від 20.11.2018

ЗМІСТ

1 МЕТА І ЗАДАЧІ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	4
2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ	4
3 ОРГАНІЗАЦІЙНІ ВКАЗІВКИ	5
4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	6
4.1 Вимоги до обсягу, порядку викладення та змісту ПЗ	6
4.2 Обсяг та зміст графічної частини курсового проекту	7
4.3 Вимоги та пояснення до оформлення структурних елементів.....	8
4.3.1 Вступ	9
4.3.2 Суть курсового проекту	9
4.3.2.1 Технологічні розробки	9
4.3.2.2 Розрахунково-конструкторські розробки	17
4.3.3 Охорона праці	35
4.3.4 Висновки	36
4.4 Додатки	36
5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ І ЗАХИСТУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	36
5.1 Вимоги до оформлення курсового проекту	36
5.2 Захист проекту	37
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	38
Додаток А Приклад розрахунку вакуумної системи	39
Додаток Б Приклад розрахунку несучої рами установки для дифузійного зварювання	44

1 МЕТА І ЗАДАЧІ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсове проектування є заключним етапом вивчення студентами дисципліни «Спеціальні методи зварювання тиском».

Метою курсового проектування є вивчення теоретичних основ утворення з'єднань спеціальними методами зварювання тиском та здобуття практичних навичок у розробці технологічних процесів зварювання різних металів та сплавів, методів розрахунків, проектування, а також експлуатації обладнання для зварювання тиском.

В процесі курсового проектування студент засвоює методи вирішення інженерних завдань, формує навички дослідника, конструктора та технолога. Навчається працювати з ГОСТами, ДСТУ, науково-технічною, довідковою та патентною літературою, розробляти технології зварювання певного виробу, здійснювати необхідні розрахунки, конструювати нові й використовувати уніфіковані вузли, враховуючи вимоги техніки безпеки.

Придбаний студентом досвід є основою для дипломного проектування та технологічної й конструкторської праці майбутнього інженера.

2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ

Кожний студент виконує курсовий проект у відповідності з індивідуальним завданням. У якості вхідних даних студент одержує відомості про зварюваний виріб (матеріал, ескізні розміри). Вихідні дані для проектно-конструкторських розробок. За узгодженням з викладачем, курсовий проект може виконуватися за науково-дослідною, конструкторською або організаційно-економічною тематикою.

3 ОРГАНІЗАЦІЙНІ ВКАЗІВКИ

Курсовий проект виконується і захищається у II семестрі поетапно та в строки, які означені у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - Графік курсового проектування

№	Перелік основних робіт	Термін, тиждень	Форма звітності
1	Ознайомлення з темою проекту. Опрацювання зварювального виробу. Розробка технічних умов на виготовлення виробу. Розробка технології підготовки деталей під зварювання. Розробка технології складання та зварювання виробу. Визначення режимів зварювання.	3	Вступ. Складальне креслення виробу. Технічні умови на виготовлення. Характеристика виробу. Режими зварювання.
2	Розробка циклограми процесу. Контроль якості зварювання. Ескізні варіанти робочої камери зварювальної установки для дифузійного зварювання.	6	Циклограма зварювання. Ескізні варіанти компоновок вакуумної камери та їх обґрунтування.
3	Розробка та розрахунок та проектування вакуумної системи. Розрахунок несучої рами зварювальної установки	10	Перевірені керівником розрахунки. Креслення вакуумної камери. Креслення схеми вакуумної установки
4	Застосовуване стандартне обладнання та його технічні характеристики. Техніка безпеки. Висновки. Складання специфікацій. Оформлення розрахунково-пояснювальної записки.	12	Підписання керівником специфікації, складальних креслень, циклограми, схеми вакуумної установки. Розрахунково-пояснювальна записка

4 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект складається з пояснювальної записки (ПЗ) і графічної частини.

4.1 Вимоги до обсягу, порядку викладення та змісту ПЗ

ПЗ повинна містити 30...50 аркушів односортного паперу формату А4 (297 x 210).

Зміст тексту повинен бути коротким, вичерпно зрозумілим, літературно вірним. Не повинно бути масове переписування змісту книг, стандартів, заводських матеріалів, плагіату та повторів.

ПЗ умовно поділяють на: вступну частину, основну частину та додатки. Структурну схему пояснювальної записки наведено на рис. 4.1.

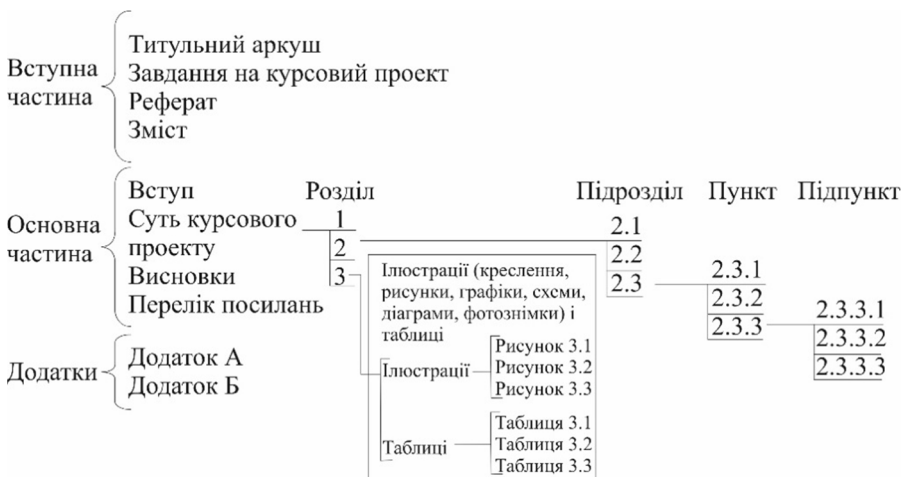


Рисунок 4.1 – Структурна схема пояснювальної записки

Суть ПЗ курсового проекту складається з наступних частин та структурних розділів:

Технологічні розробки:

- характеристика зварюваного виробу;
- характеристика зварюваного матеріалу та його здатність до зварювання;
- аналітичний огляд літературних і патентних джерел за темою завдання;

- розробка технологічного процесу складання та зварювання виробу (підготовка деталей для зварювання; розрахунок або вибір параметрів режиму зварювання; техніка та технологія складання-зварювання; циклограма процесу; контроль якості зварних з'єднань);

- нормування технологічного процесу.

Розрахунково-конструкторські розробки:

- проектування робочої камери зварювальної установки для дифузійного зварювання;
- розрахунок та проектування вакуумної системи;
- розрахунок несучої рами зварювальної установки;
- застосовуване стандартне обладнання та його технічні характеристики.

Техніка безпеки.

4.2 Обсяг та зміст графічної частини курсового проекту

Обсяг графічного матеріалу 4 листа формату А2, виконаних олівцем на аркушах для креслення. Дозволяється використання графічних програм при проектуванні курсового проекту. Графічна частина проекту повинна містити наступні креслення: складальне креслення виробу (зварюваного вузла); схема вакуумної системи; складальне креслення вакуумної камери; циклограма процесу зварювання.

На кресленнях повинні бути технічні вимоги та характеристики об'єкта (вузла).

Складальне креслення вакуумної камери зварювальної установки дає відомості про конструкцію, взаємодію складників,

взаємне розташування елементів конструкції, розташування зварюваних деталей та їх фіксації в процесі зварювання.

На складальних кресленнях вказують:

- розміри, граничні відхилення та інші параметри й вимоги, які повинні бути виконані або проконтрольовані за даним кресленням;
- номери позицій складових частин, які входять до виробу;
- габаритні розміри виробу;
- встановлювальні, приєднувальні та інші довідкові розміри;
- вказівки про характер сполучення та методах його здійснення;
- технічні вимоги та технічна характеристика виробу.

У відповідності з ГОСТ 2.106-96 на кожен складальну одиницю, комплект або комплекс приводиться специфікація.

Циклограма процесу дифузійного зварювання будується в прямокутних координатах. По осі абсцис відкладається час, який витрачається від початку створення вакууму в робочій камері до її розгерметизації після охолодження в ній готового виробу. По осі ординат відкладаються значення основних параметрів дифузійного зварювання (тиск, температура, ступінь вакууму).

4.3 Вимоги та пояснення до оформлення структурних елементів

Реферат призначений для ознайомлення з курсовим проектом. Він має бути стислим та інформативним. Реферат розташовується безпосередньо за завданням на курсовий проект починаючи з нової сторінки.

Реферат повинен містити: відомості про обсяг курсового проекту, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків, кількість джерел згідно з переліком посилань; текст реферату; перелік ключових слів.

Текст реферату повинен відбивати подану у курсовому проекті інформацію і, як правило, у такій послідовності: об'єкт розробки (технологія складання-зварювання...); мета роботи; методи виконання проекту; результати виконання проекту; основні конструктивні, технологічні й техніко-експлуатаційні характеристики та показники.

Ключові слова, які є визначальними для розкриття суті курсового проекту, вміщують після тексту реферату.

4.3.1 Вступ

У вступі коротко розкривається економічна та практична значущість питань, які розглядаються в курсовому проекті. Надається проблема, до якої відноситься тема проекту (коротко викладається сутність питання, надається оцінка сучасного стану теорії та практики). Відмічаються подібні практично розв'язані задачі, провідні фірми та провідні вчені і фахівці даної галузі. Вказуються актуальність та мета курсового проекту.

Вступ розташовують на окремій сторінці.

4.3.2 Суть курсового проекту

Суть курсового проекту – це викладення відомостей про об'єкт розроблення (технологія зварювання), котрі є необхідними й достатніми для розкриття сутності та змісту даного проекту (опис технологічних та розрахунково-конструкторських розробок).

Суть курсового проекту викладають, поділяючи матеріал на розділи. Розділи можуть поділятися на пункти або на підрозділи і пункти. Пункти, якщо це необхідно, поділяють на підпункти. Кожен пункт і підпункт повинен містити закінчену інформацію.

Текст суті курсового проекту може поділятися тільки на пункти.

4.3.2.1 Технологічні розробки

Характеристика зварюваного виробу. Отримавши завдання на розробку технологічного процесу зварювання виробу студент повинен надати у ПЗ опис виробу в наступній послідовності:

- призначення та умови експлуатації;
- ескіз та опис конструкції;
- визначення типу зварного з'єднання;
- технічні умови (ТУ) на виготовлення виробу.

При складанні ТУ вказуються вимоги щодо точності підготовки та складання зварюваних заготовок, величини зазорів, допустимих відхилень, до точності та якості зварювання, припустимості дефектів, засобів їх усунення, допустимим відхиленнями від заданих розмірів зварного з'єднання; до характеристик міцності та експлуатації зварного з'єднання; до методів контролю якості.

Характеристика матеріалів, з яких виготовляється виріб та оцінка їх зварюваності. У підрозділі надається необхідна критична оцінка відповідності матеріала призначенню виробу та умовам його роботи. За наявності обґрунтувань, підтверджених розрахунками, тощо, надається власний варіант матеріалу виробу.

Вказуються хімічний склад, фізичні та механічні властивості зварюваних матеріалів, які впливають на вибір або розрахунок параметрів режиму зварювання.

Надається характеристика зварюваності матеріалів певним способом зварювання. Вказуються складнощі, які можуть виникати в процесі з'єднання та способи їх подолання.

Студент повинен вказати, які ставляться вимоги: до матеріалу, з якого виробляється виріб, із зазначенням вимог по хімічному складу, необхідній термічній обробці, підготовці поверхонь зварюваного виробу; до зварювальних матеріалів (за наявності) із зазначенням марки, хімічного складу, тощо.

Аналіз літературних та патентних джерел. Студент, з урахуванням способу зварювання, матеріалу виробу та його характеристик, повинен у вигляді стислого реферату провести літературний аналіз та патентний пошук для знаходження аналогів й прототипів відомих технологічних та конструкторських рішень, дати їм критичну оцінку та сформулювати раціональне удосконалене рішення власної технічної розробки.

Розробка технологічного процесу складання та зварювання виробу. В технології дифузійного зварювання виділяють наступні основні етапи, які визначають кінцевий результат:

а) технологія підготовки з'єднуваних поверхонь під зварювання, яка полягає в забезпеченні необхідного рельєфу, очищенні, знежиренні й ретельної підгонки зварюваних поверхонь;

б) технологічний цикл отримання дифузійного з'єднання, коли одночасно по всій контактній поверхні в умовах загального тривалого

нагрівання і рівномірного стиснення заготовок формується монолітне з'єднання;

в) цикл охолодження отриманого з'єднання після зварювання.

г) контроль якості отриманих зварних з'єднань.

На кожному технологічному етапі дифузійного зварювання існує кілька параметрів, які визначають якість зварного з'єднання, їх називають основними параметрами. У табл. 4.1 представлені основні параметри, характерні для процесу підготовки і виконання дифузійного зварного з'єднання. З шести параметрів, виділяють чотири основні: температура зварювання, тиск, час і склад зварювального середовища. У той же час, їх недостатньо для відтворення за рекомендованою технологією. Наприклад, при тривалому зберіганні ретельно зачищених деталей їх стан суттєво змінюється, і вони стають непридатними для зварювання. На етапі охолодження деталей ступінчасте зниження температури може забезпечити усереднену швидкість охолодження. При тривалій витримці відбувається зміна структури металу в зоні нагріву, тому надмірний тепловий вплив також може призводити до погіршення якості зварних з'єднань.

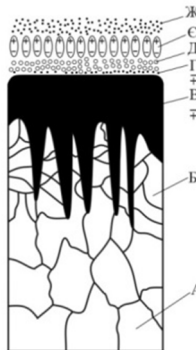
Рельєф поверхні. Однією з умов отримання з'єднання способом дифузійного зварювання є забезпечення необхідної мікрогеометрії (шорсткості) з'єднуваних поверхонь. Шорсткість залежить від властивостей матеріалу та способу обробки.

Оскільки величина пластичної деформації металу в зоні зварювання мала, потрібно, щоб поверхні деталей мали хороший контакт та малу шорсткість. При зварюванні деталей з пластичних матеріалів не потрібна особлива обробка поверхні; при зварюванні деталей з порівняно твердих матеріалів (жароміцні сплави, інструментальні сплави і ін.) їх поверхні повинні мати шорсткість на рівні 6...8-го класів чистоти.

Спосіб очищення поверхні перед зварюванням. Безпосередньо після обробки металу різанням поверхня залишається ювенільною, тобто абсолютно чистою, лише малі частки секунди. Реальні поверхні металів і сплавів покриті шарами пилу, жирових забруднень, води, плівками оксидів та адсорбованих газів (рис. 4.2).

Таблиця 4.1 - Технологічні параметри дифузійного зварювання

Параметр	Спосіб забезпечення необхідного значення параметра	Можливі дефекти
Чистота поверхні	Механічне очищення, знежирення, травлення	Непровари
Шорсткість, хвилястість, зазори	Точіння, шліфування, полірування, підгонка поверхонь, що зварюються	Непровари
Склад зварювального середовища	Забезпечення герметичності камери	Окислення поверхні, непровари
Термічний цикл зварювання	Регулювання джерела нагріву	Непровари, зміна структури зони зварювання, оплавлення, залишкові напруги
Тиск стиснення при зварюванні	Регулювання джерела нагріву	Непровари, надлишкова деформація, залишкові напруги
Тривалість зварювання	Регулювання термічного циклу зварювання	Непровари, утворення нових фаз, зміна структури зони зварювання



А - пластично недеформований шар металу; Б - поверхневий шар повністю дезорієнтованих кристалів з прошарками оксидів; В - оксидний шар (характерна полярність границь (внутрішніх і зовнішніх), а також полярність верхніх шарів показані знаками плюс і мінус); Г - адсорбований шар кисневих іонів й нейтральних молекул повітря; Д - шар водяних молекул; Е - шар жирових молекул;

Ж - іонізовані пилові частинки

Рисунок 4.2 - Поверхня металів на повітрі.

В ході обробки, поверхневі шари металу переходять в активований, наклепаний стан. Ступінь наклепу досягає 110...170 %, а товщина наклепаного шару складає 3...7 мкм при притирання пастами, 16...35 мкм при шліфуванні, 30...50 мкм при точінні, 40...100 мкм при фрезеруванні. Структура шарів подрібнюється, з'являються залишкові напруження. Метал окислюється, але швидкість росту оксидних плівок залежить від їх будови. Пухкі пористі оксидні шари ростуть швидко, в той час, як атоми кисню легко проникають крізь оксиди до чистого металу. На поверхні металів, які мають оксиди з щільно упакованою структурою, утворюється тонка, прозора плівка товщиною менше 0,03 мкм, яка не пропускає атоми кисню і тим самим захищає метал від подальшого окислення.

Процеси дифузії й самодифузії атомів на поверхні та в приповерхневих з'єднаних шарах, є визначальними при дифузійному зварюванні. Поверхнева дифузія відбувається шляхом перескоку атому з одного положення на поверхні металу в інше; при цьому атом, який дифундує, повинен відірватися від поверхні металу, а потім як би конденсуватися на ній в новому положенні.

Швидкість дифузії швидко збільшується зі зменшенням енергії активації, яка, в свою чергу, вище в обсязі кристала, ніж на його поверхні.

Дифузія в приповерхневому шарі може йти як по зерну, так і по границях зерен. Її швидкість безпосередньо залежить від структури шару зварюваного матеріалу і таким чином пов'язана зі способом обробки поверхні.

Зруйнувати, зменшити або видалити адсорбовані поверхневі шари зі з'єднаних поверхонь можна різними методами.

Промивання зварюваних поверхонь бензином дозволяє зменшити шар жиривих забруднень до 1...5 мкм. Ретельна промивка поверхні розчинником зменшує товщину жиривої плівки до 10...100 молекул.

Міцність зчеплення жиривих молекул з металом обумовлена їх поляризацією та утворенням подвійного електричного шару, тому повністю видалити мастильні покриття з металу розчинниками практично неможливо.

Очищення поверхні шляхом хімічного травлення забезпечує видалення поверхневого шару матеріалу разом з усіма згаданими плівками. Однак така поверхня в атмосферних умовах нестійка і дуже

швидко покривається мономолекулярним шаром адсорбованого кисню. Протирання спиртом застосовується для зневоднення поверхонь.

Для знежирення поверхонь деталей, призначених для дифузійного зварювання, рекомендується використовувати розчинники, які відрізняються високою розчинюючою здатністю, малою токсичністю, негорючістю, неагресивністю до матеріалів, вибухобезпечністю, низькою вартістю.

Захисне середовище. Для захисту зварюваних поверхонь металу від окислення та насичення азотом й воднем навколишньої атмосфери в процесі нагрівання та зварювання, використовують різноманітні захисні середовища. Склад захисних середовищ залежить від хімічної активності зварюваних металів й технологічності їх використання.

Вакуум - найкраще по чистоті захисне середовище. При дифузійному зварюванні у вакуумі незалежно від способу очищення з'єднаних поверхонь має місце видалення газів поверхні матеріалу. При цьому, в першу чергу, видаляються гази із зовнішніх шарів металу. Подальший процес дифузії сприяє переміщенню газу від внутрішніх шарів металу до зовнішніх й наступної дегазації. В результаті цього відбувається процес заліковування мікрощілин, що в значній мірі пояснює високу міцність і пластичність одержуваних з'єднань.

Ступінь вакууму. Ступінь розрідження (глибина вакууму) безпосередньо впливає на процеси видалення окислів із зони контакту. В умовах глибокого вакууму можливі чотири механізми видалення окислів:

- сублимація окислів - безпосередній перехід речовини при нагріванні з твердого в газоподібний стан, минаючи рідку фазу;
- видалення окислів за рахунок їх термічної дисоціації;
- руйнування окислів за рахунок дифузії кисню в метал (іонів металу в оксид);
- руйнування окислів елементами розкислювачами, які знаходяться в сплаві та дифундують при нагріванні до межі метал-окисел.

Глибина вакууму повинна бути такою, яка цілком забезпечує чистоту з'єднаних поверхонь та гарантує створення монолітного з'єднання, рівномірного основному металу. При недостатньому

вакуумі посилюється окислення зварюваних поверхонь. Завелика глибина вакууму вимагає великих витрат виробничого часу.

Температура зварювання. Температура зварювання однорідних матеріалів повинна становити $(0,5...0,8)T_{пл}$. При такій температурі прискорюється взаємна дифузія атомів з'єднаних металів через поверхню стику й забезпечується розм'якшення металу. Це полегшує деформацію поверхневих нерівностей та їх зминання. Підвищення температури при інших рівних умовах збільшує міцність з'єднання, але до певної межі. Подальше підвищення температури знеміцнює з'єднання в результаті швидкого зростання зерен. Слід пам'ятати, що температура зварювання впливає на всі механічні характеристики зварювальних матеріалів.

Тиск стискування. Тиск повинен бути достатнім для забезпечення щільного контакту з'єднаних поверхонь, щоб в результаті деформації всі порожнечі в стику були заповнені. При деформації поверхневих шарів відбувається руйнування оксидів, що забезпечує щільний контакт очищених поверхонь. Тиск, як правило, розраховується або визначається дослідним шляхом. У більшості випадків, для різних матеріалів тиск вибирають в межах 3...50 МПа. У загальному випадку він не повинен перевищувати межу плинності зварюваних матеріалів при температурі зварювання. Підвищення тиску понад цю межу не зміцнює з'єднання, але може збільшити деформацію зварюваних деталей.

При зварюванні з високоінтенсивним силовим впливом (до декількох десятків мегапаскалів) локальна деформація металу в зоні з'єднання може досягати десятків відсотків. При зварюванні з використанням низьких питомих тисків (до десятків часток мегапаскалів) деформація з'єднаних деталей становить частки відсотка.

Час зварювання і охолодження. Зі збільшенням часу зварювання міцність зварного з'єднання зростає до межі міцності основного металу. Подальше збільшення часу зварювання на міцність зварного з'єднання практично не впливає. Однак надмірне збільшення витримки знижує міцність зварного з'єднання через зростання зерна. Аналогічним чином впливає тривалість процесу зварювання на відносне подовження і ударну в'язкість.

Час витримки при заданих температурах і тисках може варіюватися в досить широкому інтервалі від 1 хв до декількох годин. Мінімальне значення визначається повнотою процесу деформації нерівностей на стикуваних поверхнях і завершенням процесу дифузії до утворення монолітного з'єднання. У той же час, надмірно великий час витримки призводить до збільшення розмірів зерен металу в зоні зварювання та погіршує механічні властивості з'єднання.

Також на якість зварного з'єднання впливає режим охолодження зварюваних деталей. Поступове охолодження у вакуумній камері під тиском зварених деталей сприяє підвищенню міцності й пластичності з'єднаних металів і сплавів. Максимум досягається при температурі 100° С, крім того охолодження в вакуумі до даних температур запобігає окисленню деталі.

Контроль якості зварних з'єднань. При розробці контролю якості зварних з'єднань, виконаних дифузійним зварюванням, слід керуватися попередніми вимогам, які пред'являються до зварного з'єднання, а також існуючим стандартам.

Технічний контроль поділяється на вхідний, операційний та остаточний.

В проєкті слід встановити порядок проведення та обсяг вказаних етапів контролю. На основі теоретичних відомостей провести аналіз та встановити характер можливих дефектів складання та зварювання, надати аналіз причин можливого браку. Так, найбільш характерними дефектами, які виникають при дифузійному зварюванні, є непровари, тріщини, нові фази, високі залишкові напруження, велика залишкова деформація.

Слід вибрати стосовно виробу найбільш ефективний метод контролю якості. Передбачити необхідну кількість контрольних операцій, яка гарантує якість готового виробу. Вказати у відповідності до яких правил та технічних умов (нормативних документів) здійснюється контроль якості. Розробити профілактичні засоби попередження появи дефектів, а також методи виправлення можливого браку.

Нормування технологічного процесу. Технічне нормування технологічного процесу здійснюється з метою побудови циклограми процесу зварювання, а також визначення трудомісткості робіт та тривалості операцій і переходів.

Рекомендується здійснювати ретельне нормування операцій, для яких застосований операційний (повний) опис.

4.3.2.2 Розрахунково-конструкторські розробки

У даному розділі здійснюється проектування вакуумної робочої камери установки для дифузійного зварювання, приводиться склад і опис її конструктивного влаштування. Здійснюється опис окремих вузлів та елементів.

Для вибору засобів створення вакууму в робочій камері (насосів попереднього та кінцевого розрідження), комутаційної апаратури, визначення часу попереднього розрідження та часу досягнення робочого вакууму розробляється схема та здійснюється розрахунок та вакуумної системи установки для дифузійного зварювання.

Оскільки несучі рами сприймають зусилля стиснення зварюваних деталей, та є відповідальними вузлами установок для дифузійного зварювання, тому при проектуванні виконується їх розрахунок на жорсткість та міцність.

Проектування робочої камери зварювальної установки для дифузійного зварювання. Зварювальна камера (рис. 4.3) є основним робочим органом та одним з найбільш важливих і трудомістких вузлів електромеханічного комплексу установки. Корпус камери 4 з водоохолоджуваною сорочкою 3, має люк 2, який призначений для завантаження й вивантаження зварюваних виробів, закріплення нагрівальних пристроїв 6 (водоохолоджуваного індуктора, нагрівача та інших пристроїв в залежності від застосовуваного енергетичного джерела), рухомих і нерухомих уводів, датчиків вимірювання тиску, температури (термопара) 7, електричних уводів, натікачів та інш. В люку змонтовано оглядовий ілюмінатор 1. Для підключення відкачувальної системи і механізму передачі тиску стискання (проміжний шток) 5 в корпусі камери передбачаються спеціальні патрубки. Зварювані деталі розташовують на робочому столі 8 всередині камери. Всі люки корпусу забезпечені товстостінними фланцями з добре обробленими поверхнями, по яким здійснюється їх герметизація.

До камер зварювальних установок встановлюють ряд вимог:

- розміри камер повинні бути достатніми для розміщення зварюваних виробів, нагрівальних пристроїв і пристосувань;
- об'єм камер повинен бути мінімальним для скорочення часу відкачування; зручний доступ в робочу зону;
- оснащення швидкодіючими пристроями для герметизації;
- достатні механічна й термічна міцності, формостійкість і жорсткість всіх елементів камери;
- повна герметичність вакуумних систем, для цього необхідне застосування газонепроникних матеріалів, а також висока вакуумна щільність зварних і паяних швів та особливий характер рознімних з'єднань;
- ретельна обробка внутрішніх поверхонь камер;
- відповідність особливим фізичним умовам роботи, пов'язаних із застосуванням спеціальних джерел нагріву (наприклад, робота під високим електричним потенціалом або робота в магнітних полях високої частоти).

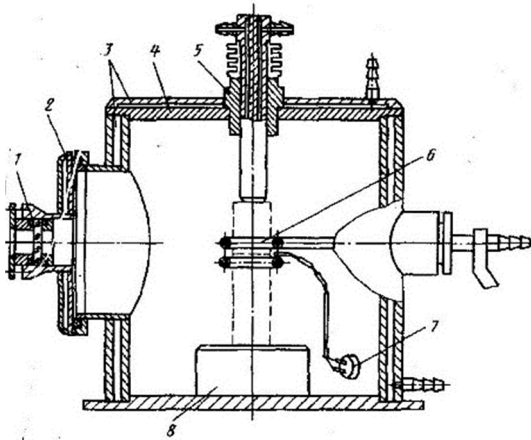


Рисунок 4.3 – Схема вакуумної камери

Оскільки робоче зусилля стиснення з'єднаних деталей сприймає несуча рама установки, корпус вакуумної камери з зовнішньої сторони знаходиться тільки під дією атмосферного тиску, тому стінки камери виконують досить тонкими (табл. 4.2). Виняток становлять спеціальні установки для дифузійного зварювання в середовищі захисних газів при надмірному тиску.

Таблиця 4.2 – Рекомендована товщина стінок вакуумних камер, мм

Діаметр циліндричної обичайки	Товщина			
	обичайки	опуклої кришки	конусної кришки	водоохолоджуваної сорочки
200	2,0	2,0	2,0	1,5
400	2,5	3,0	2,5	2,0
500	3,5	3,5	3,0	2,0
600	4,0	4,0	3,0	2,5
700	4,5	4,5	3,5	2,5
800	4,5	4,5	4,0	2,5

Вакуумні камери установок умовно розділяють на дві основні, групи: універсальні та спеціалізовані. Універсальними вважаються камери, конструкція яких дозволяє зварювати найрізноманітніші вироби в межах габаритів розглянутих камер. До спеціалізованих відносять камери, які нерозривно пов'язані з конструкцією конкретних виробів. Універсальні камери поділяють на циліндричні і прямокутні.

Камери циліндричної форми, які набули широкого поширення в вакуумній техніці, часто застосовуються і при конструюванні зварювальних дифузійних установок. Вони мають стійкість форми при впливі рівномірно розподілених навантажень і технологічні, що дозволяє виготовляти їх з суцільнотягнутих й суцільнокатаних труб з невеликою товщиною стінки. Зокрема, широко застосовують камеру, периферійна частина поперечного перерізу якої виконана у вигляді чотирьох циліндричних сегментів, що дозволяє зберігати високу стійкість і збільшувати внутрішній корисний об'єм. Камери можуть мати різні конструкції люків (кришок) (рис. 4.4) для завантаження й вивантаження деталей. Спосіб закріплення і переміщення кришок багато в чому визначає конструкцію камери і установки. За цією ознакою виділяються основні типи циліндричних камер: з кришками, які відкриваються на шарнірах (для зварювання виробів малих і середніх розмірів (рис. 4.4 а)); з кришками, які відкриваються в сторону (для зварювання великогабаритних деталей (рис. 4.4 б)); з кришками, які відкочуються уздовж осі камери (рис. 4.4 в і г). В останньому випадку візок кришки, яка відкочується, жорстко пов'язаний з візком виробу. Перевагою цієї конструкції є можливість

використання різних підйомно-транспортних пристроїв, що особливо важливо при завантаженні великогабаритних виробів.

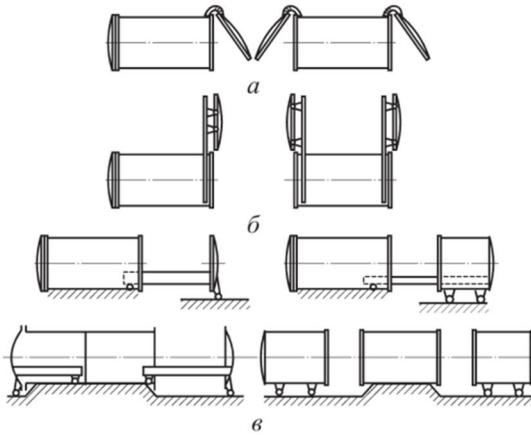


Рисунок 4.4 – Основні типи циліндричних вакуумних камер

Прямокутні камери широко використовують в конструкціях зварювальних установок, оскільки габаритні розміри основної камери можна збільшувати в потрібному напрямку приєднанням до вільних граней додаткових секцій, що дозволяє досить повно використовувати об'єм камер, застосовувати змінні вузли та механізми й відносно легко їх уніфікувати. Але трудомісткість виготовлення прямокутних камер дещо більша, ніж циліндричних. Потрібні збільшення товщини стінок та їх ребр з умов допустимих деформацій. Поширення отримали чотири типи камер прямокутної форми: каркасний; з однією кришкою; з двома бічними кришками; з двома кришками, які відкриваються на шарнірах і однією відкатною кришкою.

Камери каркасного типу мають чітко виражений каркас, одна з бічних граней якого виконується з суцільного листа і призначена для кріплення до станини установки та для підключення вакуумної системи. На інших гранях каркаса є круглі або прямокутні вікна максимально можливого розміру. Вони герметизуються знімними або відкривними кришками, форма і конструкція яких залежать від призначення установки. Ці кришки можуть мати оглядові ілюмінатори, служити базою для закріплення маніпуляторів та інших механізмів. У разі необхідності кришки можна замінювати секціями, які подовжують камеру. Камери такої конструкції в більшості

випадків кріпляться на станині консольно, що забезпечує зручний доступ до всіх граней і дозволяє при необхідності проводити модернізацію установки. Конструкції кришок каркасних камер і системи їх підвіски на каркасі досить різноманітні.

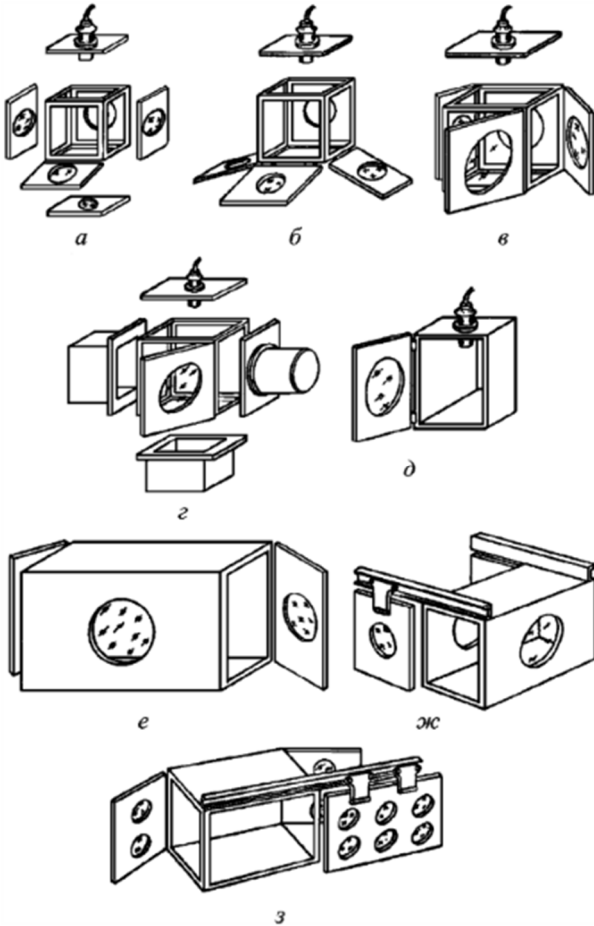


Рисунок 4.5 – Основні типи прямокутних зварювальних камер

Для малогабаритних камер з невеликою масою кришок найбільш застосовані знімні кришки (рис. 4.5 а). Основними

перевагами такої каркасної камери є простота конструкції і мінімальна кількість деталей. Але вона має і недоліки. Наприклад, зняту кришку оператор повинен тримати в руках або укласти на спеціальний стіл. Для конструкції, показаної на рис. 4.5 б, це не потрібно - кришки підвішені на простих за конструкцію шарнірах з горизонтальною віссю обертання або вертикальною віссю обертання (рис. 4.5 в). Особливістю такого шарніру є збільшений радіальний зазор між рухомими і нерухомими скобами, завдяки чому при герметизації можна зміщувати кришку паралельно грані камери, яка піддається ущільненню та відповідно рівномірно притискати ущільнювач. Варіанти можливих конструкцій каркасних камер показані на рис. 4.5 г.

Камери з однієї кришкою (рис. 4.5 д) мають суцільнозварний корпус з листової сталі та фронтальну (рідше бічну) кришку. Такі камери майже не піддаються трансформації, але вони максимально прості у виготовленні та мають мінімальну кількість роз'ємних вакуумних ущільнень. Конструкції цього типу доцільні тільки при зварюванні дрібних виробів, габаритні розміри яких дозволяють розмістити їх у зварювальній камері.

Камери з двома бічними кришками (рис. 4.5 е, ж) мають суцільнозварний корпус у вигляді горизонтально витягнутого прямокутного паралелепіпеда. При такій конструкції розміри камери можна збільшити тільки по довжині. Камери цього типу мають два різновиди, що розрізняються тільки системами підвіски кришок. В одному випадку (рис. 4.5 е) вони мають вже розглянуту систему шарнірної підвіски, в іншому (див. рис. 4.5 ж) - кришки шарнірно підвішуються на роликівих каретках, які переміщуються по горизонтальних напрямних, закріплених на корпусі камери. Вибір тієї чи іншої системи підвіски кришок визначається умовами перезавантаження камери.

Камери з двома кришками, які відкриваються на шарнірах і однією кришкою, яка відкочується є комбінацією попередньо розглянутих конструкцій (рис. 4.5 з). Конструкція і технологія виготовлення такої камери досить складні. Корпус і кришки повинні бути забезпечені потужним ребрами. Однак це тільки зменшує, але не виключає впливу деформацій корпусу і кришок камери на роботу всіх механізмів зварювальної установки.

До матеріалів, які використовуються для виготовлення вакуумних робочих камер зварювальних установок, висувають такі вимоги: висока вакуумна щільність, навіть при малих товщинах, найменше газовиділення з поверхні як при нормальній, так і при підвищеній температурах; висока технологічність, особливо зварюваність; корозійна стійкість. Крім того, при використанні індукційного і електроконтактного способів нагріву корпус камери повинен бути виготовлений з немагнітного матеріалу.

При виготовленні корпусів зварювальних камер найбільшого поширення набули вуглецеві конструкційні сталі типу стали 20 і корозійностійкі сталі типу 12X18H10T. Вуглецеві сталі, як більш дешеві та менш трудомісткі в обробці, застосовуються переважно при виготовленні камер середніх і великих габаритів. Тривала експлуатація в промислових умовах показала, що такі камери з точки зору корозійної стійкості працюють цілком задовільно. Це пояснюється тим, що в результаті конденсації пари робочих рідин дифузійних насосів, внутрішні стінки камери в процесі роботи покриваються тонкою масляною плівкою. Суттєвого впливу на час відкачування до робочого тиску $1,3 \times (10^{-2} \dots 10^{-3})$ Па ця плівка не здійснює, проте успішно оберігає внутрішню поверхню камери від корозії.

Камери установок для мікрозварювання і розмірної обробки, де вплив залишкових магнітних полів може знизити точність виконання технологічних операцій, а також камери, які промиваються після зварювання рідкими агресивними середовищами, виготовляють з корозійностійкої сталі типу 12X18H10T. Вакуумні камери виготовляють також з двошарових матеріалів, наприклад вуглецевої сталі, плакованої зсередини тонким шаром корозійностійкої сталі. При цьому досягається суттєва економія дорогої корозійностійкої сталі та висока якість внутрішньої поверхні камери.

Для ущільнення введення в камеру проміжного штоку застосовують, як правило, металеві сільфони. У якості вакуумних ущільнювачів в конструкціях зварювальних камер використовують високоеластичні пружні матеріали (вакуумну гуму, фторопласт, витон та ін.). У зварювальній техніці в якості ущільнювачів найбільш широкого поширення набули вакуумні гуми 7889 і 9024. Як правило, герметизуючі еластичні прокладки закріплюються на кришках. Для цього в кришці фрезерують паз, який за контуром повторює форму

люку (рис. 4.6). Ущільнення на рис. 4.6 а відрізняються тільки формою паза. Конструкція на рис. 4.6, б дозволяє порівняно точно встановити кришку щодо корпусу камери. На високовакуумних установках ущільнення здійснюється за допомогою прокладок з міді. Проміжні штоки системи навантаження роблять з жароміцних або корозійностійких сталей.

Для введення електричної енергії всередину вакуумної камери використовують електричні уводи. Вони повинні бути герметично приєднані до камери і електроізольовані від неї.

Електричні уводи поділяють на три основні групи:

- низьковольтні низькочастотні (напруга до 250 В, частота, до 1500 Гц);
- високовольтні (напруга понад 250 В) низькочастотні;
- високовольтні високочастотні (частота вище 1500 Гц).

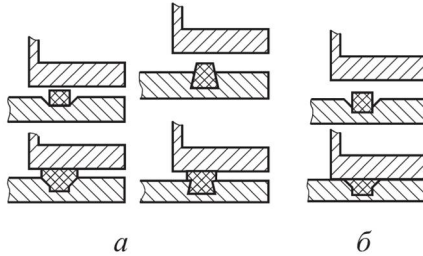


Рисунок 4.6 – Схеми вузлів зварювальних камер, які ущільнюються при змиканні

У свою чергу, низьковольтні уводи діляться на низькопотужні і потужностримові, останні призначені для пропускання понад 100 А.

Площа поперечного перерізу електричного уводу повинна бути такою, щоб щільність струму не перевищувала наступних значень, A/m^2 : $5 \cdot 10^6$ для міді, $7 \cdot 10^5$ для вуглецевої сталі, $2 \cdot 10^6$ для алюмінію. Щільність струму в місці контакту струмопідводу і уводу не повинна перевищувати $2 \cdot 10^6 A/m^2$.

Низьковольтний потужностримовий увід (рис. 4.7 а) являє собою мідний стержень 1, який введено в вакуумну камеру через гумовий ущільнювач 3 та ізольовано від неї ізоляційними кільцями 2. У середині камери до уводу приєднано дротяний нагрівач 4. Потужностримові уводи мають водяне охолодження.

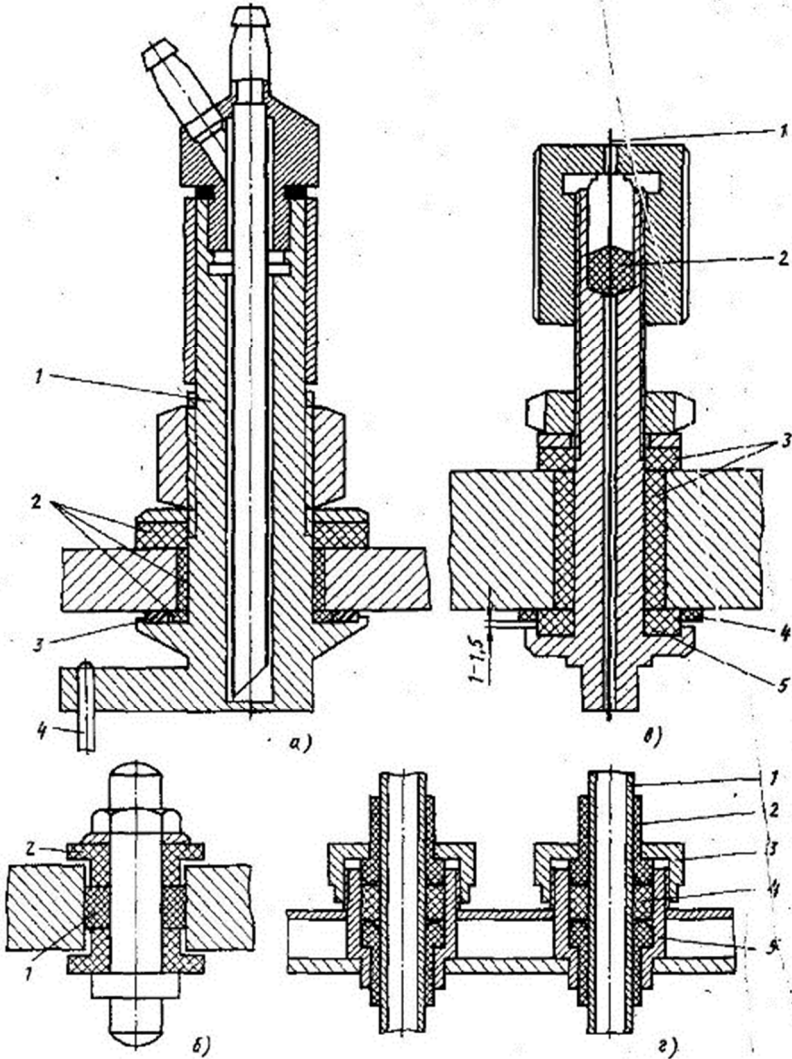


Рисунок 4.7 – Вакуумні уводи

Низьковольтні низькострумові уводи (рис. 4.7 б) можна герметизувати за допомогою гумового ущільнювача 1. Електроізоляцію від корпусу камери здійснюють втулками 2, виготовленими з кераміки або іншого електроізоляційного матеріалу.

Низькопотужний увід (рис. 4.7 в) застосовують для виведення з камери решт термопар. Кінець термопари 1 ущільнюється гумовим ущільнювачем 2. Корпус уводу ізольований від стінки камери втулками 3 і ущільнений гумовою прокладкою 5, деформація якої обмежена керамічним кільцем 4.

На рис. 4.7 г показаний увід височастотного водоохолоджуваного індуктора 1. Увід проходить через вварений в корпус камери патрубок 5. Герметизація здійснюється ущільненням з вакуумної гуми 4, яке затискається фторопластовим втулками 2 за допомогою накидної гайки 3.

Проектування вакуумної системи. Проектний розрахунок.

Вихідними даними для проектного розрахунку є:

- повний (іноді й парціальний) тиск залишкових газів в робочій камері p ;
- тиск газів після попереднього розрідження $p_{\text{поп}}$;
- розміри вакуумної камери, її матеріали, а також матеріали технологічного оснащення;
- матеріал та розміри зварюваних деталей;
- закон зміни в часі температури зварювання (циклограма);
- час попереднього розрідження $t_{\text{поп}}$;
- час досягнення заданого робочого тиску $t_{\text{зад}}$.

Проектний розрахунок виконують в наступній послідовності:

- а) за заданими значеннями повного та парціального тисків газів визначають типи вакуумних насосів, які забезпечують необхідну ступінь вакууму в робочій камері (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Робочий тиск вакуумних насосів, які використовуються в установках для дифузійного зварювання

Тип насосу	Робочий тиск, Па	
	найменший	найбільший
Ротаційний	10^{-3}	10^5
Ежекторний	10^{-1}	10^4
Дифузійний	10^{-7}	10^{-1}
Турбомолекулярний	10^{-7}	10^1

- б) Визначають існуючий баланс газових потоків. Сумарний газовий потік Q_{Σ} , який поступає у вакуумну камеру до початку нагрівання зварюваних деталей визначається за формулою:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{поч}} + Q_{\text{Т}} + Q_{\text{Г}} + Q_{\text{Н}}, \quad (4.1)$$

де $Q_{\text{поч}}$ – потік газу у початковий момент створення вакууму в зварювальній камері;

$Q_{\text{Т}}$ – потік газів, які виділяються із зварюваних деталей, нагрівачів, екранів (технологічне газовиділення);

$Q_{\text{Г}}$ – потік газів, які виділяються з конструкційних матеріалів вакуумної камери;

$Q_{\text{Н}}$ – потік газу, якій натікає в камеру через роз'ємні з'єднання.

Потік $Q_{\text{поч}}$ існує тільки в початковий період неусталеного режиму роботи та визначає час попереднього розрідження. Технологічне газовиділення визначається матеріалами зварюваних деталей, їх масою, а також температурою нагрівання деталей під зварювання:

$$Q_{\text{Т}} = \frac{K}{\tau_{\text{в}}} \sum_{i=1}^n G_i q_i, \quad (4.2)$$

де K – коефіцієнт, який враховує нерівномірність процесу газовиділення в часі ($K=1,5 \dots 3,0$);

$\tau_{\text{в}}$ – загальний час перебування зварюваних деталей в вакуумі;

G_i – маса i -го нагрівального елемента;

q_i – питоме газовиділення з i -го нагрівального елемента при певній температурі;

n – кількість елементів, які нагріваються (деталі, нагрівачі, екрани).

При розрахунку часу попереднього створення вакууму в першому наближенні можна прийняти, що відбувається тільки газовиділення з поверхонь заготовок. Величина газового потоку, який поступає в вакуумну камеру внаслідок газовиділення з поверхонь заготовок та елементів конструкції, обернених до вакууму, знаходиться за формулою:

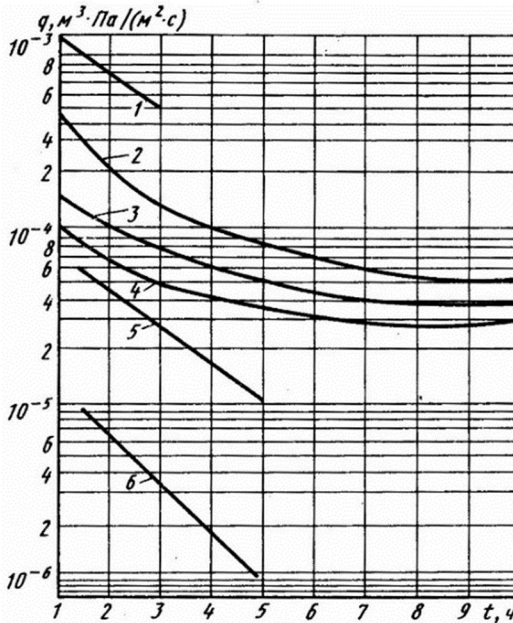
$$Q_{\text{Г}} = \sum_{i=1}^n P_i q_i, \quad (4.3)$$

де q_i – швидкість питомого газовиділення i -го матеріалу, оберненого до вакууму;

P_i – площа поверхні i -го матеріалу;

n – число матеріалів, обернених до вакууму.

Швидкості питомого газовиділення з поверхонь деяких матеріалів при нормальній температурі наведені на рис. 4.8.



1 – алюміній; 2 – сталь; 3 – латунь; 4 – корозійностійка сталь; 5 – мідь;
6 – протравлена мідь

Рисунок 4.8 – Швидкості питомих газовиділень з поверхонь різних матеріалів

Потік газу, який натікає у вакуумну камеру визначається за формулою:

$$Q_n = K_b m Q_{\text{теч}}, \quad (4.4)$$

де m – число послідовно перевірених з'єднань (у випадку перевірки відразу всієї вакуумної системи $m=1$);

K_b – вірогідність існування течі, яку неможливо виявити за допомогою течешукача ($K_b=0,1 \dots 0,3$);

$Q_{\text{теч}}$ – найменший потік, який реєструє течешукач.

При випробуваннях установок для дифузійного зварювання зазвичай застосовують гелеві мас-спектрометричні течешукачі; при

цьому випробовується, як правило, відразу вся вакуумна система установки. Для течошукача типу ПТІ $Q_{\text{теч}} \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Для систем установок для дифузійного зварювання $K_{\text{в}}=0,3$.

в) приймаючи газовий потік постійним в часі, розраховують необхідну швидкість створення вакууму в робочій камері за формулою:

$$S'_{\text{еф}} = Q_{\Sigma}/p. \quad (4.5)$$

г) розраховують необхідну номінальну швидкість дії основного насосу:

$$S'_{\text{н}} = S'_{\text{еф}}/K_{\text{в}}, \quad (4.6)$$

де $S'_{\text{еф}}$ та $S'_{\text{н}}$ - розрахункові значення номінальної та ефективної швидкості дії насосів;

$K_{\text{в}}$ – коефіцієнт використання (у механічних форвакуумних насосів $K_{\text{в}} \approx 0,8 \dots 0,9$; у дифузійних насосів $K_{\text{в}} \approx 0,5$).

д) за знайденим значенням швидкості створення вакууму обирають основний насос;

е) обирають або розробляють принципову схему вакуумної установки;

ж) за паспортними даними обирають додаткові насоси та насоси попереднього розрідження. В залежності від обраної схеми вакуумної системи додатковий насос та насос попереднього розрідження можуть бути самостійними або один форвакуумний насос може по чергово виконувати функції як допоміжного насосу, так і насосу попереднього розрідження;

з) призначають попередні розміри вакуумних трубопроводів, обирають комутаційну апаратуру та засоби вимірювання тиску;

і) знаходять швидкість створення вакууму в робочій камері насосом попереднього розрідження:

$$S_{\text{еф,дод}} = S_{\text{н,дод}} K_{\text{в,дод}}, \quad (4.7)$$

де $S_{\text{еф,дод}}$ та $K_{\text{в,дод}}$ – ефективна та номінальна швидкість дії допоміжного насосу;

- к) визначають вільний об'єм вакуумної камери та об'єм частини трубопроводів від камери до кранів;
 л) обчислюють час попереднього розрідження за формулою:

$$t_{\text{поп}} = \frac{V}{S_{\text{еф.дод}}} \ln \frac{p_{\text{поч}}}{p_{\text{поп}}}, \quad (4.8)$$

де $p_{\text{поч}}$ – початковий тиск;

$p_{\text{поп}}$ – тиск попереднього розрідження.

м) роблять висновок щодо розрахованого часу попереднього розрідження та заданого за умовами завдання на проектування.

Розрахунок несучої рами зварювальної установки. Рама (рис. 4.9) складається з верхньої 5 і нижньої 2 поперечок і бокових стійок 3. Скріплення поперечок і стійок здійснюється спеціальними високими гайками 4. Сама несуча рама є складовою частиною опорної рами 1 або кріпиться на ній.

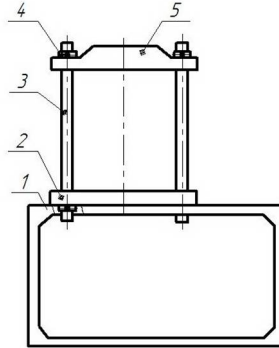


Рисунок 4.9 – Рама зварювальної установки

Спочатку роблять проектний розрахунок, потім перевірочний.

Стійки рами, як правило, виконують з круглим або трубчатим поперечним перерізом, а поперечки – з перетином у вигляді прямокутників, можливе також використання швелерів і кутків. Поперечки і стійки виготовляють з вуглецевих конструкційних сталей (табл. 4.4). Навантаження при стисканні з'єднаних деталей має статичний характер.

Для забезпечення фіксації взаємного положення деталей, що з'єднуються під час дифузійного зварювання, а також для точного

виміру зусилля стиснення необхідно, щоб жорсткість поперечок була набагато більше жорсткості бокових стояків. Іншими словами, при заданому навантаженні прогин поперечок повинен бути набагато менше, ніж розтягнення бокових стояків, тобто:

$$f_{п.в} \ll f_c; \quad (4.9)$$

$$f_{п.н} \ll f_c \quad (4.10)$$

де $f_{п.в}$, $f_{п.н}$ – відповідно прогини верхньої та нижньої поперечок;
 f_c – подовження стояку.

Таблиця 4.4 – Допустимі напруження для вуглецевих конструкційних сталей (ГОСТ 1050–74) при статичному навантаженні

Марка сталі	Допустимі напруження, МПа	
	при розтяганні	при згині
0,8	110	130
10	110	145
15	125	150
20	140	170
25	150	180
30	165	200
35	180	210
40	190	230
45	200	240
50	210	250

Примітка. Термообробка сталі – нормалізація

При дотриманні умов (4.9) і (4.10) епіюра згинальних моментів матиме вигляд, показаний на рис. 4.10. Можна вважати, що стояки рами піддаються тільки розтягуванню.

Подовження стояку

$$f_c = Ql_c / (2EF_c), \quad (4.11)$$

де Q – зусилля;

l_c , F_c – довжина та площа поперечного перетину стояку;

E – модуль пружності першого роду, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

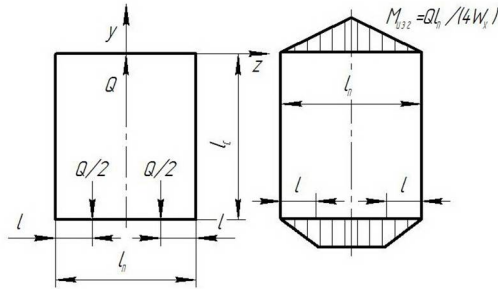


Рисунок 4.10 – До розрахунку несучої рами

Прогин поперечок дорівнює сумі прогинів від дії згинаючого моменту і перерізуючої сили:

$$f_{п.в} = f_{п.в}^M + f_{п.в}^Q; \quad (4.12)$$

$$f_{п.н} = f_{п.н}^M + f_{п.н}^Q, \quad (4.13)$$

де $f_{п.в}^M, f_{п.н}^M$ – прогин поперечин під дією згинального моменту;

$f_{п.в}^Q, f_{п.н}^Q$ – прогин поперечин під дією перерізуючої сили.

З опору матеріалів відомо, що прогини при вигині можна знайти шляхом вирішення диференціальних рівнянь

$$M = EI_x y''; \quad (4.14)$$

$$Q = (EI_x y'')'; \quad (4.15)$$

де I_x – момент інерції поперечного перетину бруса відносно осі x ;

y – переміщення бруса вздовж осі z .

Для бруса з постійною жорсткістю поперечного перерізу вид рівняння (4.14) зберігається, але $I_x = \text{const}$, а рівняння (4.15) перетвориться до виду

$$Q = EI_x y'''. \quad (4.16)$$

Рішенням рівнянь (4.14) та (4.16) будуть формули для розрахунку прогинів поперечин:

$$f_{п.в}^M = \frac{Ql_{п}^3}{48EI_{x п.в}}; \quad (4.17)$$

$$f_{п.н}^M = \frac{Ql^2 (3l_{п}-4l)}{12 EI_{x п.н}}; \quad (4.18)$$

$$f_{п.в}^Q = K \frac{Ql_{п}}{4GF_{п.в}}; \quad (4.19)$$

$$f_{п.н}^Q = K \frac{Ql}{4GF_{п.н}}; \quad (4.20)$$

де $l_{п}$ – довжина поперечини;

$I_{x п.в}$, $I_{x п.н}$ – моменти інерції верхньої та нижньої поперечин відносно осі; для прямокутного перерізу шириною b і висотою h $I_x = bh^3/12$;

$F_{п.в}$, $F_{п.н}$ – площі поперечних перерізів верхньої і нижньої поперечин;

K – коефіцієнт, що залежить від форми поперечного перерізу, для прямокутного перерізу $K=1,2$;

G – модуль пружності другого роду, для сталей $G = 3E/8$.

Напруження розтягнення в стійках під дією сили знаходять по формулі:

$$\sigma_{p.c} = Q/2F_c \quad (4.21)$$

Напруження згину в поперечинах рами, які виникають в результаті дії згинального моменту:

$$\sigma_{з п.в} = \frac{M_{п.в}}{W_{x п.в}} \frac{Ql_{п}}{4W_{x п.в}}; \quad (4.22)$$

$$\sigma_{з п.в} = \frac{M_{п.в}}{W_{x п.у}} \frac{Ql}{4W_{x п.в}}; \quad (4.23)$$

де $W_{x п.в}$, $W_{x п.у}$ – моменти опору поперечних перерізів, для прямокутного перерізу $W_x = bh^2/6$.

Напруження зсуву в поперечинах, які виникають в результаті дії перерізуючих сил, можна не враховувати, тому що в даному випадку вони менше згинальних напружень, а головне, в місці дії максимальних напружень зсуву (центр поперечного перерізу) напруження згину дорівнюють нулю та, навпаки, в місці дії максимальних згинальних напружень (периферійні точки поперечного перерізу) напруження зсуву дорівнюють нулю.

Проектний розрахунок. Вихідними даними для проектного розрахунку є зусилля стиснення P ($P = Q$) і геометричні розміри рами: довжини стійок l_c , поперечок l_n , відстані l від опори камери до центру стояку.

Проектний розрахунок виконують в наступній послідовності:

а) залежно від значення сили Q призначають матеріали для виготовлення стояків і поперечок. За табл. 4.4 з урахуванням статичного характеру навантаження встановлюють допустимі напруження обраного матеріалу на розтягання і згин. Вибирають форми поперечних перерізів стояків і поперечин.

б) з умови, що напруження розтягнення у стояках рами не повинні перевищувати допустимих значень, площу поперечного перерізу стійки знаходять по формулі

$$F_c = Q / 2[\sigma_p]. \quad (4.24)$$

З урахуванням обраної форми визначають геометричні розміри поперечного перерізу стояків. При круглому поперечному перерізі або перерізі у вигляді труби знайдений з умови міцності діаметр збільшують приблизно на 8...12 мм для виконання посадочного місця поперечин і кріпильної різби.

в) за формулою (4.11) знаходять видовження стояків під дією сили, яка розтягує.

г) з умов (4.9) та (4.10) обчислюють допустимий прогин верхньої та нижньої поперечин.

При цьому, як правило, вважають, що:

$$f_{п.в} = f_{п.н} = (0,1 \dots 0,3)f. \quad (4.25)$$

д) знаходять геометричні розміри перерізів поперечок, використовуючи залежності (4.12) та (4.18).

Задаючись одним з розмірів поперечного перерізу, по залежностям (4.12) та (4.18) знаходять інші розміри. Для прямокутного перерізу простіше задати висоту перерізу і розрахувати ширину прямокутника.

є) на підставі виконаних розрахунків призначають геометричні розміри силових рам установок дифузійного зварювання.

Перевірочний розрахунок. Вихідними даними для перевірконого розрахунку є призначені матеріали та геометричні розміри несучих рам.

Перевірочні розрахунки виконують у наступній послідовності:

а) за формулами (4.21)...(4.23) знаходять напруження в стояках і поперечинах рам. Знайдені величини напружень не повинні перевищувати допустимі.

б) за формулами (4.11)...(4.13) та (4.18) визначають переміщення в стояках і поперечинах. Перевіряють виконання співвідношень (4.9) та (4.10).

Часто для зниження металосмістості поперечки рам виконують зі змінним перетином. В цьому випадку встановлюють аналітичні залежності $I_{x \text{ п.в}} = f_1(z)$, $I_{x \text{ п.н}} = f_2(z)$ і з урахуванням граничних умов проводять інтегрування диференціальних рівнянь (4.14) та (4.15), після чого знаходять прогини поперечин рами. Формули для розрахунку видовження стояків рами, напружень у стояках і поперечинах при цьому не змінюються, якщо виконуються умови (4.9) та (4.10).

Застосовуване стандартне обладнання та його технічні характеристики. У підрозділі наводяться технічні відомості щодо застосованої вакуумної комутаційної апаратури вакуумної системи та обраних по розрахунку основних і допоміжних насосів.

4.3.3 Охорона праці

В даному розділі здійснюється аналіз потенційних небезпек, заходи по забезпеченню техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці при роботі на дільниці дифузійного зварювання.

4.3.4 Висновки

У висновках наводять оцінку одержаних результатів роботи та вирішення поставленої задачі; можливі галузі використання результатів проекту.

Текст висновків може поділятися на пункти.

4.4 Додатки

До розділу «Додатки» ПЗ входять специфікації креслень, які виконуються окремо на аркушах паперу А4.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ І ЗАХИСТУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

5.1 Вимоги до оформлення курсового проекту

ПЗ оформлюється у відповідності з ДСТУ 3008:2015.

Приклад оформлення титульного аркушу розміщено на сторінці кафедри ОТЗВ сайту ЗНТУ за адресом <http://zntu.edu.ua/pryklady-oformlennya-dokumentiv-kafedry-obladnannya-ta-tehnologiyi-zvaryuvalnogo-vyrobnystva>.

Приклад оформлення аркушу завдання на курсовий проект розміщено на сторінці кафедри ОТЗВ сайту ЗНТУ за адресом <http://zntu.edu.ua/pryklady-oformlennya-dokumentiv-kafedry-obladnannya-ta-tehnologiyi-zvaryuvalnogo-vyrobnystva>.

У звіті треба використовувати одиниці SI.

Кількість видів, розрізів, перерізів має бути мінімально для повного поняття про конструкцію деталі або вузла.

Заповнюваність креслень не менш 80 % поля аркуша.

Складальне креслення зварюваного виробу слід виконувати з максимальними спрощеннями у відповідності з ГОСТ 2.109-73 та іншими стандартами на виконання креслень.

Вакуумна схема установки для дифузійного зварювання виконується згідно загальних вимог по виконанню схем (ГОСТ 2.701-2008) правил виконання вакуумних схем вакуумних систем для всіх галузей промисловості (ГОСТ 2.797-81). Умовно-графічне позначення (УГП) елементів вакуумних схем слід виконувати по ГОСТ 2.796-95, УГП арматури трубопроводів по ГОСТ 2.785-70.

Бібліографічні описи посилань у переліку наводять відповідно до чинних стандартів з бібліотечної та видавничої справи.

5.2 Захист проекту

Захист проекту є завершальним етапом роботи і проводиться перед комісією у складі 2...3 викладачів кафедри, в тому числі і керівника курсового проекту, із запрошенням студентів.

До захисту подається повністю завершена робота, яка підписана автором і керівником проекту. Загальний час, який відводиться для захисту проекту складає 20...25 хвилин, з яких 8...10 хвилин надається студенту для виступу, а решта часу – для відповідей на запитання.

Оцінка за проект ставиться у стобальній системі. При цьому враховується:

- повнота, якість і самостійність виконання поставленої задачі;
- оформлення пояснювальної записки, графічної частини проекту (згідно нормам ГОСТ, ДСТУ та СТП);
- чіткість виступу студента та його відповіді на запитання;
- планомірність роботи над проектом;
- робота з літературою.

Студент, що не подав курсовий проект у зазначений термін, або не захистив його без поважної причини, вважається таким, що має академічну заборгованість. При одержанні незадовільної оцінки студент за рішенням комісії виконує курсовий проект за новою темою або переробляє попередню роботу в термін, визначений деканом факультету.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Лариков Л.Н., Рябов В.Р., Фальченко В.М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. – М.: Машиностроение, 1975. – 192 с.
2. Тарабасов Н.Д., Учаев П.Н. Проектирование деталей и узлов машиностроительных конструкций. Справочник. - М.: Машиностроение, 1983. – 239 с.
3. Литвин Ф.Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. - Л.: Машиностроение, 1973. - 696 с.
4. Гельман А.С. Основы сварки давлением. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
5. Квасницький В.В. Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник. - Миколаїв: УДМТУ, 2003. - 437 с.
6. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки / В.А. Бачин, В.Ф. Квасницкий, Д.И. Котельников и др.; Под общ. Ред. В.А. Бачина. – М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.
7. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. - М.: Металлургия, 1976. - 264 с.
8. Люшинский А. В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — М.: Академия, 2006. - 208 с.
28. Мусин Р.А., Анциферов В.Н., Квасницкий В.Ф. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов. М.: Металлургия, 1979. - 208 с.
9. Метелкин И.И., Павлова М.А., Поздеева Н.В. Сварка керамики с металлом. - М: Металлургия, 1977. - 160 с.
10. Лариков Л.Н., Рябов В.Р., Фальченко В.М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. - М.: Машиностроение, 1975. – 192 с.
11. Диффузионная сварка титана / Каракозов Э.С., Орлова Л.М., Пешков В.В., Григорьевский В.И. - М.: Металлургия, 1977. - 272 с.
12. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. П.Ф. Казакова. - М.: Машиностроение, 1981. - 271с.
13. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. - М.: Машиностроение, 1976. - 312с.

Додаток А

Приклад розрахунку вакуумної системи

Вихідні данні до розрахунку:

- зварювані деталі – циліндри діаметром $d_d=0,05$ м та висотою $h_d=0,04$ м зі сталі Ст10;
- режим дифузійного зварювання: повний тиск залишкових газів під час ізотермічної витримки $p_3 \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, час досягнення заданого тиску $\tau_3 = 10$ хв, температура зварювання $T_{зв} = 1373$ К, час нагріву деталей $\tau_n = 40$ хв, час ізотермічної витримки $\tau_v = 20$ хв;
- час $\tau_{поп}$ попереднього розрідження до тиску $p_{поп} = 6,5$ Па не повинен бути більшим 9 хв;
- матеріал вакуумної робочої камери – сталь 12Х18Н10Т, матеріал нагрівального елемента індуктора – протравлена мідь;
- вакуумна камера виконана у вигляді кубу (рис. А.1) з ребром $B_k=0,4$ м, діаметр $D_{пр}$ та висота $H_{пр}$ притискача – відповідно 0,06 та 0,05 м; діаметр штоку $D_{шт}=0,04$ м, висота штоку в камері $H_{шт}=0,1$ м; діаметр $D_{ст}$ та висота $H_{ст}$ – відповідно 0,1 та 0,05 м; діаметр індуктора $D_i=0,07$ м, діаметр дроту, який індуктує $d_i=0,01$ м, крок дроту індуктора $H_i=0,012$ м; довжина дроту індуктора до введення до камери $L_i=0,0165$ м;
- розміри трубопроводів та комутаційної апаратури наступні, м: $l_{11}=0,2$; $l_{12}=0,2$; $l_{13}=0,05$; $l_{14}=0,1$; $l_{21}=0,6$; $l_{22}=0,2$; $l_{23}=0,12$; $l_{31}=l_{33}=0,08$; $l_{32}=0,12$.

Проектний розрахунок

1. Виходячи з заданого тиску залишкових газів в вакуумній робочій камері, за даними таблиці обираємо в якості основного насоса дифузійний паромастильний насос, в якості допоміжного – механічний об'ємний ротаційний насос.

2. Визначаємо сумарний газовий потік, який поступає в вакуумну камеру до початку нагрівання зварюваних виробів. На цій стадії розрахунку приймаємо, що газовий потік не змінюється в часі. Попередньо приймаємо, що діаметри трубопроводів $d_1=0,1$ м, $d_2=0,05$ м. Площа поверхонь зварюваних деталей, яка обернена у вакуум,

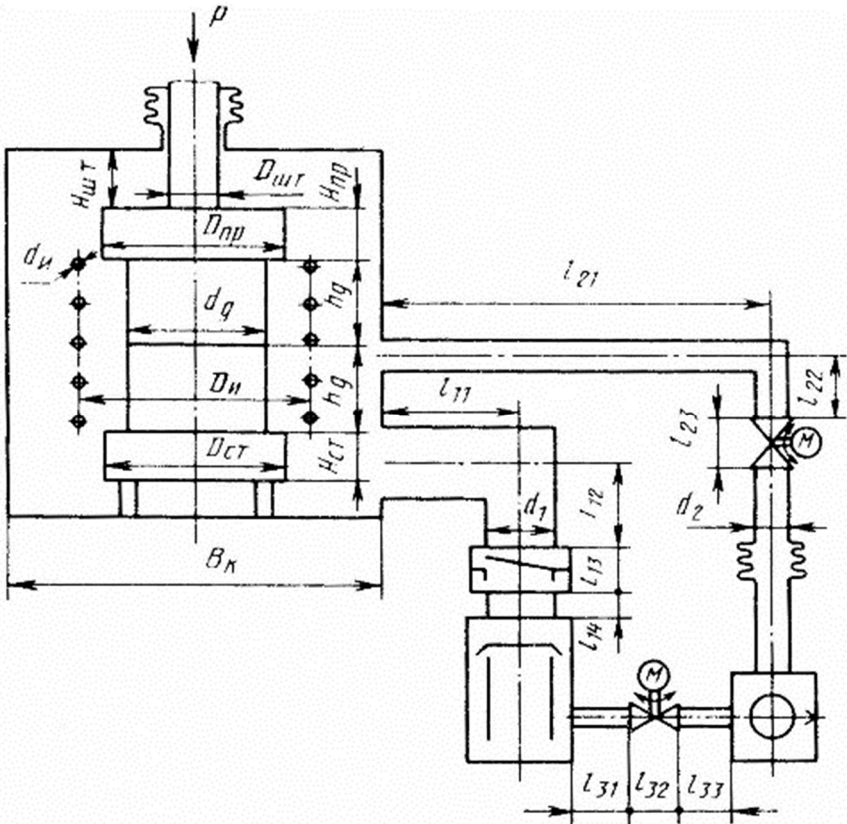


Рисунок А.1 - До розрахунку вакуумної камери

$$П_{д} = \pi d_{д} \cdot 2h_{д} = 3,14 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 0,04 = 0,0126 \text{ м}^2.$$

Площа внутрішньої поверхні вакуумної камери:

$$П_{к} = 6B_{к}^2 - \frac{\pi D_{шт}^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} = 6 \cdot 0,4^2 - \frac{3,14 \cdot 0,04^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} = 0,941 \text{ м}^2.$$

Площа поверхні притискача:

$$П_{пр} = \frac{\pi(D_{пр}^2 - d_{д}^2)}{4} + \frac{\pi(D_{пр}^2 - D_{шт}^2)}{4} + \pi D_{пр} H_{пр} =$$

$$= \frac{3,14(0,06^2 - 0,05^2)}{4} + \frac{3,14(0,06^2 - 0,04^2)}{4} + 3,14 \cdot 0,06 \cdot 0,05 = 0,0118 \text{ м}^2.$$

Площа поверхні штоку:

$$\Pi_{\text{шт}} = \pi D_{\text{шт}} H_{\text{шт}} = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,1 = 0,0126 \text{ м}^2.$$

Площа поверхні столу:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ст}} &= \frac{\pi(D_{\text{ст}}^2 - d_{\text{д}}^2)}{4} + \frac{\pi D_{\text{ст}}^2}{4} + \pi D_{\text{ст}} H_{\text{ст}} = \\ &= \frac{3,14(0,1^2 - 0,05^2)}{4} + \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} + 3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,05 = 0,0294 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Площа поверхні індуктору:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{i}} &= \pi d_{\text{i}} \left(\frac{2h_{\text{д}}}{H_{\text{i}}} \pi D_{\text{i}} + 2L_{\text{i}} \right) = \\ &= 3,14 \cdot 0,01 \left(\frac{2 \cdot 0,04}{0,012} 3,14 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,165 \right) = 0,0564 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Площа поверхні трубопроводу від камери до затвору:

$$\Pi_{\text{тр1}} = \pi d_1 (l_{12} + l_{12}) = 3,14 \cdot 0,1 \cdot (0,2 + 0,2) = 0,1256 \text{ м}^2.$$

Площа поверхні трубопроводу до клапану:

$$\Pi_{\text{тр2}} = \pi d_2 (l_{21} + l_{22}) = 3,14 \cdot 0,05 \cdot (0,4 + 0,1) = 0,0785 \text{ м}^2.$$

Визначаємо величину газового потоку за формулою:

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} &= (\Pi_{\text{д}} + \Pi_{\text{пр}} + \Pi_{\text{шт}} + \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{тр}} + \Pi_{\text{тр2}}) q_{\text{с}} + \Pi_{\text{к}} q_{\text{к-с}} + \Pi_{\text{i}} q_{\text{м}} + Q_{\text{н}} = \\ &= (0,0126 + 0,0118 + 0,0125 + 0,0294 + 0,1256 + 0,0785) \times \\ &\quad \times 7 \cdot 10^{-4} + 0,941 \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} + 0,0564 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + 2,01 \cdot 10^{-11} = \\ &= 3,3163 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{Па/с}, \end{aligned}$$

де $q_{\text{с}}$, $q_{\text{к-с}}$, $q_{\text{м}}$ – швидкості питомих газовиділень відповідно з конструкційної та корозійностійкої сталі, міді.

Знаходимо ефективну швидкість утворення вакууму робочої камери:

$$S'_{\text{еф}} = \frac{Q_{\Sigma}}{p} = \frac{3,3163 \cdot 10^{-4}}{1,5 \cdot 10^{-4}} = 0,05102 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Визначаємо номінальну швидкість дії основного насосу:

$$S'_{\text{н}} = \frac{S'_{\text{еф}}}{K_{\text{в}}} = \frac{0,05102}{0,5} = 0,102 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5. У якості основного насосу обираємо дифузійний паромасильний насос мод. Н-5С-М, який має номінальну швидкість дії $S_{\text{н}}=0,5 \text{ м}^3/\text{с}$; діаметр впускного патрубку $d_{\text{вп}}=0,16 \text{ м}$, випускного $d_{\text{вип}}=0,032 \text{ м}$. Тиск запуску насосу $p_3=26 \text{ Па}$.

Необхідна швидкість дії допоміжного насосу:

$$S_{\text{н. доп}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

6. Обираємо типову схему вакуумної системи, в якій форвакуумний насос виконує функції допоміжного насосу та насосу попереднього розрідження.

7. Обираємо форвакуумний механічний ротаційний насос моделі РВН-20, який має номінальну швидкість дії $S_{\text{н. доп}}=2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, та забезпечує залишковий тиск $p_{\text{пр}}=3,9 \text{ Па}$.

8. Призначаємо діаметри вакуумних трубопроводів: $d_1=0,16 \text{ м}$; $d_2=0,032 \text{ м}$. Обираємо вакуумний затвор, який відсікає камеру від основного насосу, з умовним прохідним отвором діаметром $0,16 \text{ м}$, вакуумні крани з умовними отворами діаметром $0,032 \text{ м}$.

9. Знаходимо попередню швидкість створення вакууму робочої камери допоміжним насосом:

$$S_{\text{еф, доп}} = S_{\text{н, доп}}/K_{\text{в, доп}} = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8 = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

10. Визначаємо вільний об'єм вакуумної камери та трубопроводів:

$$\begin{aligned}
 V &= V_{\text{к}} + V_{\text{тр}} - V_{\text{д}} - V_{\text{пр}} - V_{\text{шт}} - V_{\text{ст}} - V_{\text{н}} = \\
 &= B_{\text{к}}^2 + \frac{\pi d_1^2}{4} (l_{11} + l_{12}) + \frac{\pi d_2^2}{4} (l_{21} + l_{22}) - \frac{\pi d_{\text{д}}^2}{4} 2h_{\text{д}} - \frac{\pi D_{\text{пр}}^2}{4} 2H_{\text{пр}} - \\
 &\quad - \frac{\pi D_{\text{шт}}^2}{4} 2H_{\text{шт}} - \frac{\pi D_{\text{ст}}^2}{4} 2H_{\text{ст}} - - \frac{\pi d_{\text{н}}^2}{4} \left(\frac{2h_{\text{д}}}{H_i} \pi D_i + 2L_i \right) = \\
 &= 0,4^3 + 3,14: 4 \cdot 0,16^2 \cdot 0,2 + 0,2 + 0,032^2 \cdot 0,6 + 0,2 - \\
 &\quad - 0,05^2 \cdot 2 \cdot 0,04 - 0,06^2 \cdot 0,05 - 0,04^2 \cdot 0,1 - 0,1^2 \cdot 0,05 - \\
 &\quad - 0,01^2 \cdot 2 \cdot 0,04: 0,012 \cdot 3,14 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,165 = 0,072 \text{ м}^3.
 \end{aligned}$$

11. Знаходимо час попереднього розрідження:

$$t_{\text{поп}} = \frac{0,072}{2,08 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{1,01 \cdot 10^5}{6,5} = 334 \text{ с} = 5,6 \text{ хв.}$$

Таким чином, час попереднього розрідження менше 9 хвилин.

Додаток Б

Приклад розрахунку несучої рами установки для дифузійного зварювання

Вихідні дані: $Q = 100$ кН, $l_c = 1$ м, $l_{п.н} = 0,6$ м, $l = 0,15$ м.

Спочатку проводимо проектний розрахунок.

З урахуванням заданого навантаження у якості матеріалу для виготовлення стійок и поперечин несучої рами вибираємо сталь 10. Поперечний переріз стояків приймаємо у вигляді кола діаметром d_c , поперечний переріз верхньої поперечини – у вигляді прямокутника розміром $b_{п.в} \cdot h_{п.в}$, нижньої – у вигляді двох прямокутників $b_{п.в} \cdot h_{п.н}$

Визначаємо площу поперечного перерізу і діаметр стояка:

$$F_c = \frac{Q}{2[\sigma_p]} = \frac{10^5}{2 \cdot 110 \cdot 10^6} = 4,545 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$d_c = 2 \sqrt{\frac{F_c}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{4,545 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 2,41 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Назначаємо $d_c = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м, тоді:

$$F_c = \frac{3,14(3,5 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 9,616 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Назначаємо внутрішній діаметр d різьби під гайки на кінцях стояків: $d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Тоді:

$$F_c = \frac{3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{4} = 4,905 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Знаходимо видовження стояків під дією сили, яка розтягує:

$$f_c = \frac{Q l_c}{2 E F_c} = \frac{10^5 \cdot 1,0}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 9,616 \cdot 10^{-4}} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Приймаємо, що допустимий прогин поперечин:

$$f_{п.в} = f_{п.н} = 0,3f_c = 0,3 \cdot 2,6 \cdot 10^{-4} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Назначаємо висоти поперечних перетинів прямокутників верхньої і нижньої поперечин: $h_{п.в} = 0,25 \text{ м}$, $h_{п.н} = 0,15 \text{ м}$.

З урахуванням рівнянь (6.12) і (6.17)...(6.20) знаходимо $b_{п.в}$ і $b_{п.н}$:

$$b_{п.в} = \frac{10^5 \cdot 0,6}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,25 \cdot 7,8 \cdot 10^{-5}} = \left(\frac{12 \cdot 0,6^2}{48 \cdot 0,25^2} + \frac{1,2 \cdot 8}{2} \right) = 3,45 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

$$b_{п.н} = \frac{10^5 \cdot 0,15}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 0,15 \cdot 7,8 \cdot 10^{-5}} \cdot \left(\frac{12 \cdot 0,15 \cdot 3 \cdot 0,6 \cdot 4 \cdot 0,15}{12 \cdot 0,15^2} + \frac{1,2 \cdot 8}{2 \cdot 3} \right) = 3,07 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Назначаємо $b_{п.в} = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $b_{п.н} = b_{п.в} = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Далі проводимо перевірючий розрахунок.

Визначаємо напруження у стояках і поперечинах рами:

$$\sigma_{p.c} = \frac{Q}{2F_c} = \frac{10^5}{2 \cdot 4,906 \cdot 10^{-6}} = 101,9 \text{ МПа} < [\sigma_p] = 110 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{з.п.в} = \frac{Ql_{п.в}}{4W_{x п.в}} = \frac{10^5 \cdot 0,6 \cdot 6}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25^2} = 41,1 \text{ МПа} < [\sigma_3] = 130 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{з.п.н} = \frac{Ql}{4W_{x п.н}} = \frac{10^5 \cdot 0,15 \cdot 6}{4 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,15^2} = 28,6 \text{ МПа} < [\sigma_3] = 130 \text{ МПа.}$$

Знаходимо прогини поперечин і перевіряємо виконання нерівностей (6.9) та (6.10):

$$f_{п.в}^M = \frac{Ql_{п.в}^3}{48EI_{x п.в}} = \frac{10^5 \cdot 0,6^3 \cdot 12}{48 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25^3} = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$f_{п.н}^M = \frac{Ql(3l_{п.н} - 4l)}{12EI_x} = \frac{10^5 \cdot 0,15^2 (3 \cdot 0,6 - 4 \cdot 0,5) 12}{12 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,15^3} = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$f_{п.в}^Q = K \frac{Ql_{п.в}}{4GF_{п.в}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6 \cdot 8}{4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$f_{п.н}^Q = K \frac{Ql}{4GF_{п.н}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,15 \cdot 8}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,15} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$f_{\text{п.в}} = f_{\text{п.в}}^M + f_{\text{п.в}}^Q = (4,9 + 2,7)10^{-5} = 7,6 \cdot 10^{-5} < 0,3f_c = 7,8 \cdot 10^{-5}\text{м};$$

$$f_{\text{п.н}} = f_{\text{п.н}}^M + f_{\text{п.н}}^Q = (5,7 + 1,2)10^{-5} = 6,9 \cdot 10^{-5} < 0,3f_c = 7,8 \cdot 10^{-5}\text{м}.$$

Таким чином, призначені розміри несучих рам задовольняють умовам міцності і жорсткості.