

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

**на тему: «Обґрунтування параметрів конструкції
зварювального стола для інтеграції з роботизованою
системою зварювання»**

Виконав: студент групи Маш-62

**Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)**

**Алексєєв Артур Сергійович
(Прізвище та ініціали)**

**Керівник: к.т.н., доц. Шеремета Р.Б.
(Прізвище та ініціали)**

ДУБЛЯНИ-2025

УДК 621.791.037:621.865.8

Кваліфікаційна робота: с. 68 текст. част., 20 рис., 3 табл., 25 джерел.

Обґрунтування параметрів конструкції зварювального стола для інтеграції з роботизованою системою зварювання. – Дубляни, Львівський НУВМБ, 2025.

У кваліфікаційній роботі проведений аналіз існуючих зварювальних столів. Обґрунтовано інтеграцію зварювальних столів з роботизованою системою. Розроблено інтеграцію зварювального столу в роботизовану систему. Проведені розрахунки зварювального столу на міцність, жорсткість, стійкість, та оцінка власної частоти. Проведено дослідження зварювального столу, та дослідження модульної плити на температурний вплив в SolidWorks Simulation. Розроблено заходи безпеки та проведено економічне обґрунтування доцільності

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СТОЛІВ	
1.1 Призначення та класифікація зварювальних столів.....	9
1.2 Огляд сучасних конструкцій і виробників зварювальних столів.....	10
1.3 Аналіз конструктивних рішень модульних систем.....	12
1.4 Порівняння технічних характеристик і функціональних можливостей.....	13
1.5 Вимоги до зварювальних столів для роботизованих систем.....	14
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СТОЛІВ З РОБОТИЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ	
2.1 Умови інтеграції зварювальних столів з роботизованими системами.....	17
2.2 Конструктивне рішення.....	22
2.3 Обґрунтування параметрів зварювального столу.....	25
2.4 Перспективи вдосконалення.....	28
РОЗДІЛ 3 ІНТЕГРАЦІЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТОЛА В РОБОТИЗОВАНУ СИСТЕМУ	
3.1 Структура та принцип роботи роботизованої системи зварювання.....	29
3.2 Узгодження координатної системи стола та маніпулятора.....	33
3.3 Сумісність із системами автоматичного позиціонування.....	37
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	
4.1 Розрахунок на міцність, жорсткість і динаміку зварювального столу.....	41
4.1.1 Перевірка модульної плити.....	41
4.1.2 Розрахунок внутрішньої перемички (стингер) рами.....	43
4.1.3 Стійкість ніжок і навантаження на п'яти.....	43
4.1.4 Оцінка власної частоти.....	44

4.2 Розрахунок різьбових опор зварювального столу.....	44
--	----

РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

5.1 Постановка задачі та вихідні дані.....	48
--	----

5.2 Дослідження зварювального столу.....	49
--	----

5.3 Дослідження модульної плити на температурний вплив.....	55
---	----

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

6.1 Ідентифікація небезпечних і шкідливих факторів та вихідні умови.....	58
--	----

6.2 Інженерні та організаційні заходи безпеки.....	58
--	----

6.3 Ергономіка, антропометрія, безпека та організація робочого місця.....	59
---	----

6.4 Економічне обґрунтування. Структура витрат та експлуатаційні витрати...	61
---	----

ВИСНОВКИ.....	65
----------------------	-----------

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
--	-----------

ВСТУП

Сучасне машинобудування переживає активний етап цифрової трансформації, що супроводжується впровадженням роботизованих і автоматизованих технологій у виробничі процеси. Однією з найбільш прогресивних галузей, де ці зміни особливо помітні, є зварювальне виробництво. Застосування роботизованих систем зварювання дозволяє підвищити точність виконання з'єднань, стабільність якості, продуктивність праці та знизити вплив людського фактора на технологічний процес. Водночас ефективність роботи таких систем безпосередньо залежить від якості, конструктивних особливостей і точності допоміжного оснащення, зокрема зварювальних столів.

Зварювальний стіл виконує роль базової системи координат для розташування і фіксації деталей під час зварювання. Він має забезпечувати стабільність геометрії, точність базування, а також зручність інтеграції з маніпулятором робота. У сучасних виробничих умовах до таких столів висуваються особливі вимоги: універсальність, модульність, сумісність із системами позиціонування та можливість швидкої переналагоджуваності. Саме тому питання обґрунтування параметрів конструкції зварювального стола для інтеграції з роботизованими системами є актуальним і має важливе науково-практичне значення.

Значна кількість сучасних підприємств, у тому числі малого та середнього бізнесу, впроваджують роботизовані комплекси для виконання точних і повторюваних операцій зварювання. Проте ефективність таких систем часто обмежується недостатньою точністю або гнучкістю робочого оснащення. Це призводить до додаткових втрат часу на калібрування, збільшення похибок позиціонування, а також до зниження продуктивності. Тому проектування зварювального стола має враховувати не лише міцнісні та жорсткісні характеристики, а й технологічні, ергономічні, економічні та інтеграційні аспекти.

Оригінальність даної роботи полягає у формуванні системного підходу до вибору та обґрунтування параметрів конструкції зварювального стола, призначеного для інтеграції з роботизованим зварювальним комплексом. У межах дослідження передбачається створення моделі конструкції, виконання її віртуального аналізу напружено-деформованого стану та визначення оптимальних параметрів, що забезпечують необхідну точність і стабільність роботи системи.

Метою кваліфікаційної роботи є **обґрунтування параметрів конструкції зварювального стола для інтеграції з роботизованою системою.**

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз сучасних конструкцій і класифікацій зварювальних столів;
- визначити вимоги до столів, призначених для роботи у складі роботизованих систем зварювання;
- розробити 3D-модель зварювального стола у середовищі **SolidWorks**;
- оцінити можливість інтеграції столу в роботизований комплекс;
- виконати розрахунки міцності, жорсткості та стійкості конструкції;
- провести дослідження зварювального столу в **SolidWorks Simulation**;
- провести економічне обґрунтування доцільності розробленого рішення та аналіз заходів з охорони праці.

Об'єктом дослідження є процес базування та фіксації зварювальних деталей у роботизованих системах зварювання.

Предметом дослідження виступає конструкція зварювального стола та її параметри, що впливають на точність і ефективність процесу зварювання.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої конструкції зварювального стола у виробничі умови для забезпечення стабільної роботи роботизованого зварювального комплексу. Результати можуть бути використані під час проектування нових робочих місць, модернізації існуючих зварювальних дільниць, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СТОЛІВ

1.1 Призначення та класифікація зварювальних столів

Зварювальний стіл є базовою опорною системою, що:

- забезпечує **геометричну незмінність** положення заготовок під час зварювання;
- задає **референтну систему координат** для калібрування траєкторій (особливо у роботизованих комплексах);
- дозволяє реалізувати **керовані умови базування** (локатори, штифти, упори) з відтворюваною точністю;
- забезпечує **термостійкість** під впливом локального тепловкладення та захист від бризок/шлаку;
- формує умови **ергономіки і безпеки** для оператора/налагоджувальника.

Столи застосовують для MIG/MAG, TIG, MMA, плазмового та лазерного зварювання, точкового/контактного та шовного зварювання. Ключові відмінності вимог:

- **Дугові процеси (MIG/MAG, TIG, MMA):** критична стійкість до бризок, антипригарні покриття, відведення тепла, захист перфорації.
- **Лазерне зварювання:** підвищені вимоги до площинності/вібраційної стійкості; можливе екранування.
- **Контактне/точкове:** зосереджені сили притиску → посилена рама, більша товщина плити.

Класифікація конструкцій

За робочою поверхнею:

- перфоровані модульні (сітка Ø16/Ø28; крок 25/50/100 мм);
- суцільні шліфовані плити (високоточні, з малою гнучкістю кріплення);
- з Т-пазами (сумісні зі стандартними машинобудівними притисками);
- решітчасті/прорізні (полегшені, кращий відвід бризок);
- комбіновані (перфорація + Т-пази + нуль-точка).

За призначенням: універсальні; спеціалізовані (під конкретний виріб); метрологічні/калібрувальні.

За кінематикою: фіксовані; регульовані по висоті/нахилу; позиціонери (поворот/оберт).

За мобільністю: стаціонарні (анкерування, демпфери); мобільні (колеса, домкрати).

За матеріалом та покриттям: сталь/чавун/алюмінієві сплави; нормалізація, відпуск, нітрування; антипригарні та корозійностійкі покриття.

За навантажувальною групою: легкі (до ~0,3–0,5 т), середні (до ~2–3 т), важкі (>3 т).

За рівнем модульності: безсіткові; сітка отворів (типові системи Ø16 або Ø28); системи нуль-точки (quick-change).

1.2 Огляд сучасних конструкцій зварювальних столів

Столешні зварювальних столів поділяються на декілька видів(рис. 1.1):

1. **Перфоровані модульні** — найбільш універсальні. Плита з каліброваною сіткою, фасками; екосистема кутників/упорів/призм/затискачів; швидка переналаджованість.
2. **Суцільні шліфовані** — максимальна площинність і жорсткість; менша універсальність оснащення; доцільні для важких та високоточних збірок.
3. **Т-пазові** — гнучке розміщення стандартних притискачів, висока стійкість, зручні для «важких» пристроїв.
4. **Решітчасті/прорізнi** — зниження маси, кращий тепловідвід і «самоочищення» від бризок.
5. **Комбіновані** — інтеграція перфорації, Т-пазів, поворотних секцій, кабель-каналів та пневмоліній[10].

Типові розмірні ряди та точність

- **Габарити столешні:** 800×600 → 3000×1500 мм (та модульне нарощення довжини).

- **Товщина:** 12–30 мм (важкі столи — товстіші).

- **Площинність:** орієнтовно 0,1–0,3 мм/м (вищі класи — вищі допуски).
- **Сітка:** крок 50/100 мм; діаметри 16 або 28 мм (під відповідні системи оснащення).



Рисунок 1.1 – Огляд типів сучасних зварювальних столів

Ринкові тенденції розвитку зварювальних столів:

- Перехід до **екосистем**: столи + бібліотеки 3D-компонентів, каталоги оснащення;
- вбудовані **реперні елементи** для роботів, маркування сітки для швидкого калібрування.
- акцент на **антипригарних покриттях**, **нітруванні** зони перфорації, захисті від корозії.

- **інтеграція сервісів:** пневмо/електро/вакуум-канали, кабель-менеджмент, точки заземлення.
- Зростання частки столів із **регулюванням висоти/нахилу** та модульними позиціонерами.

1.3 Аналіз конструктивних рішень модульних систем

Розглянемо характеристику робочої поверхні зварювального столу:

- **Матеріали:** сталі (часто середньовуглецеві) або чавун з термообробкою (нормалізація/відпуск) для зняття внутрішніх напружень.
- **Обробка поверхні:** шліфування; нітрування для підвищення твердості; антипригарні склади для зниження налипання брызок; можливе фосфатування/оксидування.
- **Перфорація:** точні отвори з фаскою; інколи різьбові втулки для гвинтових елементів; допуски посадок під штифти.
- **Рєбриста схема** підплитної частини з «направленими» ребрами для підвищення жорсткості без значного росту маси.
- **Теплові компенсатори:** прорізи/зазори для зменшення короблення від локального нагріву.

Опорна рама та вузли опор:

- **Секційна зварна рама** з рівномірним рознесенням ребер; вузли посилення під центрами маси виробів.
- **Опори:** регульовані гвинтові ніжки; **домкрати** для точного виставлення; **колеса** з фіксацією (для мобільних версій).
- **Анкерування/демпфування:** для зниження вібрацій, особливо при роботі позиціонерів або при ударах притисків.

Оснащення та інтерфейси:

- **Локатори** і **штифти** (циліндричні/конічні), **упори** (лінійні/кутові/призматичні), **притиски** (механічні/екцентрикові/пневмо), **розпірні модулі**;

- **Система нуль-точки:** швидка заміна пристроїв із повторюваністю позиціонування на рівні $\pm 0,02 \dots 0,05$ мм (орієнтовно);
- **Сумісність:** важливо дотримуватися єдиного «діаметрального стандарту» ($\varnothing 16$ або $\varnothing 28$).

При проектуванні зварювального столу потрібно враховувати прогин поверхні та теплову деформацію через вплив дуги/лазера:

- Розрахункове **локальне тепловкладення** (лазер/дуга) впливає на вибір товщини плити, крок ребер, розміщення опор;
- **Термостійкі покриття** зменшують прилипання та потребу в механічному очищенні (менший ризик «вибивання» геометрії);
- **Схема охолодження/відведення тепла:** природна конвекція, прорізи; у спеціальних рішеннях — канали під продувку.

Електро-пневмоінтеграція та безпека:

- **Вбудовані канали** для пневмозатисків; **розетки, порти датчиків, заземлення;**
- **Кабель-менеджмент:** лотки, направляючі, захист від перетирання;
- **Безпека:** закруглення кромek, антиковзні накладки, захист перфорації, прозорі зони обслуговування для програміста робота.

1.4 Порівняння технічних характеристик і функціональних можливостей

Зварювальні столи характеризуються по деяких функціональних можливостях (таб. 1.1):

1. Площинність/паралельність (стабільність калібрування робота).
2. Жорсткість (мінімізація пружних деформацій під притисками та масою виробу).
3. Модульність (швидкість переналагодження, уніфікація оснастки).
4. Повторюваність позиціонування (з нуль-точкою/штифтами).
5. Термостійкість і довговічність (покриття, обробка).
6. Інтеграція сервісів (пневмо/електро/вакуум; кабелі; заземлення).
7. Ергономіка і безпека (регулювання висоти, захист кромek, зони доступу).

8. Вартість володіння (COS: закупівля + оснастка + обслуговування + простой на переналагодження).

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика параметрів зварювальних столів

Тип столу Параметр	Перфорований модульний	Суцільний шліфований	З Т-пазами	Решітчастий	Комбінований
Площинність/ жорсткість	Висока	Дуже висока	Висока	Середня	Висока
Переналагодження	Дуже швидко	Повільне	Середнє	Середнє	Швидко
Інтеграція з роботом	Відмінна (репери, нуль-точка)	Середня (індив. оснастка)	Хороша	Середня	Відмінна
Термостійкість/ очищення	Висока/ зручне	Висока/ помірне	Висока/ помірне	Середня/добре	Висока/зручне
Вартість володіння	Середня– висока	Висока	Середня– висока	Середня	Висока
Типові задачі	Серія/ дрібносерія, роботизація	Важкі/ високоточні вузли	Жорстке кріплення пристроїв	Великогабарит/ польові умови	Гнучкі роботлінії

Аналізуючи характеристику параметрів зварювальних столів найкращим варіантом є **комбінований** стіл, але він дорожчий у використанні, тому кращим типом буде **перфорований модульний** зварювальний стіл.

1.5 Вимоги до зварювальних столів для роботизованих систем

Для інтеграції робота стіл повинен відповідати таким вимогам:

Геометрична точність і стабільність

- Площинність робочої поверхні не гірше 0,1...0,3 мм/м (для високої точності — вище);
- Паралельність/перпендикулярність елементів (кутників/упорів) узгодити з точністю калібрування робота;
- Стабільність у часі: термообробка плити/рами, компенсація залишкових напружень, ребра жорсткості.

Узгодження з базовою системою координат робота

- Реперні точки (механічні/оптичні) у відомих координатах; маркування сітки;

- Орієнтація осей столу (X/Y) співпадає з базою маніпулятора;
- Бібліотека CAD-моделей столу/оснащення для офлайн-програмування.

Модульність і повторюваність

- Нуль-точка з повторюваністю до $\pm 0,02 \dots 0,05$ мм;
- Стандартизовані штифти/локатори;
- Швидкознімні вузли для скорочення простоїв на переналагодження.

Механічна міцність і демпфування

- Розрахунок на статичні (маса виробу, притиски) та динамічні (маніпулювання, позиціонери) навантаження;
- Оптимальна товщина плити (12–25+ мм для середніх/важких завдань), раціональна ребристість;
- Демпфери/анкерування для зниження вібрацій.

Термостійкість і довговічність

- Нітрування/індукційне зміцнення зони перфорації;
- Антипригарні покриття, що витримують регулярне очищення;
- Конструктивний захист перфорації від налипання.

Інтеграція сервісів і безпека

- Канали пневмо/електро/вакуум, заземлення, розетки, порти датчиків;
- Кабель-менеджмент, захист від заземлення;
- Взаємодія з огороженнями, світловими бар'єрами, сканерами зони;
- Ергономіка: регулювання висоти, доступність зони швів для програмування/обслуговування.

Висновок до підрозділу:

У підсумку, зварювальний стіл є ключовою ланкою технологічного ланцюга, що визначає стабільність геометрії, повторюваність базування та якість зварних з'єднань, а у випадку роботизованого зварювання — ще й узгодження просторових координат і надійність калібрування траєкторій[6]. Порівняльний аналіз показав, що на ринку сформувалися кілька конструктивних платформ (перфоровані модульні, суцільні шліфовані, Т-пазові, решітчасті та комбіновані), з яких перфоровані модульні та комбіновані рішення забезпечують найкращий

баланс між жорсткістю, точністю й швидкістю переналагодження, а також найповнішу готовність до інтеграції із системами нуль-точки, реперними елементами та сервісними інтерфейсами. Встановлено критичні вимоги до столів для роботизованих комплексів: забезпечення площинності на рівні технологічного допуску, повторюваність позиціювання оснастки, термостійкість і довговічність робочої поверхні, раціональна ребриста опорна структура, інтегровані канали пневмо та електроживлення, засоби безпеки та ергономіки.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СТОЛІВ З РОБОТИЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ

2.1 Умови інтеграції зварювальних столів з роботизованими системами

Інтеграція зварювального стола з роботизованою системою повинна забезпечувати стабільну геометричну базу процесу, скорочення часу переналагоджень і підвищення рівня безпеки та ергономіки робочої комірки. Для досягнення цих цілей необхідно спочатку визначити цільові показники якості та продуктивності з урахуванням номенклатури виробів, після чого слід сформулювати технічні вимоги до стола, оснастки, робота, комунікацій і систем безпеки. Очікуваним результатом є підтримання площинності робочої поверхні на рівні не гірше **0,1–0,3** мм на метр[3], забезпечення повторюваності базування пристроїв у межах сотих міліметра, а також стабілізація часу циклу завдяки надійному доступу пальника та мінімізації ручних дій.

На етапі відбору та проектування зварювального стола слід приділити увагу трьом основним характеристикам: **площинності, жорсткості та теплостійкості**. Площинність варто перевірити інструментально й підтвердити актом контролю, оскільки навіть незначні перепади призводять до перекосів оснастки та зміни положення кромки. Жорсткість необхідно оцінити для реального робочого навантаження, що включає масу деталі, притисків і самих пристроїв; при виявленні надмірного прогину слід збільшити товщину плити, змінити крок або конфігурацію ребер жорсткості чи переглянути схему опор. Теплостійкість досягається завдяки грамотному розміщенню ребер, вибору матеріалу та застосуванню змінних накладок у зонах інтенсивного тепловкладення, що дозволяє уникати короблення плити та локальних вм'ятин від бризок.

Для забезпечення швидкої переналагоджуваності доцільно застосовувати модульний формат стола із системою отворів номіналу 16 або 28 міліметрів та типовим кроком 50 чи 100 міліметрів. У постійних реперних отворах потрібно встановити штифти, які не демонтуються під час експлуатації, оскільки саме вони задаватимуть стабільну опорну систему для відтворюваного базування пристроїв і для побудови робочих систем координат робота. Поверхню стола варто захищати від бризок змінними сталевими або мідними накладками, а також антиспаттер-покриттям, щоб зберігати геометричну сталість і сповільнювати знос посадочних місць. Монтаж стола слід виконувати на анкеровані або регульовані опори з перевіреною демпфуванням, при цьому горизонтальність потрібно виставити за рівнем або лазерною системою, а контакт заземлення — підтвердити вимірюваннями опору.

Розміщення робота відносно столу повинно забезпечувати виконання більшості швів у центральній частині робочого об'єму маніпулятора, що зменшує ризик потрапляння в сингулярні положення та полегшує утримання заданих кутів підводу пальника. При компоновці слід переконатися, що в усіх критичних точках траєкторій забезпечується можливість підтримувати тягнучий або штовхаючий кут у межах, рекомендованих технологією (як правило, 10–20 градусів), і що корпус робота та кабель-пакет не заважають рухам. За наявності недоступних швів або необхідності стабілізувати положення «нижнього шва» варто розглянути використання одновісного або двовісного позиціонера з подальшою синхронізацією його осей із програмою робота. Маршрут кабель-пакета слід спроектувати через центральну вісь маніпулятора або верхню підвіску з енерголанцюгом, забезпечивши нормативні радіуси вигину та зняття навантаження на утримувачах, щоб уникнути паразитних сил на пальнику.

Оснастку необхідно створювати відповідно до принципу 3–2–1, що дозволяє надійно фіксувати всі шість ступенів свободи деталі та гарантувати повторюваність установа[7]. Для цього слід застосовувати сумісні з модульною системою отворів штифти, призми, упори, ексцентрики притиски та інші стандартні елементи, а також передбачити засоби компенсації

термодеформацій, зокрема правильну послідовність прихваток і швів та розміщення притисків у зонах, що протидіють жолобленню. Для зниження ризику помилок під час переналагоджень варто впровадити елементи Poka-Yoke та ідентифікацію модулів за допомогою кольорового кодування і QR-міток.

Калібрування систем координат потрібно виконувати в послідовності від інструмента до бази: спочатку слід відкалібрувати ТСП зварювального пальника за чотирьох- або шеститочковою методикою, після цього треба побудувати робочу базу на столі за трьома реперними точками, закріпленими у фіксованих отворах, а потім перевірити точність проходження контрольних траєкторій і зафіксувати коригування. У разі застосування візуальних систем або лазерних профіляторів потрібно виконати hand-eye калібрування, яке зв'яже систему координат сенсора з координатами робота, і налаштувати адаптивні функції на кшталт дотикового пошуку кромки перед стартом та слідування за швом на довгих ділянках[6]. Такий підхід дозволяє автоматично компенсувати дрібні похибки базування й геометричні відхилення заготовок.

Технологічні режими зварювання слід формалізувати у вигляді WPS, де мають бути визначені струм, напруга, швидкість подачі дроту, склад захисного газу, винос і нахил пальника, радіуси входу та виходу зі шва, а також пауза на закриття кратера. Для типових геометрій кромки доцільно підготувати бібліотеку шаблонів траєкторій, що зменшує час програмування та ризик людської помилки. Якщо виробнича ситуація дозволяє, варто застосовувати імпульсний режим або підвищені швидкості подачі для зменшення тепловкладення та ризику деформацій за умови збереження вимог до якості.

Питання безпеки та димовидалення необхідно вирішити до етапу налагодження програм. Огорожі, сканери зон, міжблокування та аварійні зупинки мають відповідати вимогам безпеки, а режими навчання повинні обмежувати швидкість і потужність. Систему димовидалення потрібно організувати таким чином, щоб вона ефективно відводила аерозолі, не впливаючи на стабільність дуги; для цього допускається використання щілинних зон відсмоктування в стільниці або локальних витяжних насадок на горловині

пальника. Електромагнітну сумісність слід забезпечити шляхом розділення сигнальних і силових кабелів та перевіркою якості заземлення столу і джерела зварювання.

Зменшення деформацій виробу досягається завдяки симетричній послідовності зварювання, раціональному рознесенню тепловкладення, застосуванню мідних підкладок під шов та локальних стяжок у пристрої. Для великогабаритних конструкцій доцільно організовувати складання через окремі підзбирання з проміжним контролем геометрії, що знижує ризик накопичення похибок і спрощує виправлення.

Система контролю якості повинна включати визначення ключових показників ефективності, серед яких відхилення геометрії, параметри валика, наявність дефектів, час циклу та інтегральний показник завантаження обладнання. Для оперативного контролю слід передбачити контрольні точки прямо в оснастці у вигляді шаблонів і калібрів, а також організувати запис технологічних параметрів дуги для статистичного відслідковування. Періодичні перевірки площинності стола, стану отворів і контакту заземлення мають проводитися за графіком, а підсумковий «бюджет похибок» слід переглядати щоразу, коли змінюється номенклатура або режими, аби вчасно виявляти фактори, які підводять сумарну похибку до межі допуску[3].

Експлуатацію слід організувати за регламентом, що передбачає регулярне очищення поверхні від бризок, огляд і заміну захисних накладок, підтягування анкерів, контроль цілісності кабель-пакета та перевірку якості заземлення. Планово-попереджувальні роботи доцільно прив'язувати до напруцювання дуги або кількості циклів, щоб уникати позапланових простоїв.

Економічне обґрунтування конфігурації має ґрунтуватися на порівнянні варіантів «модульний стіл без приводів» та «стіл із позиціонерами». У разі якщо більшість швів доступні без переверотів і забезпечують задану якість у вертикальних або горизонтальних положеннях, раціонально залишатися на модульному столі як на більш гнучкому та дешевому рішенні. Якщо ж стабільне

«нижнє положення» шва значно покращує якість і зменшує брак, доцільно впроваджувати позиціонери, попередньо оцінивши окупність через фактичну економію часу циклу і зниження відсотка переробок.

Порядок впровадження інтеграції повинен передбачати поетапне виконання робіт: спочатку формується технічне завдання з урахуванням геометрії виробів, матеріалів і допусків; далі виконується компоновка комірки із забезпеченням зон безпеки, підведенням енергетичних комунікацій і димовидалення; після цього проєктуються та виготовляються пристрої з урахуванням модульної системи та контрольних точок; наступним кроком проводяться перевірки площинності, жорсткості, анкерування та заземлення; потім інтегруються електрика, PLC і польові мережі; далі здійснюється калібрування ТСП та робочої бази, налаштовуються сенсорні функції; завершальними діями стають тестові проходи, валідація якості на еталонних деталях, корекція програм і оформлення стандартних операційних процедур з подальшим навчанням персоналу та запуском у серійний режим із постійним моніторингом KPI.

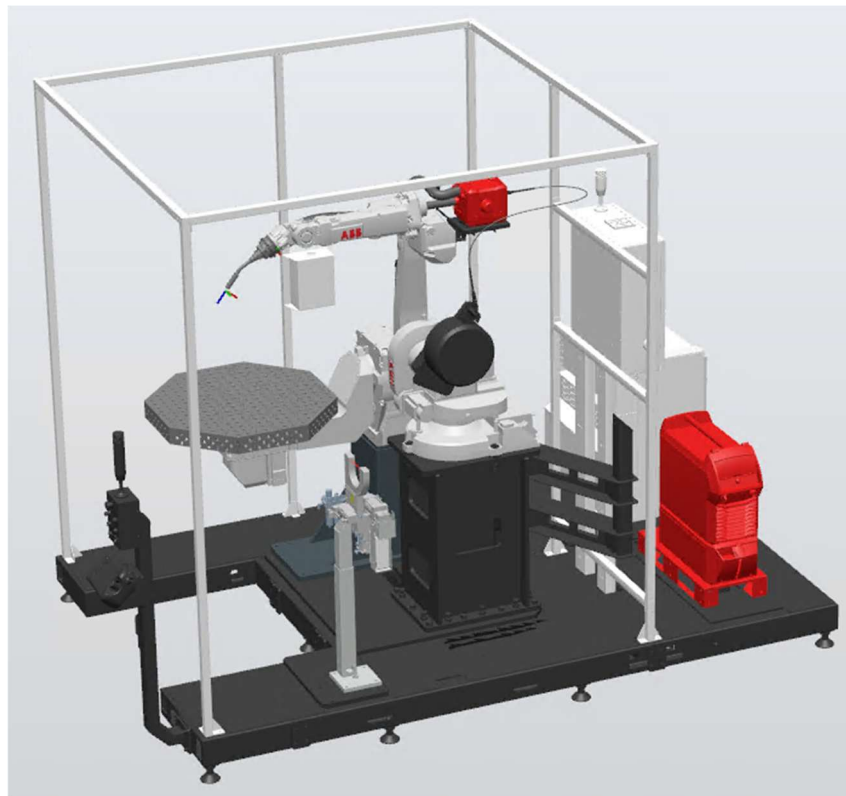


Рисунок 2.1 – Комплекс роботизованого зварювання

Застосування описаної послідовності дій дозволяє перетворити зварювальний стіл на надійний опорний елемент роботизованої комірки, який забезпечує геометричну стабільність, повторюваність процесу й обслуговуваність системи, а також створює умови для прогнозованої якості зварних з'єднань і економічно обґрунтованої продуктивності (рис 2.1). Якщо потрібна адаптація під конкретні вироби, достатньо додати їхні габарити, маси, матеріали та вимоги до швів, після чого наведені норми та параметри легко конкретизуються до рівня готових WPS, SOP і графіків обслуговування.

2.2 Конструктивне рішення

Подане мною рішення являє собою модульний зварювальний стіл із секційною стільницею на жорсткій рамній опорі з чотирма регульованими ніжками (рис. 2.2). Робоча поверхня набрана з окремих модульних плит, згрупованих у чотири більші квадранти з технологічними зазорами між ними; така сегментація спрощує транспортування, термокомпенсацію й локальну заміну зношених елементів. Кожна плита має регулярну сітку базових отворів під встановлення оснастки: D16H7 поєднані з допоміжними прохідними (під притиски та упори), а розкладка виконана з кроком, прийнятним для модульних систем 100 мм.

Поверхня плит вирівняна в одну площину, а по периметру сегментів залишено невеликий зазор 20 мм, який працює як температурний компенсатор і водночас дає можливість інтегрувати щільне відсмоктування диму (рис 2.3).

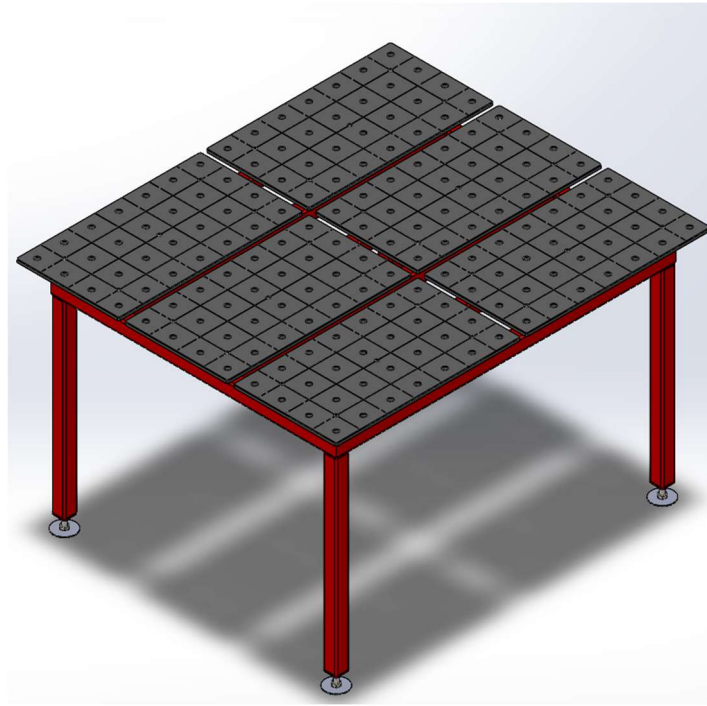


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд зварювального столу

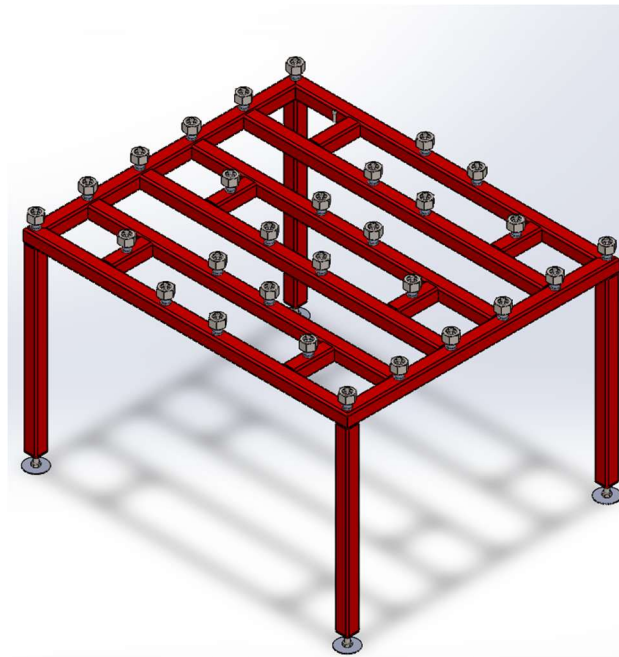


Рисунок 2.3 – Схема кріплення стільниці до рами

Стільниця опирається на регулювальні вали які безпосередньо опираються прямокутну раму з замкнених профілів, які утворюють контур і поперечні балки під кожним квадрантом (рис. 2.4). Підплитні ребра розміщені так, щоб проліт між опорами плит був мінімальним і прогин під робочим навантаженням

залишався у допуску. Рама передає навантаження на чотири ніжки зі сталевих профільних труб, внизу встановлені різьбові регулювальні опори з широкими п'ятами для точного виставлення по рівню та компенсації нерівностей підлоги; конструкція ніжок передбачає як роботу на опорах, так і можливість анкерування до фундаменту через приховані пластини. В місцях кріплення плит до рами передбачені регулювальні гвинти/шайби для тонкого «зведення» площини, а фіксація виконана прихованими болтами з доступом зверху через сервісні отвори, що не порушують модульну сітку.

Функціонально стіл орієнтовано на швидкий монтаж універсальних пристосувань: точні базові отвори працюють зі штифтами для повторюваності, різьбові дозволяють встановлювати упори, призми, ексцентрики та гвинтові притиски, а по двох незнімних отворах, закладених у фіксованих позиціях різних квадрантів, формуються постійні реperi для побудови робочої системи координат робота. Конструкція передбачає підключення заземлення коротким низькоомним шляхом безпосередньо до стільниці; на внутрішній стороні рами винесено клему «маси», щоб струм не йшов через підшипники чи шарніри периферії. Робочі плити рекомендовано виготовляти з конструкційної сталі (наприклад Сталь 40) товщиною, достатньою для обмеження прогину (типово 12–20 мм для дрібно-середніх виробів), з подальшою механічною обробкою під площинність і нанесенням антиспаттер-захисту; у зонах інтенсивних швів доцільно застосовувати змінні накладки або мідні підкладки.

З точки зору сервісу рішення дозволяє локально розбирати лише пошкоджений сегмент, не знімаючи всю стільницю, а відкриті зазори між квадрантами спрощують чистку від брызок. Компоновка з чотирма опорами залишає повний доступ під столом для прокладання кабель-лотків, газу та, за потреби, інтеграції нижнього каналу витяжки. У підсумку конструкція поєднує високу ремонтпридатність, повторюваність базування оснастки й достатню жорсткість при помірній масі, а модульність і реперні точки роблять її придатною для прямої інтеграції з роботизованою коміркою та процедур калібрування.

2.3 Обґрунтування параметрів зварювального столу

Модульна плита розміром 680×380×12 мм (рис. 2.5) призначена для формування секційованої робочої поверхні зварювального столу та забезпечує повторюване базування оснащення під час ручного й роботизованого зварювання. Обраний габарит є зручним для компоновки поля: плиту легко комбінувати в різних розкладках без підрізок, а маса заготовки з конструкційної сталі становить близько 24 кг, що дозволяє виконувати монтаж і заміну силами одного-двох працівників без застосування підйомних засобів. Товщина 12 мм забезпечує достатню жорсткість за типовими експлуатаційними навантаженнями; при опорі на кілька балок рами прогини залишаються в межах технологічно прийнятних значень і не впливають на точність позиціонування виробу та оснастки.

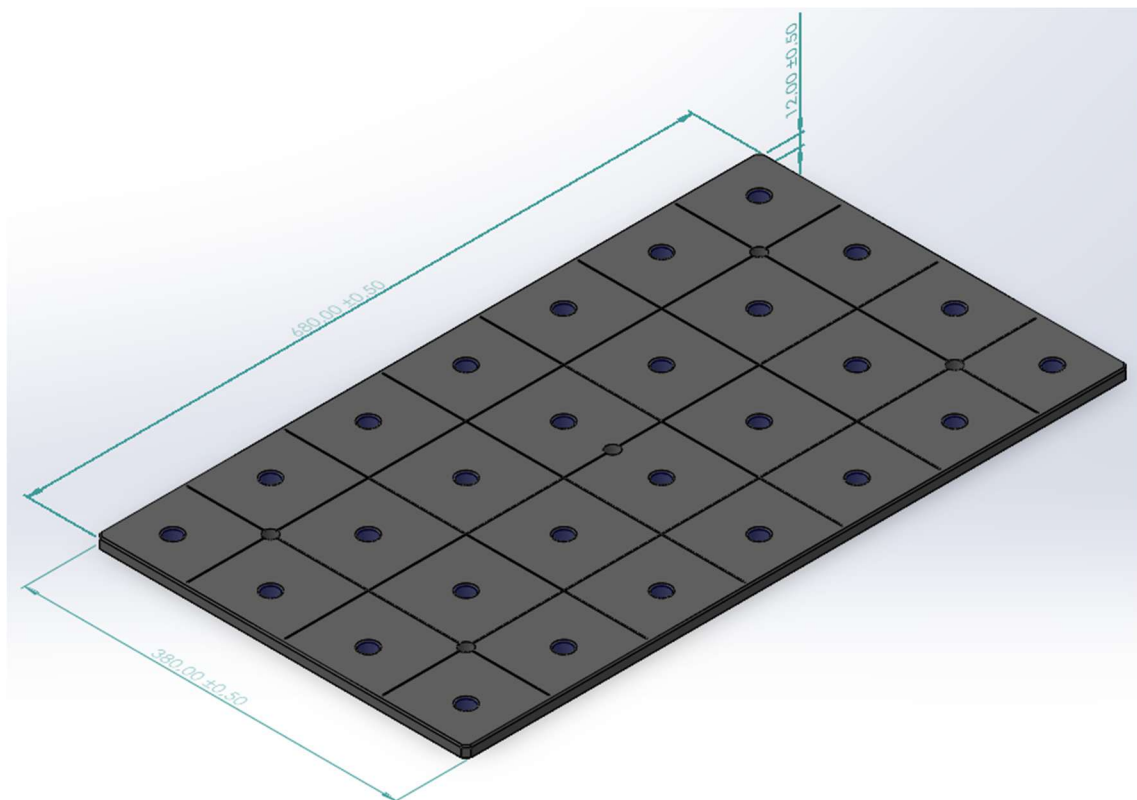


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд модульної плити

На поверхні плити виконана регулярна сітка отворів діаметром 16 мм із кроком 100×100 мм. Така геометрія підтримує сумісність зі стандартними штифтами, упорами та швидкозатискачами, забезпечує швидке переналагодження робочого місця та, на відміну від густішої сітки, не надмірно послаблює переріз плити, що позитивно позначається на довговічності й жорсткості. Крайові відступи витримані таким чином, щоб зберегти міцність кромки і уникнути локальних деформацій при дії притисків. Для зручності введення елементів і захисту від задирок на всіх отворах виконані технологічні фаски; вони полегшують установку штифтів і болтів, знижують ризик заминів, поліпшують відведення бризок та мінімізують концентратори напружень у приповерхневому шарі.

Плита має нанесену позиційно-координатну розмітку з позначенням реперних точок, що пришвидшує налаштування оснащення й слугує візуальним інтерфейсом для калібрування роботизованої системи відносно базової системи координат столу[1]. Завдяки цьому програміст робота однозначно відтворює положення пристроїв між змінами партій, а оператор отримує інструмент для швидкої перевірки симетрії, повторюваності та відповідності технологічним картам. Розмітка виконується методом лазерного гравіювання або стійкого маркування, не заважає очищенню та зберігає читабельність упродовж тривалої експлуатації.

Матеріалом плити доцільно обрати сталь 40 або сталь 45 після нормалізації, що гарантує стабільність геометрії та добрі показники зносостійкості. Фінішна механічна обробка з доведенням площинності до 0,10–0,15 мм/м забезпечує необхідний рівень точності для роботизованого зварювання, а локальне хіміко-термічне зміцнення зони отворів і нанесення антипригарного покриття зменшують налипання бризок і спрощують регулярне обслуговування. По периметру плити виконано фаску, що усуває гострі кромки, підвищує безпеку роботи, покращує адгезію захисних покриттів і знижує ризик корозійного підриву на краях.

Монтаж плити в склад столу здійснюється через з'єднання з регульовальними вісями які приварені до поздовжніх балок та поперечних перемичок рами з послідовністю затягування від центра до країв, що запобігає втягуванню площини. Між сусідніми модулями витримується компенсаційний зазор 20 мм. для температурної стабільності та зручного демонтажу. У підсумку така плита є раціональним модулем збірної поверхні: вона поєднує достатню жорсткість і помірну масу, надає гнучке поле базування зі стандартним інтерфейсом Ø16 при кроці 100 мм, підтримує швидке переналагодження оснащення, відповідає вимогам безпеки та забезпечує повторюваність, необхідну для надійної інтеграції з роботизованими системами зварювання.

Стільниця складена з модульних плит розкладених у сітку 2×3. Під них рама утворює просторову «ґратку» з кроками приблизно **200 мм** у довжину та **150 мм** у ширину. Така розбивка різко зменшує вільний проліт як для плит, так і для підплитних профілів: деформації масштабуються як L^4 , тому перехід від метрових прогонів до 0,34–0,38 м. зменшує прогини в ~50–120 разів.

Щоб не «з'їдати» бюджет точності, локальний прогин у зоні базування має бути $\leq 0,05\text{--}0,10$ мм. Оцінимо консервативно як балку-стрічку по коротшому прольоту $L=0,38$ м (гірший випадок), при рівномірному навантаженні q (Н/м²):

$$\delta_{max} \approx \frac{5\omega L^4}{384 EI}, \omega = q \cdot b, I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.1)$$

де: $b = 0,68$ м. $h = 0,012$ м. $E \approx 210$ ГПа.

Для робочого навантаження $q = 5$ кН/м² (≈ 500 кг/м²) отримуємо що

$\delta \approx 0,045$ мм.

Для $q = 10$ кН/м² — $\delta \approx 0,090$ мм.

Тобто плита **12 мм.** на осередку 380×680 мм. утримує наш цільовий діапазон прогину $\leq 0,1$ мм. при доволі високих рівномірних навантаженнях. Граничне рівномірне навантаження до $\delta = 0,1$ мм. — орієнтовно **11 кН/м²**, що для однієї плити (площа 0,258 м²) дає $\approx 2,9$ кН (**~ 290 кг**) розподілено. (коефіцієнт $\approx 1,3\text{--}1,6$ до цієї простої оцінки).

Регулювальні опори під вузлами ґратки дають можливість «звести» площину стільниці після зварювання рами й під час сервісу. Заданий крок 100×100 мм отворів дозволяє винести 2–3 постійні реперні точки (D16H7) для побудови робочої бази робота і повторного відтворення координат після переналадок. Для площинності $\leq 0,2$ мм/м достатньо:

- механічної обробки плит після різання/термообробки;
- регулювання опор на місці;
- перевірки індикатором/лазерним рівнем та фіксації гвинтів.

Вантажопідйомність однієї плити становить ≈ 300 кг розподілено з $\delta \approx 0,090$ мм. Дана конструкція витримує навантаження виріб + оснастка $\approx 600 - 800$ кг.

2.4 Перспективи вдосконалення

У майбутньому планується підняти жорсткість можна зменшенням осередку ґратки до $\sim 300 \times 300$ мм або додаванням однієї поперечини по короткому боці під стиками плит. Корисно поставити центральну «п'яту» — це знижує прогин рами при асиметричному навантаженні. Якщо плануються важчі вироби, доцільно перейти на плити 14–16 мм.

Наступний крок — zero-point система (швидкознімні замки-палети) з базуванням по двох штифтах і затиском одним ексцентриком. Має сенс додати бічні перфоровані планки (вертикальні «борти» 100–150 мм заввишки з тією ж сіткою D16/100×100): на них зручно формувати 3D-конструкцію та упори для високих вузлів.

На двох-трьох плитах можна розмістити маркери типу AprilTag/ArUco, щоб візуально підтягувати координатну базу робота без доторку. Додатково варто встановити недорогі тензодатчики/індикатори перевантаження в опорах, які попереджатимуть оператора про надмірну масу або перекис. Логування «годин дуги» (лічильник на 24 В лінії пальника) автоматизує виробництво.

3 ІНТЕГРАЦІЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТОЛА В РОБОТИЗОВАНУ СИСТЕМУ

3.1 Структура та принцип роботи роботизованої системи зварювання

Роботизована система зварювання — це інтегрований комплекс, у якому механічна підсистема маніпулювання, зварювальне джерело, пристрої базування/фіксації заготовки, датчики, засоби безпеки та програмно-логічне керування утворюють єдину керовану технологічну одиницю. Основою комплексу є робот-кобот **RobotMeta Cobotic MIG Welding RM 1100/4C** (рис. 3.1) з шестиосьовою кінематикою та встановленим зварювальним пальником, джерелом зварювальної дуги є **MetaMIG 270**.



Рисунок 3.1 - RobotMeta Cobotic MIG Welding RM 1100/4C

Він забезпечує просторове позиціонування дуги у точках траєкторії. Базою для точного відтворення геометрії слугує зварювальний стіл з модульними плитами та системою нуль-точки: тут формується робочий об'єкт, прив'язаний до координатної сітки і реперів, що дозволяє багаторазово відновлювати систему координат після зміни оснастки без перенавчання всіх траєкторій. Зварювальне джерело генерує дугу зі заданими електричними параметрами (струм, напруга, синергійні «рецепти», пульс), а контролер робота обмінюється з ним сигналами готовності, «дуга увімкнена/вимкнена», аварійними станами та, за наявності цифрового інтерфейсу, — самими технологічними параметрами. Допоміжні підсистеми включають локальну витяжну вентиляцію, систему подачі захисного газу, охолодження пальника, пневмозатиски оснастки та кабель-менеджмент, що гарантує стабільну роботу шланг-пакета в усьому робочому об'ємі.

Принцип роботи такої системи ґрунтується на чітко визначеному технологічному циклі. Спочатку оператор або подаючий пристрій встановлює заготовку на стіл у пристрої базування; фіксація виконується механічними або пневматичними затискачами, що контролюються кінцевими датчиками «затиснуто/розтиснуто». Далі на пульті обирають програму виробу (послідовність траєкторій і параметрів зварювання) та відповідний «рецепт» джерела. Контролер робота зчитує актуальну матрицю перетворення від бази робота до робочого об'єкта столу, сформовану під час калібрування за реперними точками, а також параметри інструмента (ТСП і орієнтація пальника). Перед стартом система виконує міжопераційні перевірки: готовність джерела, наявність газу[6].

Після дозволу на запуск робота здійснює «холостий» підвід до першої точки без дуги, щоб перевірити колізії і коректність траєкторії, потім ініціює пре-пуск газу, подає команду «дуга ON» і плавно входить у шов із заданими кутами факела (нахил/відворот) та швидкістю подачі. У процесі переміщення контролер синхронно керує параметрами зварювання (струм/напруга/індуктивність/пульс) і рухом ТСП, дотримуючись визначених допусків на відстань до кромки й коливальні рухи, якщо це передбачено технологією. Дані від датчиків

струму/напруги, стану газу, формують зворотний зв'язок, завдяки якому система виявляє аномалії типу «залипання дроту», просідання газу, відсутність дуги або помилки позиціювання; у таких випадках програма виконує безпечну паузу з інструкціями на НМІ або переходить у аварійний сценарій з відключенням дуги та зупинкою рухів.

Після завершення відрізка шва робот виконує відвід із гасінням кратера, пост-пуск газу, проміжне очищення сопла та, за потреби, переміщення до наступної траєкторії. Коли серію швів завершено, система переводиться у стан зупинки з протоколюванням параметрів проходу, а оператор виконує візуальний контроль, може зняти контрольний макрошліф на еталонній деталі та зафіксувати результати у карті процесу. Якщо потрібно замінити оснастку або перейти на інший виріб, комірка переходить у режим блокування енергій: дуга вимкнена, пневмолінії перекриті, рухи робота зупинені. Завдяки нуль-точці та реперній сітці на столі повторне встановлення пристрою базування дає стабільний зсув координат у межах сотих міліметра, тож для відновлення геометрії достатньо швидкої корекції контрольних кадрів замість повного перенавчання.

Система безпеки функціонує як багатоканова надбудова над технологічним циклом. Аварійна зупинка з будь-якого E-STOP негайно відключає дугу і блокує рухи; переводять систему в безпечну зупинку з утриманням положення та виводом на екран процедури відновлення. Програмні «віртуальні стіни» в контролері не дозволяють роботу заходити у заборонені зони — опори столу, витяжні зонди, кронштейни або зони пересування оператора, — а кінематичні обмеження знижують ризик сингулярностей і надмірного скручування шланг-пакета. Усі ці механізми доповнюються регламентами обслуговування: щозмінна перевірка площинності поверхні й чистоти перфорації, підтяжка кріплень плит, тестування аварійних кіл, огляд шланг-пакета та підтвердження працездатності витяжки й датчиків[8].

Таким чином, структура роботизованої системи зварювання — це координована взаємодія механіки, електроніки, джерела зварювання, оснастки та

безпеки, а принцип роботи — це циклічний процес підготовки, калібрування, синхронізованого руху й керування дугою, контролю якості та безпечного перезапуску. Роль зварювального столу полягає у забезпеченні стабільної геометричної бази з повторюваними реперами, що радикально скорочує час переналагодження і забезпечує відтворюваність, а роль робота RobotMeta Cobotic MIG Welding RM 1100/4C — у точному, передбачуваному маніпулюванні пальником з мінімізацією людського фактора і гарантованою якістю швів у серійному виробництві.

Таблиця 3.1

Технічна характеристика робот-кобот RobotMeta Cobotic MIG Welding RM 1100/4C:

Параметр	Значення
Кількість осей	6 осей (J1–J6)
Робочий радіус (досяжність)	1100 мм
Максимальна навантаження на маніпулятор	3,5 кг
Повторюваність позиціонування	$\pm 0,02$ мм
Максимальна швидкість руху осей	J1–J4 до 180°/с; J5–J6 до 200°/с
Клас захисту	IP 54 (зовнішній захист)
Температурний діапазон роботи	0 °C ... +50 °C
Монтаж	Підлога / стіна / стіл (декілька варіантів)
Пульт керування / контролер	Контролер RMC 201; навчальний пульт із сенсорним екраном 8", стилусом (для певної версії)

Завдяки радіусу 1100 мм і навантаженню 3,5 кг, зварювальний стіл має бути розрахований таким чином, щоб забезпечити доступ до всіх положень в межах охоплення без перевантаження робота.

Повторюваність $\pm 0,02$ мм дає уявлення про точність, якої слід досягти: конструкція стола повинна мати жорстку основу, мінімальні переміщення і коливання, щоб не погіршити точність зварювання.

Монтажні варіанти (підлога/стіна/стіл) означають, що розміщення стола повинно враховувати можливі точки кріплення, доступ до кабелів, поворотні підстави, позиціонери чи поворотні столи.

3.2 Узгодження координатної системи стола та маніпулятора

Узгодження координат — це процедура, за якої геометрія робочої поверхні столу з її позиційною розміткою та реперами однозначно прив'язується до внутрішніх систем відліку маніпулятора, аби програма зварювання оперувала реальними просторовими координатами без систематичних зсувів[9]. У контролері робота базовою вважають світову або фундаментну систему координат, пов'язану з основою маніпулятора, тоді як для зручності програмування вводять робочий об'єкт, який геометрично «сидить» на поверхні столу; у нашій комірці нуль робочого об'єкта розміщують у куті модульної плити, а осі X і Y узгоджують із гравійованою сіткою 100×100 мм (рис. 3.2). Інструментальна система координат інструмента визначається через точку TSP і орієнтацію пальника; саме вона використовується для формування траєкторій, кутів факела і відстаней до кромки. Формально узгодження зводиться до обчислення матриці перетворення між базою робота та робочим об'єктом і до коректного вимірювання TSP, що дозволяє контролеру переводити всі програмні точки у реальні положення в просторі.

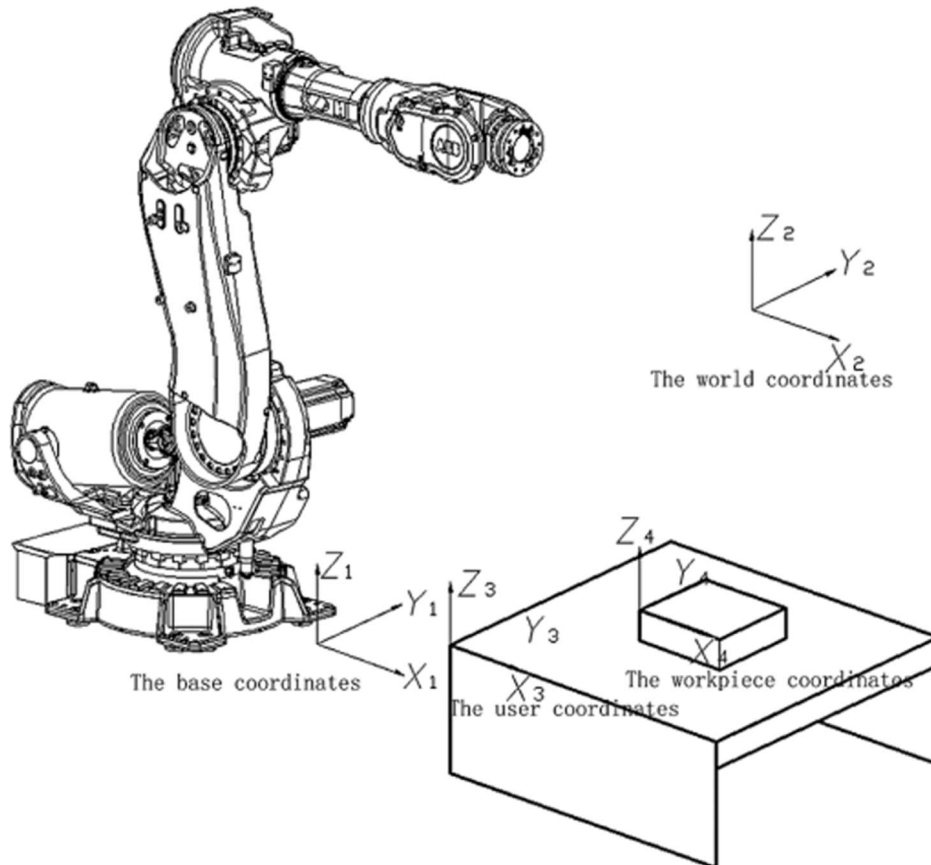


Рисунок 3.2 – Системи відліку робота, стола та деталі

Практична процедура починається з підготовки поверхні: стіл виставляють у рівень із допуском на площинність, очищують перфорацію та реперні отвори Ø16 мм і перевіряють, щоб позиційні мітки були читабельними. Далі на плиті встановлюють дві-три калібровані втулки у вузлах сітки, які служать реперними маяками для подальших вимірювань. ТСР пальника визначають багатоточковим методом на еталонному штифті або кульці, після чого перевіряють орієнтацію інструмента за кутами нахилу й відвороту, аби реальний факел відповідав програмним кутам. Визначення робочого об'єкта виконують за класичною схемою трьох точок: дві точки формують напрям осі X уздовж розмітки плити, третя фіксує напрям Y та нормаль до площини, завдяки чому контролер обчислює положення і орієнтацію площини столу відносно бази робота. На завершення виконують короткий дотик контрольних кадрів у різних кутах плити; якщо розбіжність між виміряними і номінальними координатами перевищує десяті частки міліметра, роблять корекцію робочого об'єкта або повторюють визначення ТСР.

TCP (Tool Center Point) — це опорна точка інструмента робота, відносно якої обчислюються траєкторії та кути орієнтації. Для зварювального пальника TCP зазвичай розташована на кінці сопла (або у віртуальній точці на осі дуги на заданому вильоті дроту).

Щоб узгодження залишалось стабільним між партіями, використовують нуль-точку оснастки та постійні реперні втулки у фіксованих вузлах сітки. Після кожної заміни пристрою базування оснастку повертають на нуль-точку, знімають два-три контрольні виміри за тими самими реперами і, якщо зсуви відрізняються від нуля в межах сотих міліметра, оновлюють робочий об'єкт через вектор зміщення без повного перенавчання траєкторій. Такий підхід мінімізує час переналагодження та гарантує відтворюваність положень, оскільки сукупна похибка складається з повторюваності нуль-точки, точності сітки плити, похибки вимірювання TCP і термодеоформацій від зварювального циклу. Для зменшення помилок вводять прості правила: калібрування виконувати на «теплому» столі після короткої стабілізації, динамічні шви з великим тепловкладенням планувати від центра до країв, а контрольні кадри розміщувати ближче до місць, де критичні геометричні допуски. Корисно вести «бюджет похибок», у якому окремо оцінюють внесок кожного джерела — повторюваності нуль-точки, площинності плити, точності вимірювань і пружних прогинів — і встановлюють граничні значення корекцій, після яких вимагається повне переузгодження.

Метод прив'язування робота до координатної сітки столу потрібно робити так, щоб захопити максимальну робочу площу столу. Зображено два методи фіксації робота: 1 – фіксація за площиною столу (рис. 3.3) – робот не використовує всю площину столу; 2 – фіксація на самому столі (рис. 3.4) – робот використовує максимально площу столу, але створює неробочу зону зварювання. Тому в даному випадку найкращий варіант це – фіксація робота на самому столі, це дає можливість максимально використовувати площу стільниці.

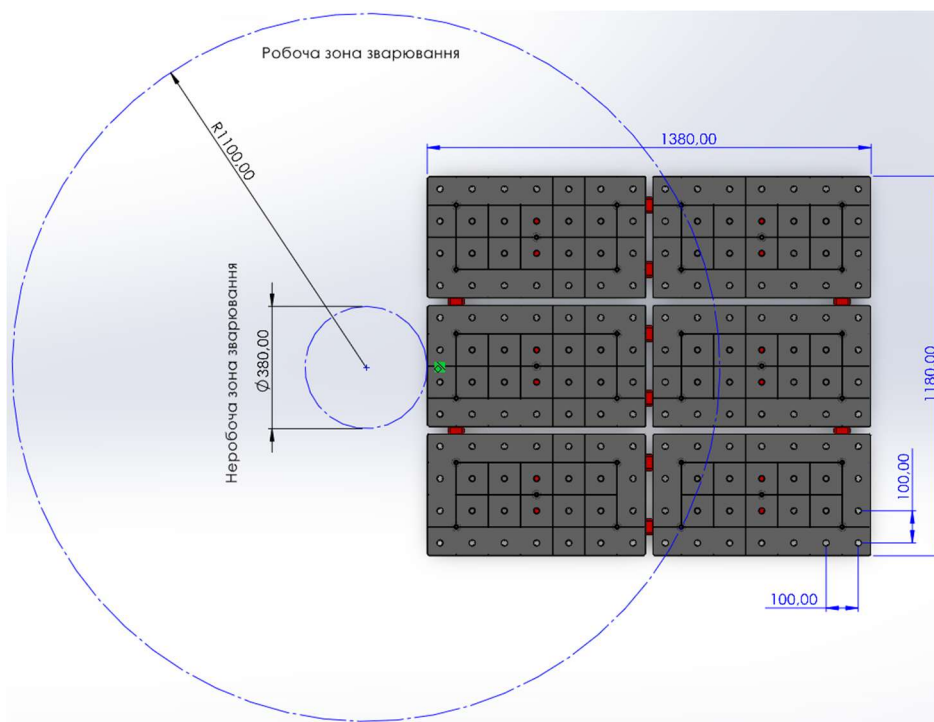


Рисунок 3.3 – Фіксація робота за межами столу

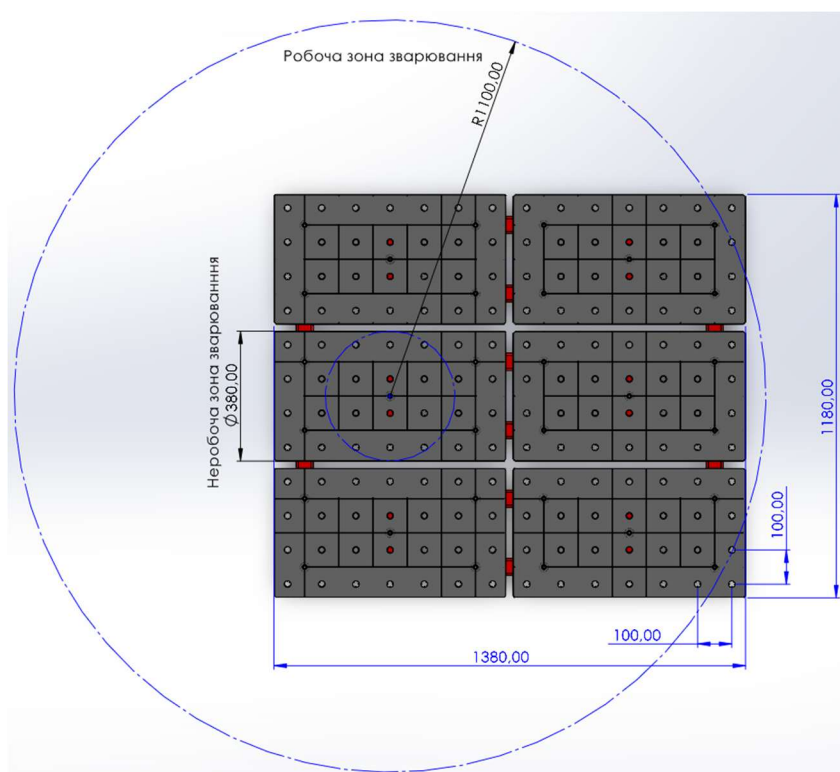


Рисунок 3.4 – Фіксація робота на столі

З погляду експлуатації найчастішими причинами дрейфу координат стають мікрозсуви кріпильних гвинтів плит, засмічення перфорації брызками, що перешкоджає повному осіданню оснастки, і нераціональні траси кабель-пакета,

які створюють момент на фланці й тягнуть ТСР. Тому технічні регламенти містять щозмінну перевірку чистоти реперів, підтяжку болтів за схемою від центра до країв, швидкий контроль площинності щупом і періодичну валідацію робочого об'єкта за еталонною рамкою точок. За наявності оптичних або контактних датчиків висоти корисно включати у програму коротку рутину авто-підстроювання в критичних зонах; це не замінює узгодження, але підвищує стійкість процесу до невеликих зсувів.

У підсумку узгодження координатної системи столу та маніпулятора — це керована послідовність дій з вимірювання ТСР, побудови робочого об'єкта на плиті за реперними точками та впровадження процедур швидкої корекції після заміни оснастки. Правильно виконане узгодження перетворює позиційну розмітку столу на надійний «геодезичний» каркас для програмування швів і забезпечує, щоб будь-яка програмна точка зварювання, записана відносно сітки 100×100 мм, точно відповідала реальній точці в просторі незалежно від циклів обслуговування та повторних складань.

3.3 Сумісність із системами автоматичного позиціонування

Сумісність із системами автоматичного позиціонування у контексті модульного зварювального столу та робота RM 1100/4C означає, що геометрія поверхні, інтерфейси оснастки й сенсорні канали дозволяють відтворювати та безперервно визначати положення виробу/приспособи у робочій системі координат робота без повного перенавчання траєкторій. Базою сумісності виступає модульна площа зі сіткою Ø16 мм кроком 100×100 мм, позиційною розміткою та нуль-точками: ця «геодезична» сітка забезпечує механічний інтерфейс для швидкознімних плит і касет із повторюваністю на рівні сотих міліметра, а гравірування координат і реперні втулки — швидке відновлення робочого об'єкта у контролері. На рівні механіки стіл підтримує щонайменше три класи систем авто-позиціонування:

1. Механічні (quick-change/zero-point із циліндричними посадками й штифтами);
2. сенсорні (дотичні щупи, індуктивні/оптичні датчики краю, лазерні маркери);
3. візійні (камери/мітки AprilTag, QR-мітки, 2D-код на плиті).

Механічний клас дає найвищу повторюваність базування оснастки; сенсорний — дає швидку «довідкалібровку» критичних ребер/отворів перед швом; візійний — додає гнучкість для варіативних заготовок і автоматичного зсуву програми під фактичну геометрію.

Принцип інтеграції такий: нуль-точка фіксує пристосування на плиті у відомих координатах сітки; контролер робота зберігає матрицю, а сенсорна рутинна (щуп/камери) у разі потреби вимірює кілька контрольних елементів виробу та обчислює корекцію зсуву/повороту робочого об'єкта без зміни власне траєкторій. Для цього на столі передбачені чисті реперні отвори Ø16 та помітні маркери осей X/Y; їх використовують як «еталонні точки» при автоматичному макросі налаштування[8]. Кінцеві вимикачі вводять дискретні сигнали «затиснуто/розтиснуто» у контролер, що дозволяє не лише підтверджувати стан фіксації, а й прив'язувати запуск сенсорної підрутини до надійного механічного базування. Візійні системи працюють із маркованими полями на плитах: камера визначає позу маркера ($x, y, z, \varphi, \theta, \psi$) відносно ТСР, після чого контролер коригує положення робочого об'єкта; таким чином навіть при невеликій похибці механічної посадки або теплових деформаціях програма «сідає» на фактичну геометрію. Для тонколистової продукції корисною є комбінація: механічна нуль-точка + короткий «edge-find» двох-трьох ребер щупом або лазером; це дає стабільне базування та швидку компенсацію дрібних перекосів.

Електрично/логічно сумісність забезпечується наявністю у столу й оснастки стандартизованих інтерфейсів I/O: дискретні DI/DO для станів затисків, аналогові або цифрові канали для щупів, опційно IO-Link для інтелектуальних датчиків, а також маршрути кабелів і шлангів у лотках рами без петель і натягів, що можуть «тягнути» ТСР. У програмі робота автоматичне позиціонування

оформлюють як параметризований макрос: кроки «перевірка базування», «сканування реперів», «оцінка перетворення», «оновлення робочого об'єкта» та «верифікація контрольних кадрів», після чого виконується основний цикл зварювання. Щоб захистити точність, вводять корекцію похибок: повторюваність нуль-точки, точність сітки/реперів, похибка сенсора, прогини плити/рами під масою виробу, а також дрейф від температури; кожному джерелу похибки задають граничні значення, за перевищення яких система вимагає повного переузгодження. Практично це означає: чисті отвори й репери без бризок, підтяжка болтів плит за схемою від центру до країв, калібрування сенсорів за графіком, «тепла» стабілізація столу перед вимірюванням і контроль площинності щупом.

З точки зору експлуатації сумісність перевіряється приймальними процедурами. На FAT/SAT випробуваннях оснастку багаторазово знімають і встановлюють на нуль-точку, щоразу виконуючи автоматичну підрухомірну рутину; якщо відхилення контрольних кадрів не перевищують встановлений поріг (наприклад, $\pm 0,05$ – $0,10$ мм по X/Y та $\pm 0,1^\circ$ по кутам), система вважається сумісною для серійної роботи. Для візійних компонентів додатково перевіряють роботу під змінним освітленням і на забруднених маркерах; для щупів — чутливість до заусенців і окислення кромek. У карті процесу зберігають «золотий» набір виміряних реперів і допустимі корекції, а у швидкому чек-листі оператора — послідовність дій перед стартом: підтвердити РЕ-заземлення, стан затисків, чистоту реперів, працездатність датчиків, виконати авто-позиціонування та перевірити два контрольні кадри на виробі. За такої організації стіл фізично та логічно готовий до роботи з системами автоматичного позиціонування: надає стабільний механічний базис, візуальні та сенсорні репери для швидкого обчислення зсувів і відкриті інтерфейси вводу/виводу, завдяки чому робот RM 1100/4C може щоразу відпрацьовувати траєкторії по фактичній геометрії виробу з мінімальними простоями на переналагодження.

Висновок до підрозділу:

У підсумку розглянуто структуру роботизованого комплексу зварювання **RobotMeta Cobotic MIG Welding RM 1100/4C** та визначено роль стола як ключового елемента базування деталей. Проведений аналіз узгодження координатних систем стола та маніпулятора показав, що правильна геометрична прив'язка забезпечує повторюваність траєкторій, мінімізує потребу у переналаштуванні та скорочує час циклу. Показано, що розроблена конструкція сумісна з системами автоматичного позиціонування та надає достатню кількість орієнтирів для сенсорних або візуальних систем робота. Інтеграція забезпечує стабільність технологічного процесу, підвищує точність зварних швів і забезпечує можливість адаптації комплексу під різні типи деталей.

4 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок на міцність, жорсткість і динаміку зварювального столу

Вихідні дані:

- габарити стільниці: 1380×1180 мм; модульні плити 680×380×12 мм; отвори $\varnothing 16$ з кроком 100×100 мм.

- рама/ніжки: профільна труба 50×50×5 мм; проліт між крайніми балками = 1150 мм; висота ніжок до п'ят ≈ 695 мм.

Матеріали:

- рама/ніжки Ст3пс: $E = 2.05 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, $\rho = 7850$ кг/м³, $\sigma_{don} \approx 235$ МПа.

- плита Ст45: $E = 2.05 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, $\rho = 7850$ кг/м³, $\sigma_{don} \approx 355$ МПа.

Навантаження:

- деталь 350 кг $\rightarrow F = 350 \cdot 9,81 \approx 3,43$ кН. Розглядаються навантаження: (А) рівномірно по всій площі стільниці; (В) локально в межах одного модуля 680×380 мм.

- для робочого режиму прийнято динамічний коефіцієнт $k_d = 1,3$.

Схема роботи та спрощення:

- модульна плита працює однопрогінно по короткій стороні $L = 0,38$ м.

- перемичка (50×50×5 мм) - проста балка на прогонах $L_s = 1,15$ м;

- ніжка з закріпленням (коєф. довжини $K = 1$).

4.1.1 Перевірка модульної плити

Для смуги шириною $b = 0,68$ м і прольотом $L = 0,38$ м:

$$I = \frac{bt^3}{12}, c = \frac{t}{2}, \omega = \rho b \quad (4.1)$$

$$M_{max} = \frac{\omega L^2}{8}, \sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I}, \delta_{max} = \frac{5\omega L^4}{384EI} \quad (4.2)$$

Навантаження A — рівномірне по всій стільниці

$$\text{Питомий тиск } p = F / A = \frac{3,43 \times 10^3}{1,38 \times 1,18} \approx 2,11 \text{ кПа} \rightarrow \omega \approx 1,43 \text{ кН/м}$$

Максимальний момент згину:

$$M_{max} = \frac{\omega L^2}{8} = \frac{1,43 \times 0,38^2}{8} = 25,88 \text{ Н/м} \quad (4.3)$$

Напруження:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I} = \frac{25,88 \times 0,006}{9,792 \times 10^{-8}} = 1,586 \times 10^6 \text{ Па} = 1,59 \text{ МПа}. \quad (4.4)$$

$$\delta_{max} = \frac{5\omega L^4}{384EI} = \frac{5 \times 1,43 \times 0,38^2}{384 \times 2,05 \times 10^{11} \times 9,792 \times 10^{-8}} = 1,94 \times 10^{-5} = 0,019 \text{ мм}. \quad (4.5)$$

Результат: $\sigma_{max} \approx 1,59 \text{ МПа}$; $\delta_{max} \approx 0,019 \text{ мм}$.

Навантаження B — у межах одного модуля

Площа модуля $A_m = 0,68 \times 0,38 = 0,2584 \text{ м}^2$

$$\text{Тиск } p = F / A = \frac{3,43 \times 10^3}{0,68 \times 0,38} \approx 13,3 \text{ кПа} \rightarrow \omega \approx 9,03 \text{ кН/м}$$

$$\omega = pb = 13,3 \times 0,68 = 9,03 \text{ Н/м}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I} = \frac{163,091 \times 0,006}{9,792 \times 10^{-8}} = 9,99 \times 10^6 \text{ Па} = 10 \text{ МПа}$$

$$\delta_{max} = \frac{5\omega L^4}{384EI} = \frac{5 \times 9,03 \times 0,38^4}{384 \times 2,05 \times 10^{11} \times 9,792 \times 10^{-8}} = 1,22 \times 10^{-4} = 0,12 \text{ мм}.$$

Результат: $\sigma_{max} \approx 10 \text{ МПа}$; $\delta_{max} \approx 0,12 \text{ мм}$.

Висновок по плиті: навіть у локальному випадку напруження і прогин малі порівняно з допустимими для Ст45 (навіть $k_d = 1,3$).

4.1.2 Розрахунок внутрішньої перемички (стингер) рами

Геометрія квадратної труби: $b_o = 0,05$ м, $b_i = 0,04$ м.

$$I = \frac{b_o^4 - b_i^4}{12} = 3,075 \times 10^{-7} \text{ м}^4, c = \frac{b_o}{2} = 0,025 \text{ м.} \quad (4.6)$$

Проліт $L_s = 1,15$ м. «Трибутарна» ширина $\approx 0,38$ м.

Від випадку А: $p = 2,11$ кПа

Лінійне навантаження на стингер $\omega_s = p \times 0,38 = 132,45$ Н/м.

$$M_{max} = \frac{\omega_s \times L_s^2}{8} = \frac{132,45 \times 1,15^2}{8} = 107,69 \text{ Н/м} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I} = \frac{107,69 \times 0,025}{3,075 \times 10^{-7}} = 1,077 \times 10^7 \text{ Па} = 10,77 \text{ МПа}$$

$$\delta_{max} = \frac{5\omega_s \times L_s^4}{384EI} = \frac{5 \times 132,45 \times 1,15^4}{384 \times 2,05 \times 10^{11} \times 3,075 \times 10^{-7}} = 2,9 \times 10^{-4} = 0,29 \text{ мм.}$$

Перевірка жорсткості: $L_s / 400 = 1,15 / 400 = 0,002875$ м = 2,875 мм.

Факт: $0,29 < 2,875$ мм – умова жорсткості виконується.

Перевірка міцності: для СтЗпс приймаємо допустиме $\sigma_{доп} = 141$ МПа

Факт: $10,77 < 141$ МПа $\rightarrow$ умова міцності виконується $\rightarrow$ запас $\approx \times 13$.

4.1.3 Стійкість ніжок і навантаження на п'яти

Ніжка виготовлена з тієї ж профільної труби 50x50x5, довжина $L = 0,695$ м.
коефіцієнт довжини $K = 1$.

$$P_{ніжки} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 2,05 \times 10^{11} \times 3,075 \times 10^{-7}}{0,695^2} = 1,288 \times 10^6 \text{ Н} = 1,29 \text{ МН} \quad (4.8)$$

Це еквівалентно $\frac{1,29 \times 10^6}{9,81 \times 10^3} \approx 131$ тонн сили на кожну ніжку.

Робоче навантаження на ніжку:

- лише від деталі 350 кг: $F / 4 = 3433,5 / 4 = 858,4$ Н = 0,858 кН;

- якщо орієнтована маса стола 150 кг $\rightarrow G \approx 1471,5$ Н; разом $(F + G) / 4 = 1226,3$ Н = 1,226 кН.

Запас стійкості: $P_{\text{ніжки}} / 1,226 \text{ кН} \approx 1050$. Практичним лімітом стає регулювальна п'ята.

Допустиме навантаження за жорсткістю складає $\approx 3,5$ т, за міцністю $\approx 4,5$ т.

4.1.4 Оцінка власної частоти

Оцінимо глобальну піддатливість через прогин перемички:

$$k \approx \frac{F}{\delta_s} = \frac{3433,5}{0,00028946} = 1,186 \times 10^7 \text{ Н/м} \quad (4.9)$$

Для орієнтовної маси «стіл+деталь» $m \approx 500$ кг:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,186 \times 10^7}{500}} = 24,51 \text{ Гц.} \quad (4.10)$$

Знаходиться вище типових збуджуючих частот процесу (звичайно $<10-15$ Гц) $\rightarrow$ ризик резонансу низький.

4.2 Розрахунок різьбових опор зварювального столу

Вихідні дані:

- Різьба: **M16×1,5**, номінальний діаметр $d=16$ мм, крок $P=1,5$ мм;
- клас міцності гвинта **10.9** $\rightarrow 0,9 \sigma_{\text{дон}} \approx 900$ МПа;
- діаметр тарілки п'яти $D=80$ мм. $\rightarrow$ площа контакту з підлогою.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 80^2}{4} = 5027 \text{ мм}^2 = 5,027 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \quad (4.11)$$

Навантаження перевіримо в двох ситуаціях:

- **Робоче** (маса деталі 350 кг + стіл 150 кг)

$$F_{\text{роб}} \approx \frac{(150 + 350) \times 9,81}{4} \approx 1226 \text{ Н} = 1,23 \text{ кН.} \quad (4.12)$$

- **Паспортне** для столу 1,5 т рівномірно: $F_{\Sigma} = 1500 \times 9,81 = 14,7 \text{ кН}$ – на одну п'яту

$$F_{\text{роб}} \approx \frac{F_{\Sigma}}{4} = \frac{14,7}{4} = 3,68 \text{ кН} \quad (4.13)$$

З динамічним коефіцієнтом $k_d = 1,3$: $F \approx 4,78 \text{ кН}$.

Несуча здатність гвинта на розтяг

Розрахункова площа різьби:

$$A_{\text{різ}} = \frac{\pi}{4} (d - 0,9382P)^2 = \frac{\pi}{4} (16 - 1,407)^2 = \frac{\pi}{4} (14,593)^2 \approx 167 \text{ мм}^2 \quad (4.14)$$

За текучістю:

$$F_{\text{тек}} = A_{\text{різ}} \times \sigma_{\text{дон}} = 167 \times 900 = 150,3 \text{ кН} \quad (4.15)$$

Якщо прийняти частковий коефіцієнт $\gamma = 1,25$:

$$F_{\text{тек}\gamma} = \frac{F_{\text{тек}}}{\gamma} = \frac{150,3}{1,25} = 120 \text{ кН}. \quad (4.16)$$

Висновок: запас за розтягом надлишковий для наших навантажень (робочі/динамічні $1,2 - 1,4 \text{ кН} < 120 \text{ кН}$).

Розрахунок на зріз/зминання – мінімальна довжина згвинчування

Для внутрішньої різьби консервативна оцінка через площу зсуву по профілю як:

$$A_{\text{зсуву}} \approx \pi d_{\text{сер}} L_e \times \mu \quad (4.17)$$

де $d_{\text{сер}}$ – середній діаметр різі (беремо близько 15 мм для M16x1,5), μ – ефективність профілю в зрізі (консервативно 0,5).

Допустиме напруження зсуву беремо як:

$$\tau_{\text{зр}} \approx \frac{0,5 \sigma_{\text{доп}}}{\gamma} \approx \frac{0,5 \times 355}{1,25} \approx 142 \text{ МПа}. \quad (4.18)$$

Необхідна довжина згвинчування при заданій силі F :

$$L_H = \frac{F}{\pi d_{\text{сер}} \mu \tau_{\text{зр}}} \quad (4.19)$$

для **динамічного** навантаження $F = 4,78$ кН:

$$L_H = \frac{4780}{\pi \times 15 \times 0,5 \times 142} = \frac{4780}{3347} \approx 1,43 \text{ мм.}$$

для **робочого** навантаження $F = 1,23$ кН:

$$L_H = \frac{1230}{\pi \times 15 \times 0,5 \times 142} = \frac{1230}{3347} \approx 0,37 \text{ мм.}$$

Приймаємо довжину різі $L_e = 1,5d \approx 24$ мм – гарантований запас і ресурс різі

Розрахунок стиску бетону під п'ятою $d = 80$ мм.

Площа п'яти становить $A = 5027 \text{ мм}^2$. Для промислових стяжок типово беруть бетон марки **C25/30...C30/37**. Для орієнтирних допустимих контактних напружень в експлуатації візьмемо:

- C25/30: $\sigma_{\text{доп}} = 6 - 7,5$ МПа;

- C30/37: $\sigma_{\text{доп}} = 7,5 - 9$ МПа.

Розрахунок проведемо для нищої марки бетону C25/30.

Дані напруження є для локального стиску стяжки. фактичне приймають проектно з урахуванням товщини стяжки, наявності плити-основи, арматури/сітки, підстильних шарів.

Несуча здатність на 1 п'яту:

$$F_c = \sigma_{\text{доп}} \times A = 7,0 \times 5027 \approx 35,2 \text{ кН.} \quad (4.20)$$

Порівняння: паспортне динамічне навантаження $F = 4,78$ кН, це значно менше 35-43 кН. Запас складає від $\times 7 \dots \times 9$ на 1 п'яту.

Висновок до підрозділу:

У підсумку інженерних розрахунків елементів конструкції зварювального стола, перевірка модульних плит показала, що максимальні прогини та напруження не перевищують допустимих значень, забезпечуючи необхідну жорсткість і точність роботи. Аналіз рами та перемичок підтвердив достатній запас міцності та стійкості за декількома видами навантажень. Розрахунок ніжок продемонстрував їхню надмірну стійкість та високий запас несучої здатності регулювальних п'ят. Досліджено власні частоти стола, які становлять приблизно 24–25 Гц — значно вище робочого діапазону збуджуючих частот зварювального процесу, що виключає резонансні явища. Різьбові опори також підтвердили великий запас міцності, що забезпечує надійну роботу конструкції. Загалом отримані результати доводять відповідність розробленого столу вимогам міцності, жорсткості та динамічної стійкості.

5 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

5.1 Постановка задачі та вихідні дані

Метою даного етапу дослідження є проведення чисельного аналізу напружено-деформованого стану конструкції зварювального стола методом скінченних елементів у середовищі **SolidWorks Simulation**. Розрахунок виконується для перевірки міцності, жорсткості та стійкості стола під дією робочих навантажень, що виникають у процесі зварювання та фіксації деталей у системі роботизованого зварювання[20].

Завданням моделювання є визначення:

- Максимальних лінійних переміщень (прогинів) у зоні стільниці;
- максимальних еквівалентних напружень;
- коефіцієнта запасу міцності конструкції;
- аналіз впливу різних схем навантаження на жорсткість та стабільність столу.

Дослідження виконується для реальної геометричної моделі зварювального стола, розробленої у SolidWorks. Основні **геометричні параметри конструкції**:

- розмір робочої поверхні (стільниці) — 1380×1180 мм;
- товщина стільниці — 12 мм (матеріал **Ст45**);
- розмір отворів для кріплення — $\varnothing 16$ мм, крок розташування 100×100 мм;
- розмір профільної труби рами — $50 \times 50 \times 5$ мм;
- кількість опорних ніжок — 4 шт;
- матеріал основних елементів — **сталь конструкційна Ст3пс**.

У розрахунку прийнято такі допущення та умови:

- контакти між елементами столу вважаються зварними, тому всі тіла з'єднані жорстко;
- зварювальний стіл встановлений на тверду основу, тому нижні поверхні ніжок закріплені як *Fixed Geometry* (рис. 5.1);
- навантаження прикладаються у вигляді сили або рівномірного тиску, що імітує вагу деталі, фіксаторів і пристосувань (рис. 5.2);
- вплив температури при зварюванні на модульну плиту (рис. 5.10).

Для підвищення точності результатів моделювання конструкцію розглядають у трьох розрахункових випадках:

Випадок 1 – рівномірно розподілене навантаження по всій площині стільниці (імітація масивної деталі, рис. 5.4).

Випадок 2 – зосереджене навантаження у центральній частині стільниці (імітація зварювального вузла, рис. 5.7) .

Випадок 3 – зосереджене навантаження біля краю стільниці (оцінка поведінки при асиметричному навантаженні, рис. 5.8).

Отримані результати моделювання (розподіл напружень, прогини та коефіцієнт запасу міцності) дозволять оцінити раціональність вибраних параметрів конструкції та підтвердити її придатність для інтеграції в роботизовану зварювальну систему.

5.2 Дослідження зварювального столу

Для подальших симуляцій навантажень необхідно спростити деталь, заберемо конструктивні елементи які не впливають на розрахунок (вигляд різи, фаски та гравіювання на модульних плитах)[19]. Необхідно провести закріплення столу як «нерухомий об'єкт» (рис. 5.1).

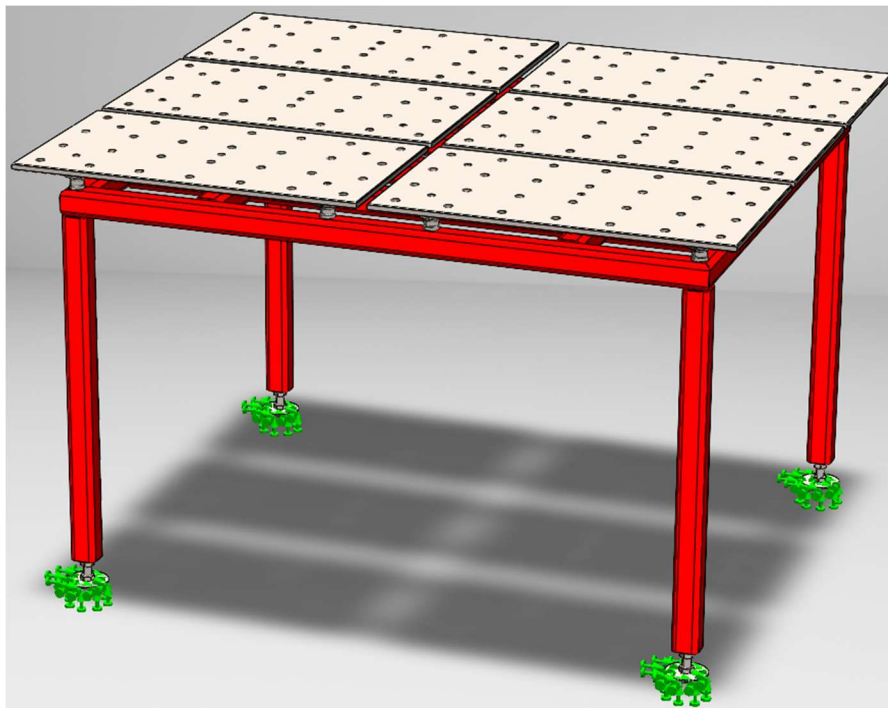


Рисунок 5.1 – Фіксація столу за чотири опорних ніжки

Для **випадку 1** візьмемо рівномірне навантаження $F = 350$ кгс по всій стільниці (імітація масивної деталі).

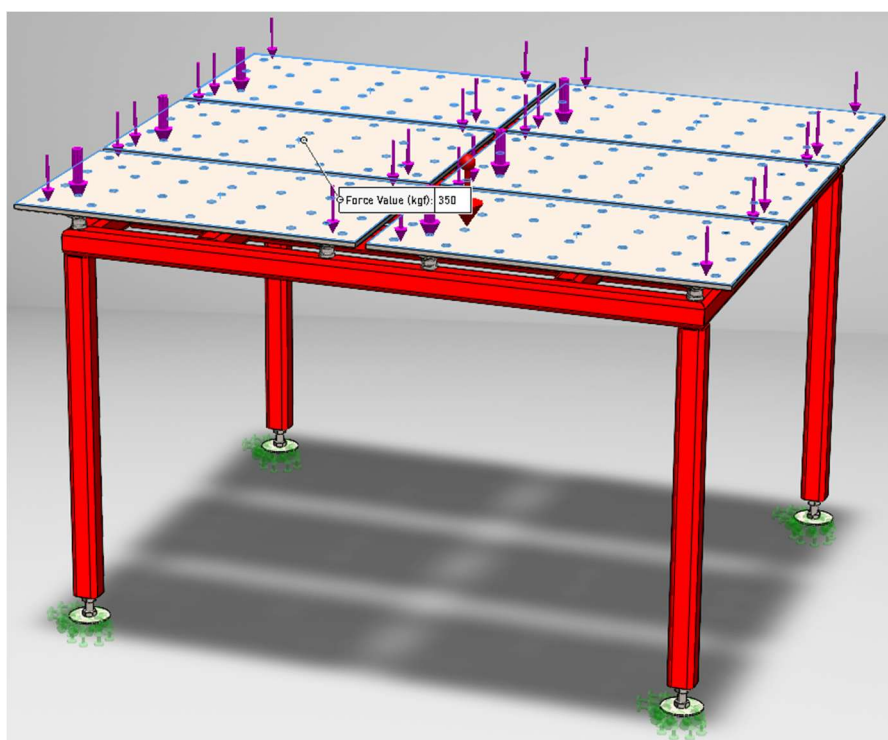


Рисунок 5.2 – Рівномірне навантаження по всій стільниці

Тепер необхідно розбити модель на кінцеві елементи для подальшої симуляції. Розбивання робимо в середньому розмірі ґратки для швидшого та кращого результату обчислення.

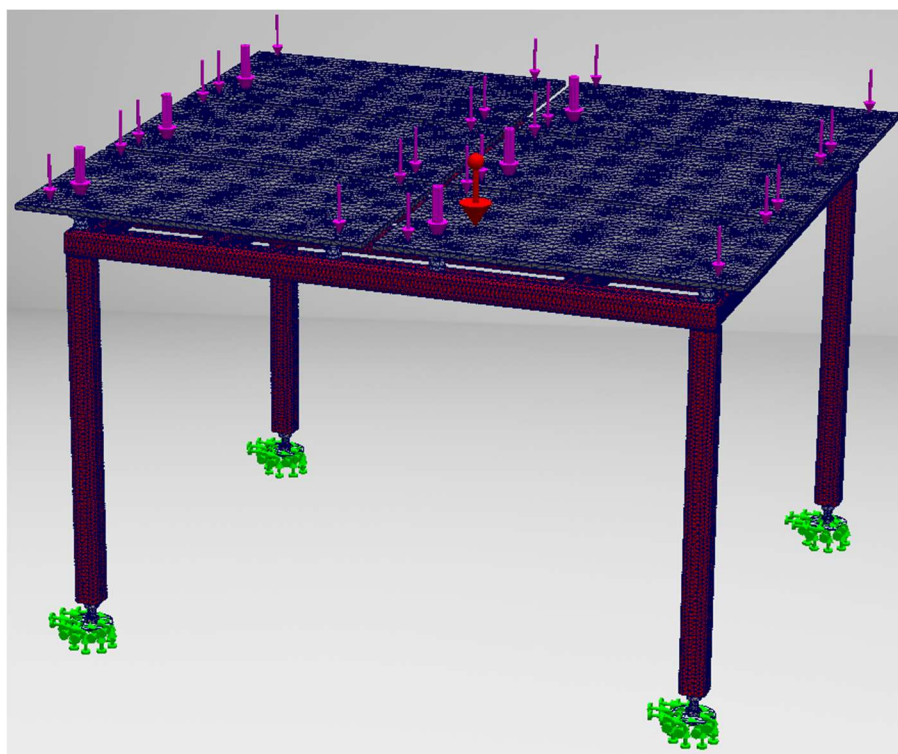


Рисунок 5.3 – Розбивання моделі на кінцеві елементи

Після обчислення, дослідження показує що при навантаженні $F = 350$ кгс по всій стільниці, максимальний прогин рами складає **0,44** мм, відбувається в центрі рами.

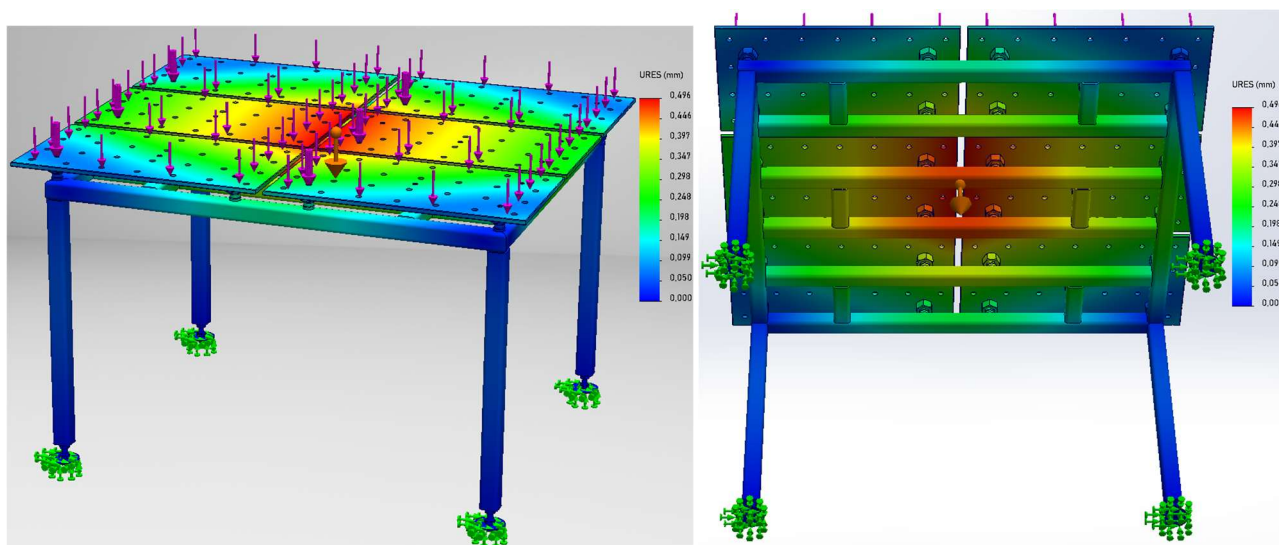


Рисунок 5.4 – Дослідження зварювального столу на лінійне переміщення

Дослідження на максимальний еквівалент напружень показує що найбільше $\sigma_{max} = 52,6$ МПа.

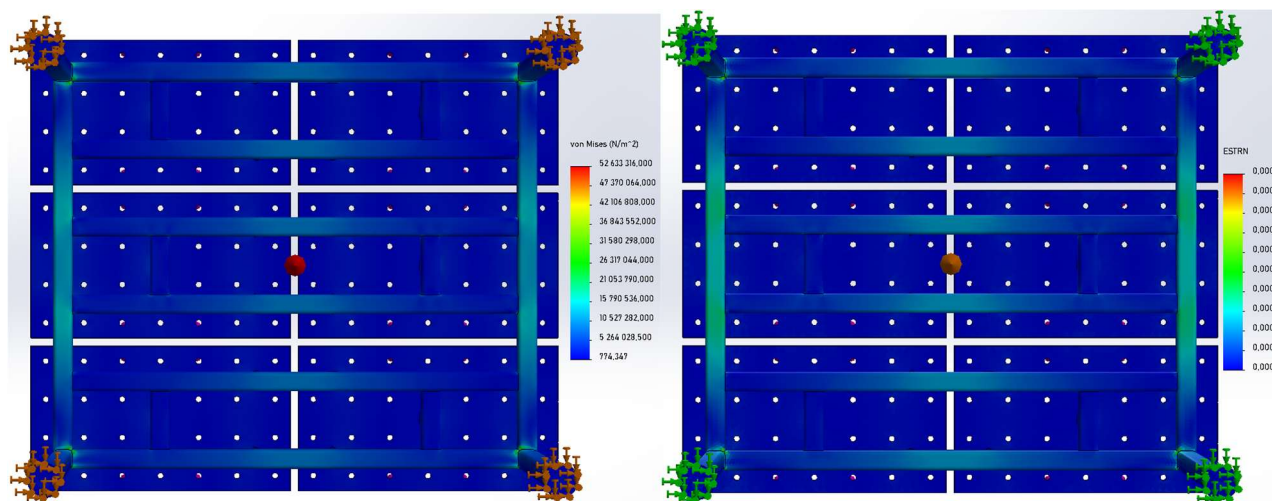


Рисунок 5.5 – Дослідження зварювального столу на еквівалент напружень

Коефіцієнт запасу міцності $FOS = 5,37$, що є хорошим показником для даного виробу.

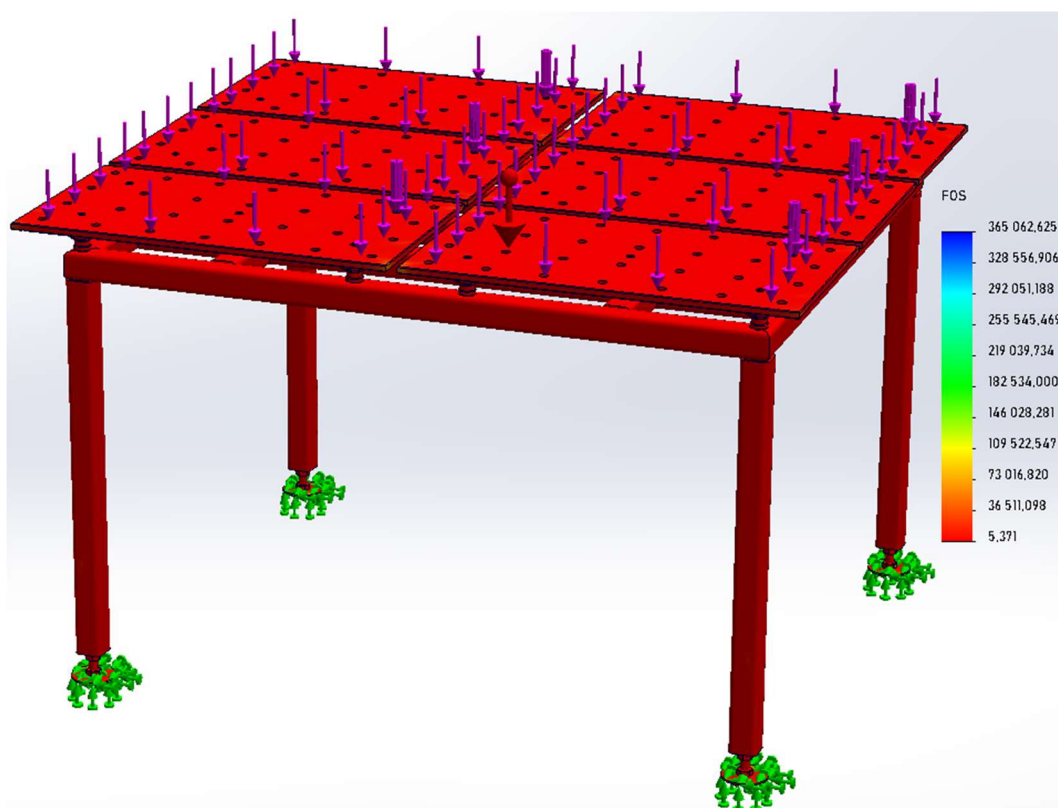


Рисунок 5.6 – Коефіцієнт запасу міцності ($FOS = 5,37$)

Проведемо аналогічні дослідження для **випадку 2** та **випадку 3**.

Для **випадку 2** - зосереджене навантаження у центральній частині стільниці (імітація зварювального вузла). При тих самих умовах максимальне прогин складає **0,3** мм.

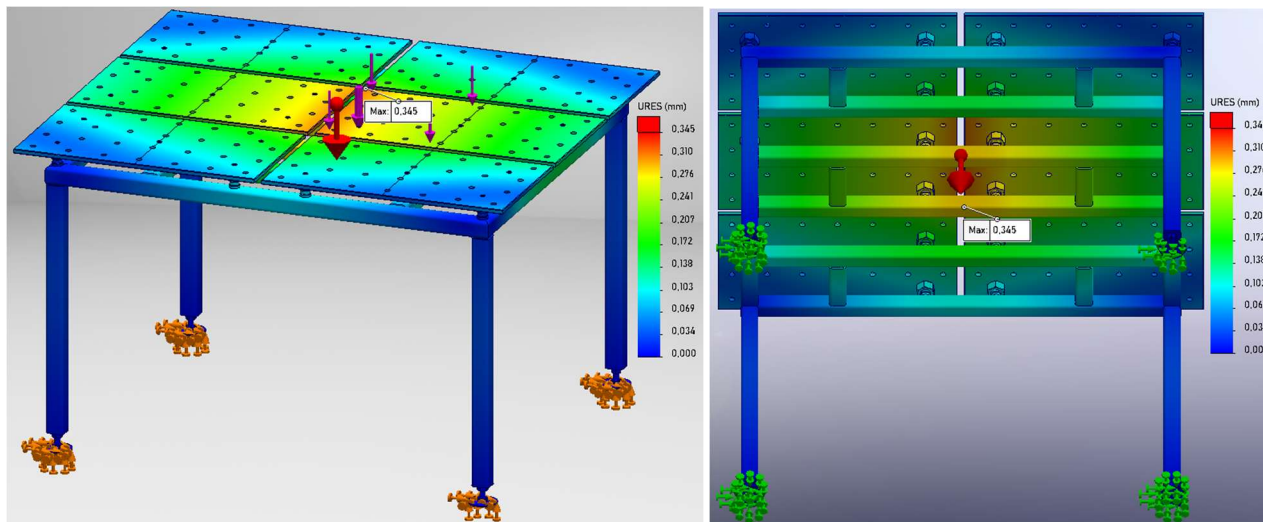


Рисунок 5.7 – Зосереджене навантаження на центр стільниці

Для **випадку 3** – зосереджене навантаження біля краю стільниці (оцінка поведінки при асиметричному навантаженні). Максимальне прогинання складає **0,09** мм.

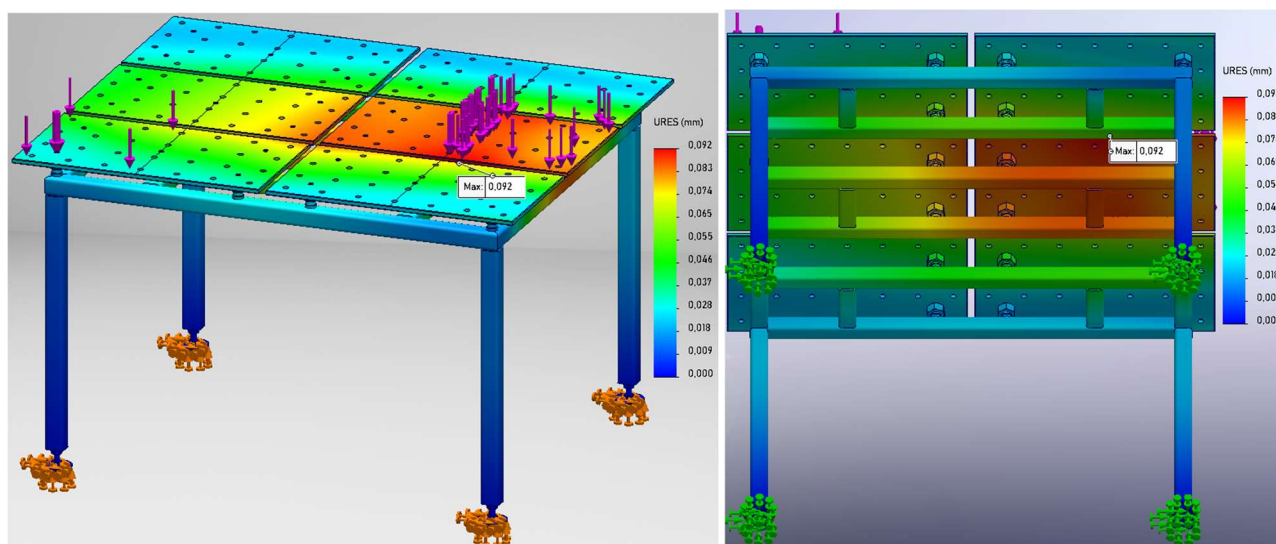


Рисунок 5.8 – Асиметричне навантаження на стільницю

Таблиця 5.1

Узагальнення досліджених параметрів

Тип навантаження Параметри	Рівномірне	Зосереджене	Асиметричне
Максимальне лінійне переміщення $l_{\max}$, мм.	0,44	0,3	0,09
Максимальний еквівалент напружень $\sigma_{\max}$, МПа	52,6	56,7	24,1
Коефіцієнт запасу міцності (FOS)	5,37	4,97	11,7

Проведене МСЕ-моделювання зварювального стола у **SolidWorks Simulation** для трьох випадків навантаження (рівномірний тиск по стільниці, центральне зосереджене навантаження, асиметричне навантаження біля краю) підтвердило працездатність конструкції за критеріями міцності та жорсткості. Максимальні еквівалентні напруження локалізуються в зонах переходу стільниці до елементів рами та біля перфорації, однак не перевищують границю текучості прийнятого матеріалу. Найбільші прогини виникають у центральній частині стільниці та зростають за умови ексцентричного навантаження; отримані значення відповідають вимогам до точності зварювальних операцій. Чутливий аналіз сітки показав збіжність результатів, а використані допущення (жорстко з'єднані елементи, ідеалізовані опори) є коректними для статичного навантаження. Конструкція забезпечує необхідний запас міцності та жорсткості для інтеграції в роботизовану систему зварювання[6]; подальша оптимізація може включати локальне посилення зони перфорації, додаткові ребра під стільницею та врахування теплових впливів у термомеханічному аналізі.

5.3 Дослідження модульної плити на температурний вплив

У підрозділі виконується нестационарний тепловий аналіз модульної плити під час проходження зварювальної дуги та охолодження[4]. Мета — визначити поля температур і градієнти, а також оцінити викликані ними термічні деформації (короблення) робочої поверхні. Розрахунок проводиться у **SolidWorks Simulation**: спершу теплове моделювання з рухомим/поетапним джерелом тепла, далі статичний аналіз з імпортом температурних полів.

Для теплового розрахунку необхідно вказати деякі параметри, такі як: конвекцію, випромінювання та тепловий потік що створюється дугою. Конвекцію задаємо $45 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$ ($35 - 50 \text{ W} / \text{m}^2$ для цехів в яких є примусова вентиляція). Випромінювання $k = 0,8$ (для високо вуглецевих сталей $0,6 - 0,9$), зовнішня температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Тепловий потік від дуги 1500 Вт/м^2 . Закріплення плити проводиться по п'яти точках регулювальних опор.

За приклад візьмемо повздовжній та поперечний нагрів ділянки модульної плити (рис. 5.9).

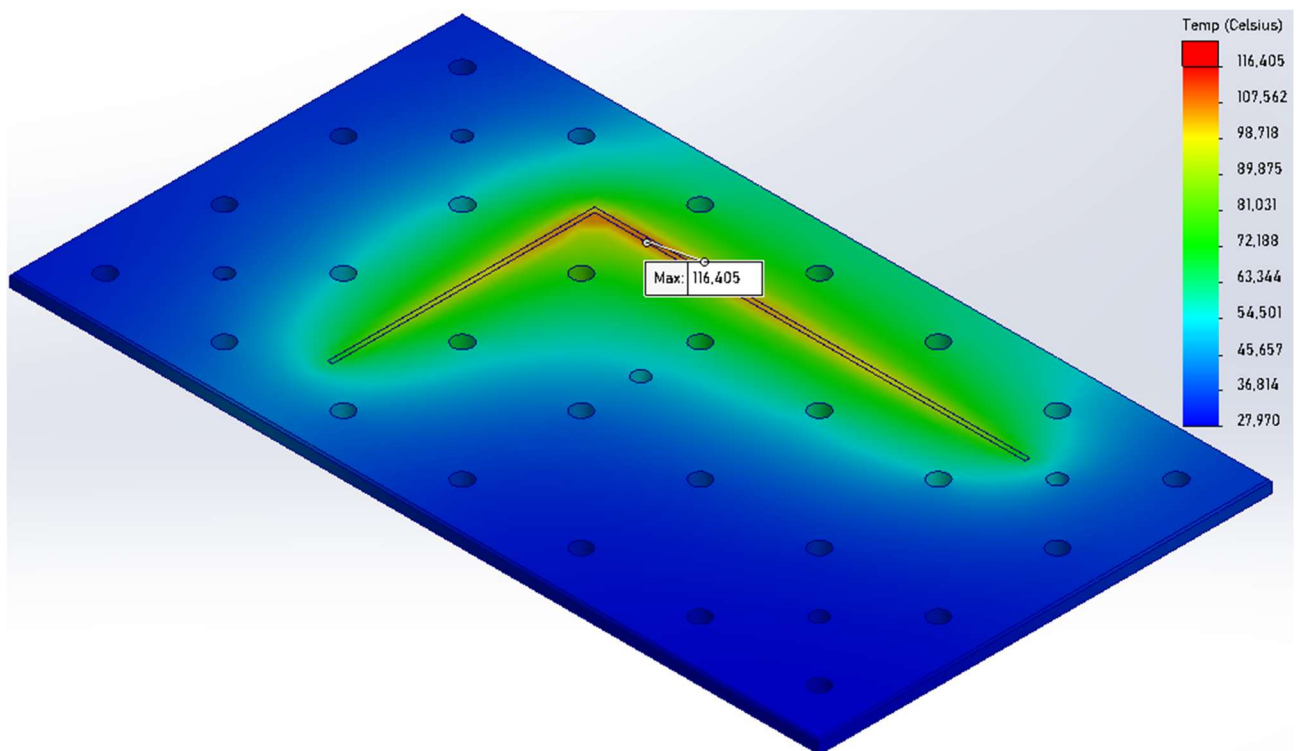


Рисунок 5.9 – Дослідження теплового впливу

Дослідження показало, що при зварюванні Г-подібного шва заданою потужністю теплового потоку, максимальний нагрів ділянки складає **116,4** градусів Цельсія. Для подальшого дослідження на деформації при нагріві (короблення) за основу візьмемо дослідження теплового впливу.

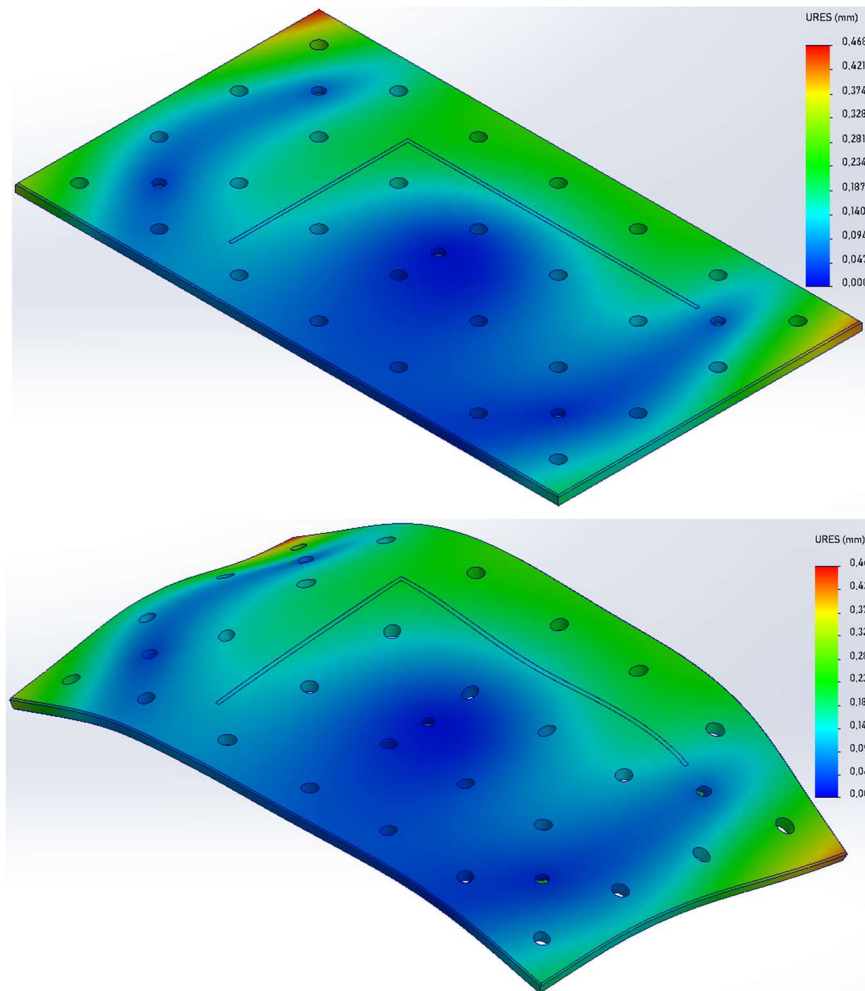


Рисунок 5.10 – Дослідження на термічну деформацію

Дослідження на вплив теплового потоку показало що деформація при такому способі нагріву є не значною, з використанням фіксації плити в п'ятьох точках, максимальна деформація є на кутах (метал «вигинає») **0,46** мм що є в допуску площинності для зварювання роботизованою системою.

Висновок до підрозділу:

У загальному підсумку дослідження проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкції у **SolidWorks Simulation**. Результати показали, що при різних схемах навантаження — рівномірному,

локальному та асиметричному — прогини залишаються в межах допустимих значень (0,09–0,44 мм). Найбільші еквівалентні напруження становлять близько 52 МПа при коефіцієнті запасу $FOS \approx 5,37$, що значно перевищує мінімально необхідні значення. Дослідження показали високу жорсткість стола, стійкість до деформацій та можливість ефективної роботи в умовах локального нагріву під час зварювання. Отримані результати підтверджують правильність вибору конструктивних параметрів і забезпечують високу експлуатаційну надійність.

Для збільшення несучої здатності рами можна додати п'яту опорну ніжку по центрі рами, а також для часткового зменшення вартості матеріалу ніжки можна робити з профілю меншої товщини стінки, наприклад 2,8 – 3 мм. Дане дослідження показало що модульний зварювальний стіл можна вводити у виробництво для інтеграції з роботизованими системами зварювання.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

6.1 Ідентифікація небезпечних і шкідливих факторів та вихідні умови

Експлуатація столу відбувається під час ручного MIG/MAG/TIG або роботизованого зварювання. Джерелами ризиків є електричні кола зварювального джерела, термічний вплив дуги та бризок, аерозолі металів і гази (NO_x , O_3 , CO), механічні фактори (переміщення заготовок, робота притискачів), оптичні випромінювання (видиме/УФ/ІЧ), шум/вібрації допоміжного обладнання, а також робототехнічні ризики (незаплановані рухи маніпулятора, «захват» зони)[11]. До ергономічних чинників відносяться статичні пози, періодичні підйоми модулів плити масою приблизно 23 кг, нахили корпусу при доступі до швів і візуальний контроль дрібних елементів. Умовно приймаємо, що робоче місце розташоване в зоні з локальною вентиляцією, підлога — рівна, неслизька, проходи не менше 0,8 м, а прокладання кабелів виконане в лотках.

6.2. Інженерні та організаційні заходи безпеки

Столом передбачено суцільне заземлення рами та робочих плит із маркованою РЕ-клемою. Антипригарне покриття плити, фаски на отворах і по контуру, а також заокруглені кромки усувають різальні кромки, знижують ризик опіків і полегшують очищення від бризок. Регульовані опори M16 із демпферами забезпечують стійкість, можливість точного виставлення площини та зменшення вібрацій; при стаціонарній роботі передбачені отвори для анкерування до підлоги.

Для локальної вентиляції застосовується відсмоктувальна парасоля або гнучкий витяжний рукав. Приблизний підбір продуктивності виконуємо з умови швидкості захоплення 0,6–1,0 м/с у робочій зоні: якщо площа умовного отвору

«парасолі» над столом $0,8 \text{ м}^2$, об'ємна витрата має становити $0,6 \cdot 0,8 \approx 0,48 \text{ м}^3/\text{с}$, тобто близько $1700 \text{ м}^3/\text{год}$; для гнучкого рукава діаметром 160 мм практично застосовують $1000\text{--}1400 \text{ м}^3/\text{год}$ із підведенням на $200\text{--}300 \text{ мм}$ до джерела. Для нержавіючих сталей та оцинкованих деталей доцільний фільтроагрегат із касетами тонкого очищення. Освітлення робочої поверхні приймається не нижче 500 лк з антибліковими світильниками; для візуального контролю та прихваток доцільні додаткові локальні світильники зі скляними захисними екранами. Шум у зоні оператора підтримують нижче 80 дБА (при перевищенні застосовують протишумові вкладки/наушники)[12].

Механічна безпека забезпечена уніфікованими притискачами та штифтами $\varnothing 16$ із заводськими фасками; забороняється використання саморобних різьбових елементів із гострими фасками. На столі нанесені реперні відмітки; це скорочує «пристрілки» розмірів і зменшує час перебування оператора в незручних позах. При демонтажі/монтажі модулів плити вагою $\sim 23 \text{ кг}$ діє правило підймання в парі або з використанням допоміжних засобів (підйомники, вакуумні присоси), а також обмеження на висотне перенесення. Пожежна безпека реалізується установленням вогнегасників відповідних класів (порошкові/вуглекислотні), іскрозахисними екранами та заборonoю зберігання ЛЗР у радіусі 5 м.

Регламентом визначені місця E-STOP, огорожі для зони робота, міжзамикання дверей і підтвердження двома руками при налагодженні (режим зниженої швидкості T1). На час змін оснастки застосовується ЛОТО-процедура із блокуванням енергій (електроживлення, пневматика, приводи).

6.3 Ергономіка, антропометрія, безпека та організація робочого місця

Висота столу $850 \pm 25 \text{ мм}$ покриває середні антропометричні дані. Для операторів нижчого/вищого зросту допускається діапазон $800\text{--}900 \text{ мм}$ за рахунок регульовальних опор, що знижує згинання тулуба понад 20° . Зони частого доступу розміщують у межах витягнутої руки до $600\text{--}700 \text{ мм}$ від передньої кромки без скручувальних рухів корпусу[17]. Модулі плит стандартизовані:

наявність позиційної розмітки та повторюваної сітки $\varnothing 16/100 \times 100$ мм дозволяє мінімізувати «приміряння», тим самим скорочуючи статичні пози та шкідливу дрібну моторику з утриманням масивних деталей. Для підняття деталей масою понад 15–20 кг передбачаються допоміжні засоби (ручні талі, шарнірно-важільні підвісні пристрої), а для тривалих операцій — підставки під ноги/руки та м'які килимки для зниження навантаження на опорно-руховий апарат. Проходи навколо столу витримуються не менше 0,8 м, підлога — антиковзна; кабелі та шланги виносяться на підвіс або в підлогові канали, щоб виключити спотикання.

Стіл і всі металеві частини мають бути включені в систему вирівнювання потенціалів, під'єднані до контуру РЕ через гвинтову клему з маркуванням. З'єднання перевіряється на механічну міцність і відсутність фарби/окису в зоні контакту. Розетки на рамі виконують у пиловологозахищеному виконанні; інструменти класу I працюють лише через справні кабелі й вилки з захисним контактом. Для кіл допоміжної оснастки та ручного електроінструменту рекомендується застосування пристроїв захисного відключення (ПЗВ) малої чутливості. Періодичні вимірювання опору петлі «фаза-нуль», цілісності РЕ-провідників і перевірка ізоляції вносяться до журналу обліку. Візуальний контроль кабель-менеджменту здійснюється щозміни, вимірювання електропараметрів — за затвердженим графіком.

Мікроклімат підтримується в межах комфортних значень (відсутність протягів, температура і відносна вологість у нормативних межах).

Навколо столу організовується пожежонебезпечна зона, вільна від ЛЗР, тирси, паперу та тканин. Вогнегасники (вуглекислотні/порошкові) розміщуються на відстані досяжності не більше 20 м; персонал проходить інструктаж із їх застосування. Балони зі стисненими газами фіксуються в тримачах; шланги мають захист від перегинів і маркування за газом. Для профілактики загорянь застосовуються антиіскрові екрани та вологі протипожежні килимки в зоні можливого падіння бризок[12].

У разі роботи з маніпулятором зона столу огорожується металевими панелями або світловими бар'єрами; доступ у зону під час автоматичного циклу

виключається. При сервісних роботах керування здійснюється в режимі зниженої швидкості, з підтвердженням двома руками, у присутності відповідальної особи. На столі та пульті встановлюються легко досяжні **E-STOP**; програмні межі руху та віртуальні стіни проєктуються так, щоб виключити зіткнення з опорами столу. Оснастка підключається через швидкознімні інтерфейси з **блокуванням енергій** на час переналагодження.

Щозміни оператор виконує чек-лист: справність заземлення, робота витяжки, відсутність задирок і налипань у перфорації, цілісність притискачів, чистота кабельних лотків, наявність і доступність вогнегасника, працездатність

Щотижня контролюється площинність у контрольних точках і рівень затягування болтів плит; щомісяця — стан покриття, наявність корозійних плям, герметичність пневмоз'єднань і журнал оглядів. Інструктажі проводяться при прийомі на роботу, періодично і позапланово після модернізацій або інцидентів.

6.4 Економічне обґрунтування. Структура витрат та експлуатаційні витрати

Капітальні витрати включають метал (профільна труба рами 50×50×5 мм, модульні плити 680x380x12 мм), механічну обробку, зварювальні роботи, покриття/нітрування, гравіювання, кріплення, регульовані опори, базовий комплект оснастки (штифти, притиски), а також монтаж і введення в експлуатацію. Експлуатаційні витрати формуються витратниками (штифти, притиски, покриття), техобслуговуванням (очищення, підтяжки, контроль площинності), енергією для витяжки та зниженими втратами від простоїв.

Для наближеного розрахунку зручно виділити змінні:

1. $P_{ст}$ – ринкова ціна профільної труби з порізкою = 280 грн/м.
 $l_{тр} = 13,3 \text{ м. } (280 \times 13,3 = 3724 \text{ грн.})$
2. $P_{мод.пл}$ – ринкова ціна лазерної порізки модульних плит з урахуванням отворів, гравіюванням та вартості металу = 3000 грн/м²

$$S_{\text{мод.пл}} - 0,26 \times 6 = 1,56 \text{ м}^2 (1,56 \times 3000 = 4680 \text{ грн.})$$

3. $P_{\text{мех/звар.}}$ – вартість механічних/зварювальних робіт = 1000 грн/год.

$$T_{\text{люд/год}} = 20 \text{ люд/год. } (1000 \times 20 = 20000 \text{ грн.})$$

4. $P_{\text{рег.}}$ – вартість регулювальних опор модульних плит = 100 грн/шт.

В нас 30 регулювальних валів, ціна складає = 3000 грн.

5. $P_{\text{дод}}$ – вартість кріплень, опор, базовий набір оснастки. = 15000 грн.

Тоді загальна структура витрат:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{мод.пл}} + P_{\text{мех/звар}} + P_{\text{рег.}} + P_{\text{дод}} \quad (6.1)$$

Тоді $P_{\text{заг}} = 3724 + 4680 + 20000 + 3000 + 15000 = 46404 \text{ грн.}$

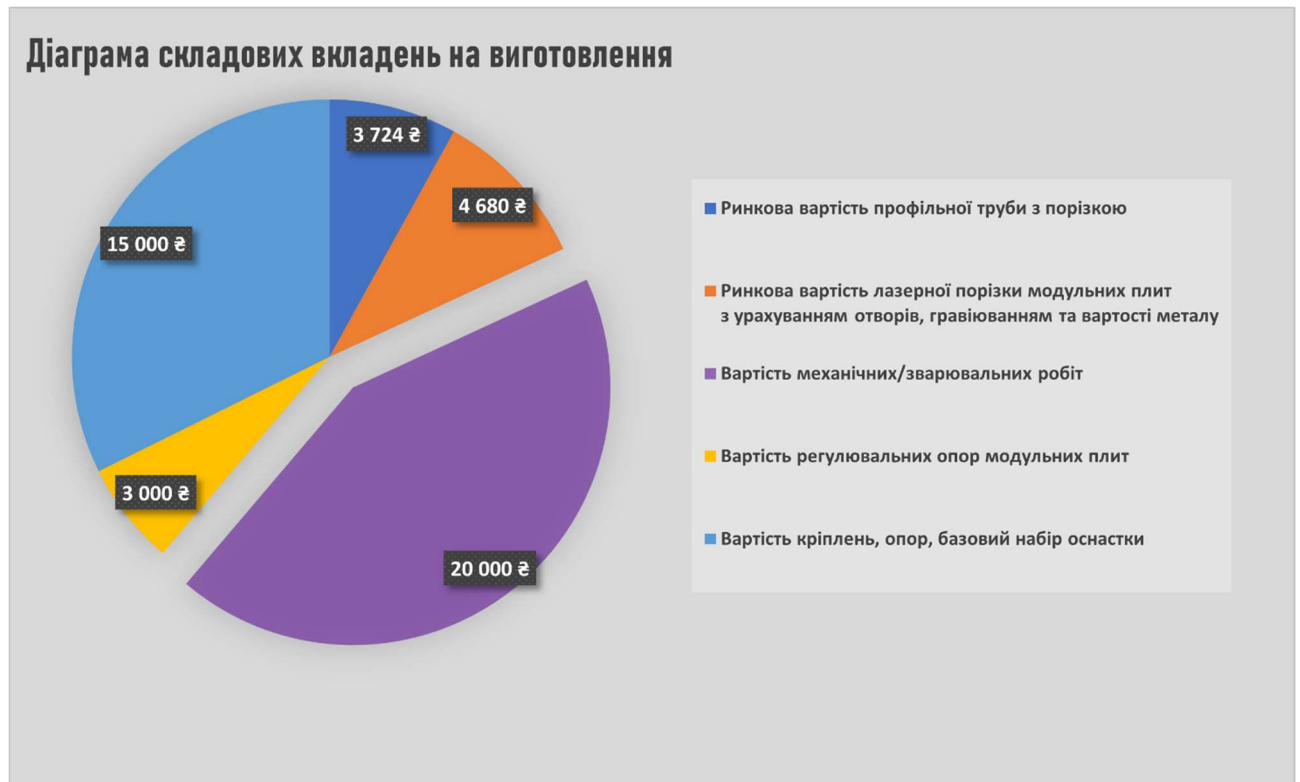


Рисунок 6.1 – діаграма складових вкладень на виготовлення

Основні статті економії — **скорочення часу переналагодження, зменшення частки браку/переробок** за рахунок повторюваного базування і підвищення завантаження робота.

Позначимо:

1. t_0 - час переналагодження до впровадження, t_1 – після;
2. $N_{\text{пер/зм}}$ – кількість переналагоджень на зміну;

3. $S_{зм/міс}$ – кількість змін на місяць;
4. $P_{праці}$ – ставка праці (грн/год);
5. $P_{машини}$ – вартість машинного часу (грн/год):

Місячна економія часу:

$$\Delta T_{міс} = (t_0 - t_1) \times N_{пер/зм} \times S_{зм/міс} \quad (6.2)$$

Припустимо, що раніше переналагодження займало 45 хв на партію, після впровадження — 15 хв; за зміну відбувається 4 переналагодження, у місяці 22 зміни. Тоді $\Delta T_{міс} = (45 - 15) \times 4 \times 22 = 2640$ хв ≈ 44 год.

Грошовий еквівалент:

$$\Delta CF_{час} = \Delta T_{міс} (P_{праці} + P_{машини}) \quad (6.3)$$

Якщо сума ставок $P_{праці} + P_{машини} = 800$ грн/год. то $\Delta CF_{час} = 44 \times 800 \approx 35200$ грн/міс. Нехай зниження браку дає ще 10 000 грн/міс, тоді $\Delta CF_{міс} \approx 45\,200$ грн.

При одноразовому капіталовкладенні припустимо разом з роботом $P_{кап} = 500\,000$ грн **термін окупності становить:**

$$T_{окуп} = P_{кап} / (\Delta CF_{міс} \times 12) \quad (6.4)$$

Тоді $T_{окуп} = 500\,000 / (45\,200 \times 12) \approx \mathbf{0,92}$ року, тобто близько 11 місяців. При більшій інтенсивності переналагоджень або вищій вартості машинного часу окупність додатково скорочується.

Результат найбільш чутливий до чотирьох параметрів:

- частоти переналагоджень $N_{пер/зм}$;
- різниці часу $t_0 - t_1$;
- вартості машинного часу $P_{машини}$;
- ціна металу $P_{мет}$.

Якщо переналагоджень менше однієї на зміну, економічний ефект різко спадає; якщо 3–5 на зміну — зростає у рази. Додатковими ризиками є переривання постачання металу, зростання тарифів на енергію для витяжки та простої через неякісну оснастку. Для управління ризиками передбачаються

стандартні заходи: затверджена специфікація матеріалів, запас найкритичніших комплектуючих (штифти, притиски, опори), планово-попереджувальні огляди, навчання персоналу[15].

Запропонований стіл із рамою з профільної труби 50×50×3 мм та модульними плитами 680×380×12 мм відповідає вимогам охорони праці за рахунок конструктивних рішень (РЕ-заземлення, фаски, антибризкове покриття, регульовані опори, позиційна розмітка, організований кабель-менеджмент), правильно підібраної вентиляції та освітлення, а також впроваджених процедур безпеки (E-STOP, огорожі, інструктаж, щозмінні чек-листи). З економічної точки зору модульність і нуль-точка забезпечують істотне скорочення переналагоджень, стабілізацію якості і зменшення переробок; у типовій виробничій експлуатації це дає окупність проекту порядку 6–18 місяців залежно від інтенсивності роботи. Розрахунки наведені вище, дозволяють оперативно підставити фактичні ціни й ставки підприємства та отримати обґрунтовані показники і грошових потоків.

Висновок до підрозділу:

У підсумку даного розділу є ідентифікація небезпечних виробничих факторів, таких як УФ-випромінювання, дим, високі температури, електробезпека, а також ергономічні ризики. Запропоновано комплекс заходів з безпеки: локальна вентиляція, заземлення, антипригарне покриття, регульовані опори з демпферами, організований кабель-менеджмент. Економічний аналіз продемонстрував суттєве зниження витрат завдяки скороченню часу переналагодження, зменшенню браку та підвищенню продуктивності. Термін окупності розробленого рішення становить приблизно 11 місяців, що підтверджує економічну ефективність впровадження.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі виконано всебічне дослідження, моделювання та інженерне обґрунтування конструкції зварювального стола, призначеного для інтеграції з роботизованою системою зварювання. Робота мала комплексний характер і охоплювала весь спектр завдань — від аналізу сучасного стану галузі та вимог до високоточного оснащення та інженерних розрахунків, комп'ютерного моделювання й економічного оцінювання ефективності впровадження.

1. Проведений у роботі аналіз існуючих конструкцій зварювальних столів дозволив визначити основні тенденції розвитку сучасних модульних систем, їх переваги та обмеження, а також виділити низку конструктивних рішень, які є критично важливими при застосуванні у складі роботизованих комплексів. Установлено, що ключовими параметрами для забезпечення стабільності зварювального процесу є жорсткість, точність площинності, передбачуваність базових точок та можливість інтеграції реперних систем, необхідних для позиціонування маніпулятора.

2. У рамках обґрунтування інтеграції було розроблено конструктивне рішення зварювального стола з модульною стільницею, яке забезпечує високу універсальність, точність і ремонтпридатність. Модульна структура, технологічні зазори, рама на регульованих опорах, можливість встановлення zero-point системи і сенсорних/візуальних маркерів — усі ці елементи роблять стіл придатним для роботи в умовах високої повторюваності, характерної для роботизованих технологічних комплексів.

3. Важливим етапом роботи стали аналітичні та чисельні інженерні розрахунки, що охоплювали визначення міцності, жорсткості, стійкості елементів конструкції та перевірку динамічних характеристик. Розрахунки підтвердили, що максимальні напруження й деформації не перевищують допустимих норм, а запас міцності елементів конструкції є значним, що гарантує

надійність стола під час експлуатації $10,77 < 141$ МПа. Аналіз власних частот показав відсутність резонансних явищ 24,51 Гц, що є критично важливим для стабільності роботи промислових маніпуляторів.

4. Чисельне моделювання за методом скінченних елементів у **SolidWorks Simulation** дозволило отримати наочні дані про поведінку конструкції в реальних умовах навантаження. Встановлено, що прогини стільниці та рами при рівномірних і локальних навантаженнях залишаються у межах допустимих значень 0,44 мм, а конструкція демонструє високу стабільність навіть при асиметричних силових впливах та температурних змінах, які виникають у процесі зварювання (короблення становить 0,46 мм). Це підтверджує відповідність конструктивного рішення вимогам точності та технологічної надійності.

5. Окрему увагу приділено питанням охорони праці та економічній доцільності впровадження розробленого стола у виробництво. Було проведено ідентифікацію небезпечних і шкідливих факторів, розроблено комплекс технічних та організаційних заходів для безпечної експлуатації роботизованої системи. Економічний аналіз показав, що застосування модульного зварювального стола дозволяє зменшити час переналагодження, знизити частку браку та підвищити ефективність використання робота. Розрахунок окупності довів, що впровадження конструкції є економічно вигідним і окупається приблизно за 11 місяців, що робить рішення привабливим для промислових підприємств.

6. Зведення всіх отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що розроблена конструкція зварювального стола повністю відповідає вимогам сучасних роботизованих систем зварювання, є технічно обґрунтованою, економічно ефективною та придатною для впровадження у виробничі умови. Результати кваліфікаційної роботи можуть бути використані для модернізації існуючого обладнання, створення нових роботизованих комплексів, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі галузевого машинобудування та автоматизації зварювальних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гоффман Д., Модульні пристрої для зварювання та складання. Hoffmann Group, 2016 р.
2. Довідник стандарту **DIN 876**. Допуски площинності плит для контролю.
3. Довідник стандарту **ISO 2768-1/2**. Загальні допуски, лінійні та кутові розміри; геометричні допуски.
4. Інкропера Ф., ДеВітт Д., Бергман Т., Лавін А. Основи теплопередачі та масоперенесення. 7-ме вид. Wiley, 2011.
5. Довідник стандарту **EN ISO 898-1**. Механічні властивості кріпильних виробів.
6. Довідник стандарту **ISO 9787**. Промислові роботи. Системи координат і номенклатура рухів.
7. Довідник стандарту **ISO 9283**. Промислові роботи. Критерії точності та методи випробувань.
8. Довідник стандарту **ISO 10218-1/-2**. Промислові роботи. Вимоги безпеки.
9. Довідник стандарту **ISO/TS 15066**. Колаборативні роботи. технічна специфікація.
10. Каталоги виробників модульних зварювальних столів і систем фіксації (Demmeler; Siegmund; TTM тощо).
11. Безпека життєдіяльності та охорона праці: практикум / уклад. Тимочко В.О., Городецький І.М., Березовецький А.П. та ін. Львів: Сполом, 2022. 376 с.
12. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посіб. / Пістун І.П., Тимочко В.О., Городецький І.М., Березовецький А.П.; за ред. І.П. Пістуна. Львів: Тріада плюс, 2015. Ч. II. 224с.
13. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посіб. / Пістун І.П., Березовецький А.П., Тимочко В.О., Городецький І.М. та ін.; за ред. І.П. Пістуна. Львів: Тріада плюс, 2017. Ч. I. 620 с.
14. Чернін І.М. та ін Розрахунки деталей машин. 1978 р.
15. Нестеренко В.Ю., Токар І.І. Економіка виробництва, Харків 2012 р.

16. Пахаренко В.Л., Марчук М.М., Пахаренко О.В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням) 2019 р.
17. В.М. Хобта, Підвищення екологічної чистоти виробництва 2010 р.
19. Березовецький С.А., Березовецький А.П., Гуменюк Р.В., Коруняк П.С. Побудова ступінчастих валів з використанням САПР Solidworks. Львівський національний університет природокористування. Дубляни, 2024. 10 с.
20. Березовецький С.А., Березовецький А.П., Гуменюк Р.В., Швець О.П. Побудова та статичне дослідження складального вузла «Фаркоп» з використанням САПР Solidworks. Львівський національний університет природокористування. Дубляни, 2024. 39 с.
21. Інженерна та комп'ютерна графіка. Михайленко В.Є., Найдис В.М. та ін. К.: Вища школа, 2000. Стукалець І.Г., Березовецький С.А., Баранович С.М.
22. Комп'ютерна графіка: Лабораторний практикум. Львів: ЛНАУ, 2015. 175 с.
23. Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks. Олді Плюс, 2018. 252 с. ISBN 978-966-289-191-1
24. Довідникові ресурси SolidWorks. URL: <https://help.solidworks.com/> (дата звернення: 10.10.2025).
25. Інтернет ресурс. Про затвердження Правил охорони праці під час зварювання металів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0063-13#Text> (дата звернення: 15.10.2025).