МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: **«Удосконалення методів формоутворювального з'єднання листового металу без застосування кріпильних елементів..»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 42 ім
освітньої програми___бакалавр_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»_
Рибак Богдан Сергійович
(прізвище та ініціали)
Керівник канд. с-г наук, доцент
Головатюк Анатолій Анатолійович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Рибаку БогдануСергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту **«Удосконалення методів формоутворювального з'єднання листового металу без застосування кріпильних елементів..»**

керівник проекту Головатюк Анатолій Анатолійович, канд. с-г наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/167
2. Строк подання студентом проекту 18.05.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту літературні джерела, технологічні та технічні рішення, методичні вказівки, методики.

4. Перелік питань, які потрібно розробити**:** *Вступ. 1. Аналіз стану питання за темою дипломного проекту. 2. Теоретичні та/або експериментальні дослідження за темою дипломного проекту. 3. Охорона праці. 4 . Обґрунтування досягнутих результатів. Загальні висновки. Список використаних джерел.*

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025 р.	
2.	Розділ 1. Аналіз стану досліджуваного питання	19.11.2025 р.	
3.	Розділ 2. Експериментальні дослідження	18.12.2025 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026 р.	
5.	Розділ 4. Економічне обґрунтування проекту	09.03.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026 р.	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026 р.	

Студент _____ Рибак Б. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту_____ Головатюк А.А,_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 5
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ 7
1.1 Огляд традиційних методів з’єднання листового металу 7
1.2 Аналіз формоутворювальних з’єднань без кріпильних елементів 9
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ 11
2.1 Технологічна основа: лазерне різання та вільне згинання 11
2.2 Класифікація формоутворювальних з’єднань без кріпильних елементів 13
2.3 З’єднання з виступами та пазами 15
2.3.1 Рекомендації щодо розмірів 16
2.4 З’єднання з гачками 17
2.5 Защіпні з’єднання 17
2.6 З’єднання з поворотом (байонетні з’єднання) 19
2.7 Комбіновані з’єднання та з’єднання з лініями згину 20
3. ОХОРОНА ПРАЦІ 22
3.1 Загальні вимоги безпеки при роботі з лазерним обладнанням .. 22
3.2 Безпека при виконанні операцій згинання листового металу 23
3.3 Ергономіка робочого місця 23
3.4 Вимоги до засобів індивідуального захисту ……29
4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 30
4.1. Аналіз переваг і перспектив формоутворювальних з’єднань……30
4.2. Аналіз конструктивних варіантів і практичне застосування…….25
4.3. Рекомендації щодо проектування ……... 26
4.4. Обмеження методу та напрямки вдосконалення…….27
ВИСНОВКИ 28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 30

ВСТУП

У багатьох галузях промисловості з’єднання листового металу відіграє ключову роль, оскільки забезпечує виготовлення різноманітних функціональних конструктивних вузлів. З розвитком сучасних технологій та зростанням вимог до ефективності виробництва, поряд із давно усталеними методами – зварюванням, клепанням і склеюванням – набувають поширення альтернативні способи з’єднання листового металу без кріпильних елементів.

Формоутворювальне з’єднання – це спосіб з’єднання, за якого взаємний зв’язок між деталями забезпечується геометричною формою елементів без застосування додаткового матеріалу чи кріпильних засобів. Принциповою умовою є відповідна підготовка деталей, яка ефективно досягається за допомогою лазерного різання та згинання.

Актуальність теми зумовлена тим, що незважаючи на очевидні переваги таких з’єднань – зменшення маси вузлів, економія матеріалів, скорочення часу та спрощення складання – у науково-технічній літературі все ще бракує систематизованих відомостей і проектних рекомендацій, що суттєво ускладнює роботу конструкторів і технологів.

Метою дипломної роботи є детальний аналіз і демонстрація можливих конструктивних виконань з’єднань без кріпильних елементів, їх класифікація за способом складання та тривимірне моделювання у середовищі SolidWorks.

Завдання роботи:

– провести порівняльний аналіз традиційних методів з’єднання листового металу;

– розглянути лазерне різання та вільне згинання як ключові технологічні процеси підготовки;

– систематизувати і класифікувати формоутворювальні з’єднання без кріпильних елементів;

– розробити і продемонструвати конкретні варіанти конструктивного виконання таких з’єднань;

– визначити напрямки подальших досліджень і практичного застосування.

Дослідження обмежено з’єднаннями, підготовка деталей для яких передбачає лазерне різання, а для згинання використовується вільне згинання без спеціального оснащення та обладнання.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ

1.1. Огляд традиційних методів з’єднання листового металу

Традиційні методи з’єднання листового металу включають зварювання, клепання і склеювання. Кожен із цих методів має свої особливості, переваги та недоліки, що визначають область їх раціонального застосування.

Зварювання – один із найстаріших і найпоширеніших методів нероз’ємного з’єднання металевих деталей, що полягає у їх нагріванні, розплавленні та злитті. Завдяки широкому спектру процесів та технологій зварювання добре адаптується до різних матеріалів і виробничих вимог [1].

При зварюванні листового металу необхідно враховувати ймовірність деформацій внаслідок швидкого нагрівання, можливе скрізне прогоряння тонкого матеріалу, а також вплив термічно обробленої зони на механічні характеристики. Для з’єднання тонколистових виробів найчастіше застосовують такі методи [2, 3]:

– МІГ/МАГ-зварювання – найбільш універсальний метод, придатний для зварювання листів завтовшки від 0,6 мм;

– ТІГ-зварювання – забезпечує точний контроль підведення тепла, дозволяє зварювати деталі від 0,3 мм;

– плазмове зварювання – характеризується високою концентрацією теплового потоку;

– контактне точкове зварювання – поширене в автомобільній промисловості для з’єднання листів в нахлест.

Варіанти виконання зварних з’єднань листового металу показано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Типи зварних з’єднань листового металу (на основі джерела [2])

Тип з’єднання	Опис	Область застосування
Стикове (рівні кромки)	Листи з’єднуються торцями без перекриття	Листові конструкції
Стикове (відбортовані кромки)	Кромки відбортовуються перед зварюванням	Тонколистовий метал
В нахлест	Один лист перекриває інший	Каросерія автомобілів
Таврове (Т-подібне)	Аркуш перпендикулярний до основи	Рами, корпуси
Кутове	Деталі з’єднуються під кутом 90°	Ящикові конструкції

Клепання – один із найдавніших методів з’єднання, що передбачає пластичну деформацію циліндричного стрижня – заклепки, яка кріпить дві або більше деталей [4]. Метод широко використовується в авіаційній, автомобільній і будівельній промисловості. Розрізняють такі типи з’єднань:

– нахлесткові з’єднання – навантаження передається безпосередньо через заклепку;

– накладкові з’єднання – навантаження передається через накладку.

Для важкодоступних місць застосовують витяжні (сліпі) заклепки [5]. У Таблиці 1.2 наведено порівняння основних методів з’єднання листового металу.

Таблиця 1.2 – Порівняння методів з’єднання листового металу [4, 5, 6].

Характеристика	Зварювання	Клепання	Склеювання
Несуча здатність з’єднань	Висока	Середня (послаблення перерізу)	Від низької до середньої
Маса вузла	Незначне збільшення	Збільшення від заклепок	Незначне збільшення
Теплові деформації	Присутні	Відсутні (холодне клепання)	Відсутні
Необхідна кваліфікація	Висока	Низька	Середня
Складність підготовки	Складна	Середня (отвори)	Складна (підготовка поверхні)
Можливість розбирання	Ні	Обмежена	Ні
Ущільнення з’єднання	Добре	Погане	Добре
Швидкість виконання	Залежить від процесу	Середня	Тривала (час твердіння)

Склеювання – метод з’єднання деталей із однакового або різного матеріалу за допомогою клейових речовин. Клей наноситься на поверхні, що з’єднуються, у рідкому, пастоподібному стані або у вигляді плівки. Міцність нероз’ємного з’єднання визначається адгезійними та когезійними силами, а якість значною мірою залежить від підготовки поверхонь [6].

Адгезія – явище взаємодії молекул клею з поверхнею з’єднуваного матеріалу. Когезія – внутрішня міцність клейового шару, яка залежить від часу, температури та тиску у процесі тверднення [6].

1.2. Аналіз формоутворювальних з’єднань без кріпильних елементів

Попри розвиток сучасних технологій і зростання інтересу до формоутворювального з’єднання, в науково-технічній літературі ще бракує

систематизованих досліджень і проектних рекомендацій. Більшість існуючих публікацій зосереджена на окремих аспектах – лазерному різанні, механіці з’єднань або конкретних конструктивних рішеннях – без комплексного підходу до класифікації і порівняльного аналізу.

Формоутворювальне з’єднання без кріпильних елементів базується на механічному зв’язку, що утворюється завдяки геометричним елементам деталей – виступам (вушкам, язичкам), пазам, гачкам. Принциповими перевагами є:

– відсутність додаткового матеріалу або кріпильних деталей;

– виключення теплового впливу на матеріал (на відміну від зварювання);

– скорочення часу та спрощення складання;

– зниження загальної маси вузлів.

До основних обмежень відносять: обмеження по товщині листового матеріалу; вимоги до пластичності та в’язкості матеріалу; труднощі з виконанням жорстких розмірних і естетичних вимог через нерівні поверхні з’єднань.

Ключовими технологіями, що уможливлюють реалізацію формоутворювальних з’єднань, є лазерне різання й вільне згинання – обидва з використанням ЧПК-обладнання. Докладніше вони розглянуті в розділі 2.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ

2.1. Технологічна основа: лазерне різання та вільне згинання

Лазерне різання – безконтактний процес обробки матеріалу за допомогою сфокусованого лазерного пучка, що нагріває поверхню деталі до температури плавлення або випаровування з подальшим видаленням розплавленого матеріалу допоміжним газом [7].

До основних переваг лазерного різання порівняно з альтернативними методами відносять:

– висока швидкість різання й точність;

– вузька і чиста лінія різу, що зазвичай не потребує подальшої обробки;

– мала зона термічного впливу;

– легкість автоматизації та гнучкість при виготовленні складних форм;

– ефективність у дрібносерійному та прототипному виробництві [8].

У Таблиці 2.1 представлено порівняльну характеристику лазерного різання та альтернативних методів.

Таблиця 2.1 – Порівняння лазерного різання з альтернативними методами (на основі [7, 8, 9])

Характеристика	Лазерне різання	Плазмове різання	Гідроабразивне різання	Штампування
Тип процесу	термічний	термічний	гідродинамічний	механічний
Точність	дуже висока	середня	висока	середня
Якість кромки	добра	часто шорстка	добра (при опт. режимах)	середня
Зона термовпливу	мала	середня	відсутня	відсутня
Швидкість різання	висока	висока	низька	дуже висока
Можливість складних форм	дуже добра	середня	дуже добра	обмежена

Лазерне різання використовується для формування пазів і виступів, що є базовими елементами формоутворювальних з’єднань. Окрім того, лазер застосовується для нанесення лінії ослаблення – пунктирних або

перфорованих прорізів вздовж осі майбутнього згину, що спрощують ручне формоутворення (Рисунок 2.1).

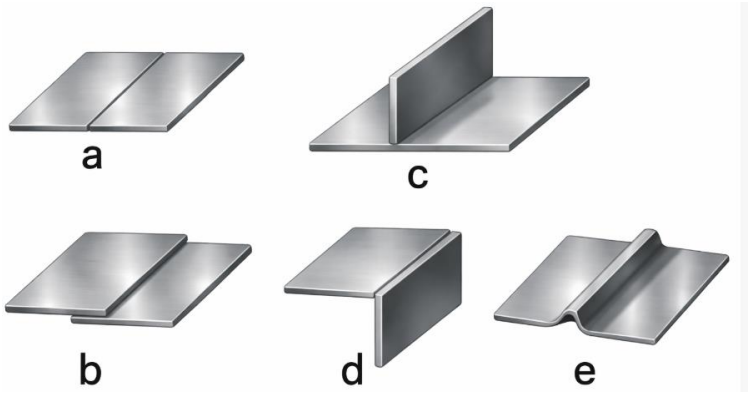


Рисунок 2.1 – Різні форми ліній ослаблення для ручного згинання листового металу. стиковий шов із прямими кромками – **a**, стиковий шов із загнутими кромками – **e**, напускний – **b**, кутовий – **d** та **т**-подібний шов – **e.**

Для формування ліній ослаблення важливо дотримуватись правил: діаметр отворів не повинен бути меншим за товщину листа; відстань між отворами – не менше товщини матеріалу; частка вилученого матеріалу – понад 50 % для забезпечення легкості згину [10].

Вільне згинання – процес формоутворення листового металу, при якому інструменти (пуансон і матриця) служать лише для передачі зусиль і згинальних моментів на заготовку. На відміну від згинання в штампі, заготовка не контактує з інструментом по всій поверхні: її форма є результатом локальних тисків [11].

Розрізняють два основні варіанти реалізації вільного згинання:

– Двоопорне вільне згинання – заготовка спирається у двох точках, зусилля прикладається посередині.

– Консольне вільне згинання – заготовка защемлена з одного боку, пуансон діє на вільний кінець.

Принциповою перевагою є можливість регулювання кута згину зміною ходу пуансона без заміни інструменту. Однак точність нижча, ніж при згинанні в штампі, а кут значно залежить від пружного відновлення і коливань товщини матеріалу [11].

Рекомендований діапазон товщин листового металу для вільного згинання при формоутворювальних з’єднаннях становить від 1 до 5 мм. Матеріал повинен мати достатню пластичність, а пружне відновлення – бути мінімальним.

2.2. Класифікація формоутворювальних з’єднань без кріпильних елементів

На основі конструктивних особливостей і способу складання запропоновано таку класифікацію формоутворювальних з’єднань (Рисунок 2.2):

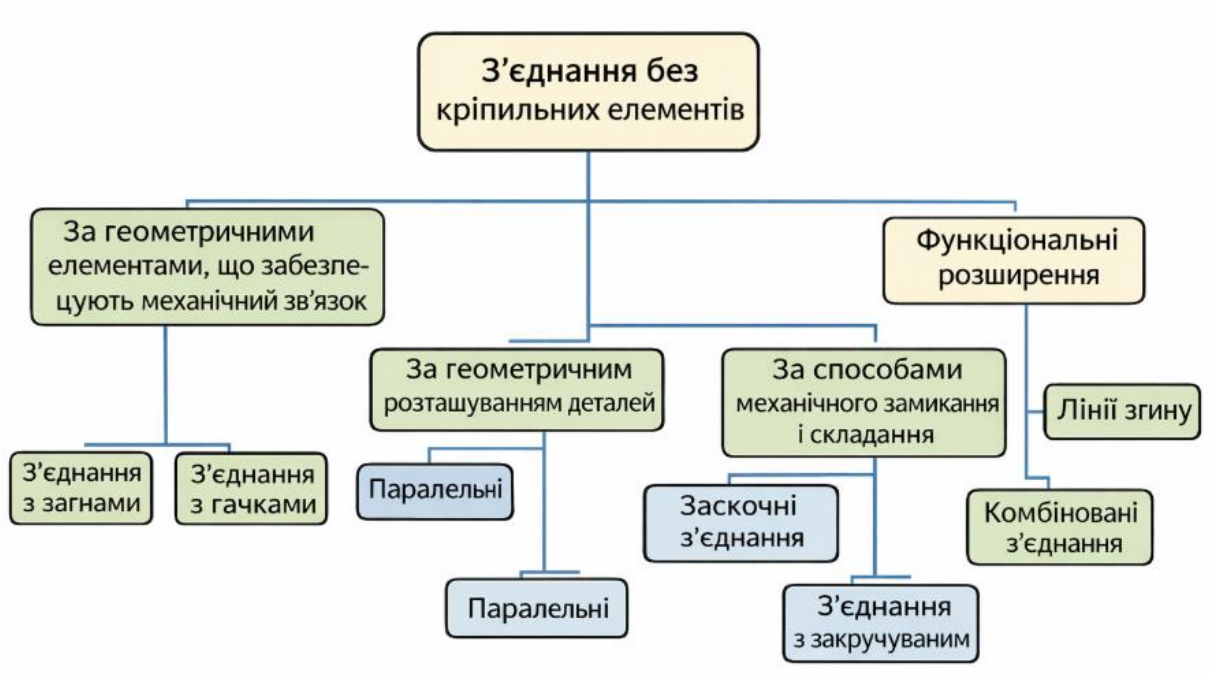


Рисунок 2.2 – Ієрархічна класифікація формоутворювальних з’єднань листового металу без кріпильних елементів (розроблено автором)

1. За геометричними елементами механічного зв’язку:

– з’єднання з виступами і пазами;

– з’єднання з гачками.

2. За геометричним розташуванням деталей:

– паралельне розташування;

– перпендикулярне розташування.

3. За способом механічного замикання і складання:

– защіпні з’єднання (snap-fit);

– з’єднання з поворотом.

4. Функціональні розширення:

– комбіновані з’єднання;

– з’єднання з лазерно сформованими лініями згину.

У Таблиці 2.2 наведено порівняльну характеристику підгруп.

Таблиця 2.2 – Порівняння підгруп формоутворювальних з’єднань листового металу без кріпильних елементів (розроблено автором)

Основна група	Підгрупа	Характеристики	Переваги	Недоліки
За геометрією	З’єднання з виступами та пазами	Виступи вставляються у пази та загинаються	Гнучкість, просте складання	Нерівні поверхні
За геометрією	З’єднання з гачками	Гачки та пази створюють механічний зв’язок	Просте складання, розбірність	Мала стійкість до зворотних навантажень
За розташуванням	Паралельне	Деталі в паралельних площинах	З’єднання у ланцюг	Перекриття (нерівні поверхні)
За розташуванням	Перпендикулярне	Деталі під прямим кутом	Стабільне з’єднання	Складніше досягти щільного прилягання
За способом замикання	Защіпні з’єднання	Пружний елемент защіпується	Розбірність, різні виконання	Потрібна висока точність виготовлення
За способом замикання	З’єднання з поворотом	Замикання поворотом елементів	Швидке складання/розбирання	Потрібен точний профіль
Функціональні	Комбіновані з’єднання	Поєднання різних деталей	Висока гнучкість	Складне проектування
Функціональні	З лініями згину	Локальне ослаблення матеріалу	Просте ручне згинання	Деформації, обмежена товщина

2.3. З’єднання з виступами та пазами

З’єднання з виступами (язичками) та пазами є найпростішим і найпоширенішим варіантом формоутворювального з’єднання. Виступи (вушка, язички) вставляються у пази другої деталі і загинаються, утворюючи механічний зв’язок [12].

Практичний порядок складання включає три етапи:

5. Виступи на одній деталі заздалегідь відгинаються на 90° для полегшення їх вставки у паз.
6. Виступи вставляються у пази другої деталі.
7. Виступи загинаються у бажаному напрямку, утворюючи кінцеве з’єднання (Рисунок 2.3).

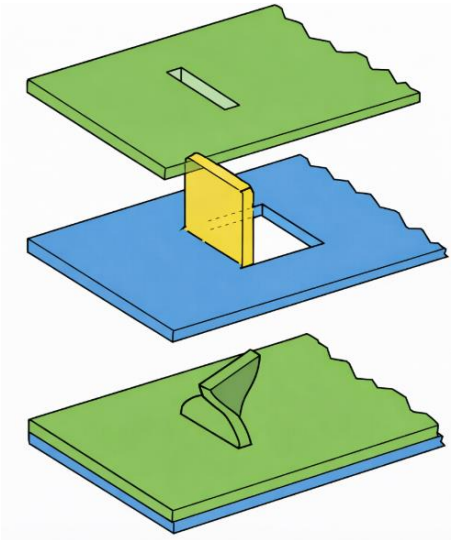


Рисунок 2.3 – Порядок складання з’єднання з виступами (розроблено автором у SolidWorks)

Для підвищення міцності з’єднання рекомендується:

– розташовувати виступи та пази під кутом для підвищення стійкості до зрізувальних зусиль (Рисунок 2.4);

– загинати виступи в протилежні сторони;

– збільшувати кількість виступів (більше виступів – міцніше з’єднання);

– застосовувати лінії ослаблення для спрощення загинання після складання (Рисунок 2.5).

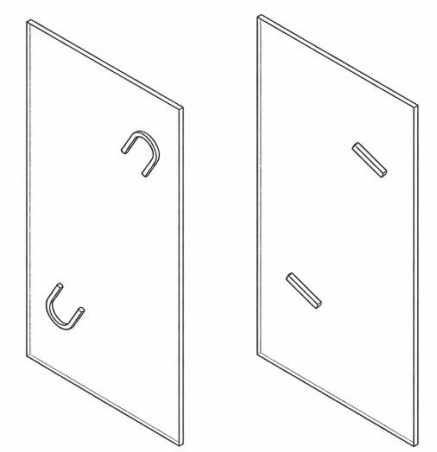


Рисунок 2.4 – Розташування виступів і пазів під кутом для підвищення міцності з’єднання (розроблено автором)

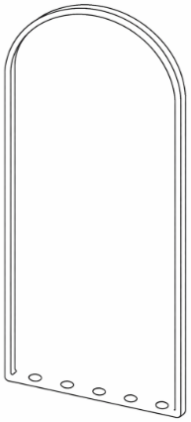


Рисунок 2.5 – Виступ з лінією ослаблення для спрощення загинання (розроблено автором)

2.3.1. Рекомендації щодо розмірів

На основі огляду літератури та промислової практики встановлено такі рекомендовані допуски для з’єднань з виступами та пазами [12, 13]:

– для тонкого листа (товщина близько 1,5 мм) – рекомендований допуск приблизно ±0,08 мм на сторону;

– для листа товщиною близько 3,2 мм – ±0,13 мм на сторону;

– для листа завтовшки 6,3 мм і більше – від 0,25 до 0,50 мм на сторону.

Висота паза має дорівнювати товщині матеріалу з урахуванням плюсового допуску на товщину та подвоєного відхилення різання. Для полегшення складання та забезпечення щільного прилягання виступ рекомендується робити трохи вужчим від паза.

2.4. З’єднання з гачками

З’єднання з гачками схоже за принципом на з’єднання з виступами та пазами, однак замість виступів для загинання використовуються спеціальні геометричні форми – гачки [12]. Складання відбувається шляхом вставки гачків крізь пази на другій деталі з наступним зміщенням деталі вниз, що забезпечує защіплення гачка у пазу. Особливістю є можливість з’єднання листів різної товщини, а ширина прорізу в гачку має відповідати товщині листа плюс 0,1 мм на сторону [12] (Рисунок 2.6)..

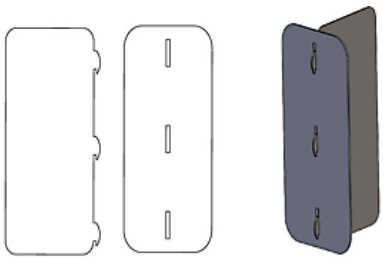


Рисунок 2.6. З’єднання гачками.

До переваг належать: можливість з’єднання різних товщин; розбірність з’єднання при достатньому зусиллі; відсутність додаткових операцій після складання. Недолік – мала стійкість до навантажень у напрямку, протилежному орієнтації гачків.

2.5. Защіпні з’єднання

Защіпні з’єднання (Рисунок 2.7- 2.9) є новим і менш поширеним методом для листового металу. Їх принцип полягає в тому, що при складанні один або декілька пружних елементів пружно деформуються і після проходження крапки зупинки защіпуються у кінцевому положенні, фіксуючи деталі [12].

Основна відмінність від традиційних з’єднань – зусилля складання і замикання забезпечується пружною деформацією самого матеріалу, а не внаслідок пластичного загинання виступів. Такі з’єднання можуть бути розбірними або частково розбірними.

Розглянуто три характерні варіанти виконання:

Варіант 1.

Перша деталь сконструйована як підставка з відповідними пазами. Друга деталь меншого розміру має пружний елемент, утворений лазерно вирізаною лінією. При складанні другу деталь вставляють у першу; пружний елемент пружно деформується і защіпується у кінцевому положенні. Розбирання можливе натисканням на пружинні елементи, але може бути утруднене через обмежений доступ [12].

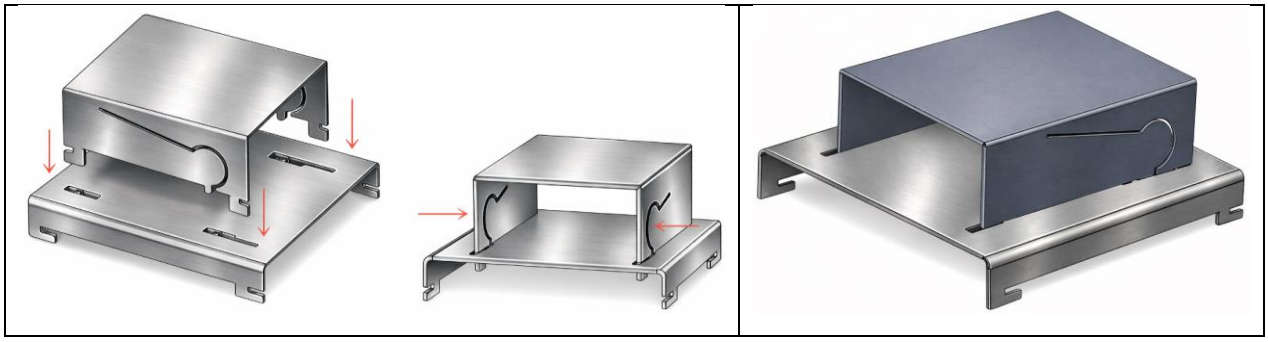


Рисунок 2.7. Проектування защіпного з’єднання.

Варіант 2.

Пружний виступ є частиною підставки. Складання: спочатку вставляють гачки верхньої деталі крізь пази підставки; потім верхню деталь зміщують у бік, при цьому пружний виступ деформується і защіпується [12].

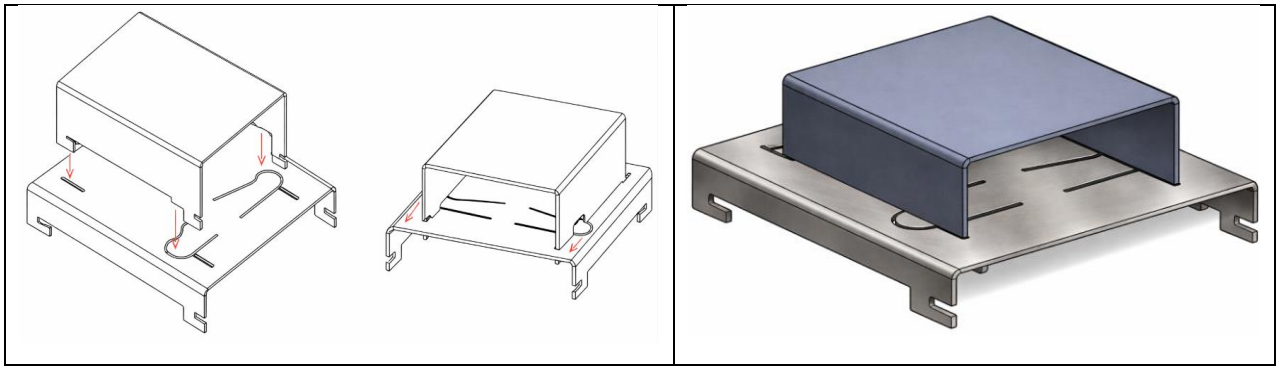


Рисунок 2.8. Проектування защіпного з’єднання.

Варіант 3.

Демонструє поєднання трьох деталей у одному вузлі з використанням різних механізмів замикання, зокрема для одного з елементів передбачено використання викрутки для вставки [12].

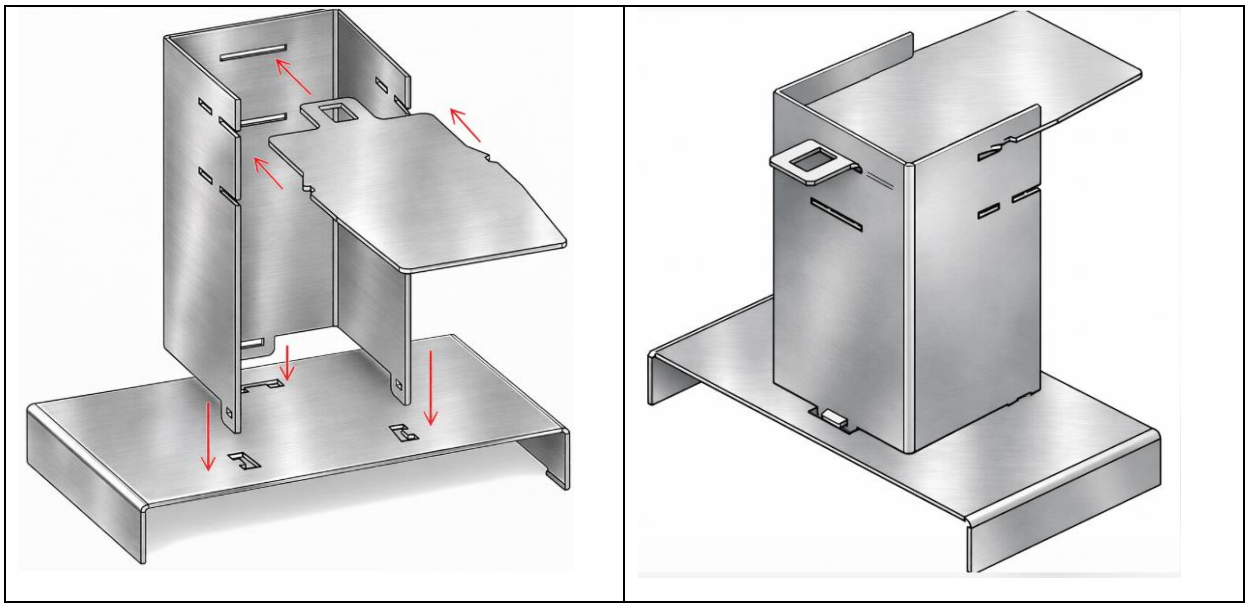
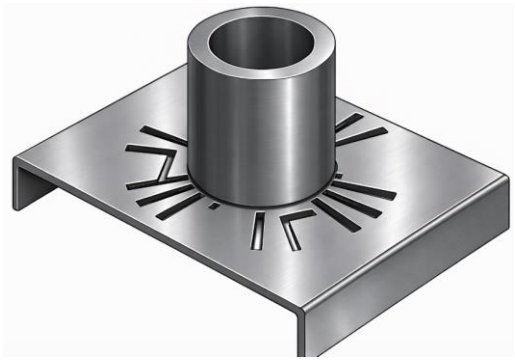


Рисунок 2.9. Проектування защіпного з’єднання.

2.6. З’єднання з поворотом (байонетні з’єднання)

Такі з’єднання поширені для кріплення трубчастих деталей до листових. Принцип – замикання відбувається поворотом одного елемента відносно іншого. Базовий елемент з листового металу має відповідний профіль, що відповідає радіальним гачкам або виступам на трубі. Для забезпечення з’єднання необхідні поворот і пружна деформація листа [12].



Переваги: швидке складання і розбирання; можливість різних конструктивних виконань; зручність застосування там, де потрібне надійне та легко роз’ємне з’єднання труб і листів.

2.7. Комбіновані з’єднання та з’єднання з лініями згину

Функціональні розширення формоутворювальних з’єднань включають:

Комбіновані з’єднання

Поєднання формоутворювального листового з’єднання з деталями з різних матеріалів – стальними обробленими або пластмасовими елементами, виготовленими литтям під тиском (Рисунок 2.10). Такі з’єднання, як правило, прості у складанні й розбиранні.

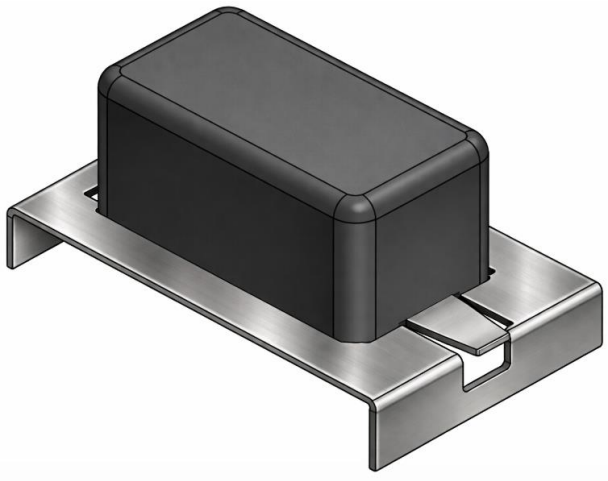


Рисунок 2.10. Комбіновані з’єднання

.

З’єднання по лініях згину

Застосовуються лазерно сформовані лінії ослаблення для виготовлення об’ємних вузлів з одного листового заготовника без додаткового обладнання (Рисунок 2.11). Пунктирні отвори або прорізи вздовж бажаної осі згину дозволяють вручну згинати матеріал. Остаточна фіксація форми досягається загинанням виступів у пазах суміжних бічних стінок [10].

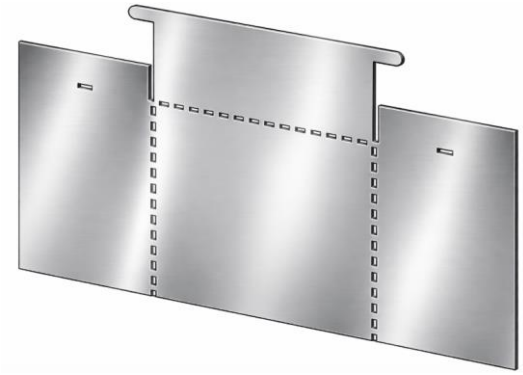


Рисунок 2.11. З’єднання по лініях згину

Умови застосування: ручне згинання звичайно виконується при товщині листа до 3 мм; для більших товщин необхідне використання інструменту.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Загальні вимоги безпеки при роботі з обладнанням для лазерного різання

Лазерне різання відноситься до технологічних процесів підвищеної небезпеки. При роботі з лазерним обладнанням основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами є: лазерне випромінювання, аерозолі та гази від випаровування матеріалу, шум і вібрація, електрична небезпека, а також небезпека пожежі.

Відповідно до вимог охорони праці при організації роботи з лазерним різальним обладнанням слід дотримуватись таких заходів:

3.1.1. Захист органів зору

Лазерне випромінювання становить серйозну небезпеку для очей і шкіри. Для захисту необхідно:

– використовувати захисні окуляри або лицевий щиток з відповідними фільтрами для довжини хвилі конкретного лазера;

– забезпечувати захисні огородження навколо зони різання;

– заборонити прямий погляд у напрямку лазерного пучка;

– розміщувати на вході до робочої зони попереджувальні знаки про лазерну небезпеку відповідно до класу лазерного пристрою.

3.1.2. Вентиляція та захист органів дихання

При лазерному різанні металів відбувається виділення металевих аерозолів і газів, що можуть бути токсичними. Обов’язкові заходи:

– місцева витяжна вентиляція безпосередньо у зоні різання з фільтрацією вилученого повітря;

– загальна припливно-витяжна вентиляція у виробничому приміщенні;

– при недостатній вентиляції – використання засобів індивідуального захисту органів дихання (респіраторів із відповідними фільтрами).

3.1.3. Пожежна безпека

Лазерне різання пов’язане з відкритим вогнем і розплавленим металом. Для забезпечення пожежної безпеки необхідно:

– тримати поблизу обладнання первинні засоби пожежогасіння;

– регулярно очищати зону різання від горючих залишків та відходів;

– не залишати обладнання без нагляду під час роботи;

– зберігати горючі матеріали на безпечній відстані від зони різання.

3.2. Безпека при виконанні операцій згинання листового металу

При ручному та машинному згинанні листового металу можливі такі небезпеки: порізи гострими кромками, удари рухомими частинами обладнання, захоплення одягу або волосся частинами машин.

Заходи безпеки при ручному згинанні:

– використання захисних рукавиць для захисту від порізів;

– захисне взуття із сталевим носком;

– усунення гострих кромок після лазерного різання (якщо потрібно);

– використання спеціальних інструментів (кліщі, молотки) замість голих рук при загинанні виступів.

Заходи безпеки при машинному згинанні:

– огородження рухомих частин пресових гальм та іншого обладнання;

– заборона стороннім особам перебувати в робочій зоні;

– щорічний технічний огляд і обслуговування обладнання.

3.3. Ергономіка робочого місця

При тривалій роботі з листовим металом і CAD-моделюванням необхідно враховувати ергономічні вимоги:

– оптимальна висота робочої поверхні та зручне сидіння для запобігання м’язово-скелетним навантаженням;

– правильне освітлення робочої зони – не менше 300 лк для загального освітлення виробничих приміщень;

– регулярні перерви при роботі за комп’ютером (кожні 45–60 хвилин);

– правильна поза при роботі з монітором для запобігання остеохондрозу.

3.4. Вимоги до засобів індивідуального захисту

При виконанні робіт із лазерним різанням і ручним формоутворенням листового металу обов’язковими є такі засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

– захисні окуляри або щиток (при лазерному різанні);

– захисні рукавиці від порізів (при роботі з листовим металом);

– захисне взуття із сталевим носком;

– спецодяг із щільної тканини (захист від бризок металу та лазерного випромінювання);

– засоби захисту органів дихання (за наявності аерозолів і газів).

4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Аналіз переваг і перспектив формоутворювальних з’єднань

Результати дослідження підтверджують, що формоутворювальні з’єднання листового металу без кріпильних елементів мають суттєві переваги перед традиційними методами з’єднання у ряді практичних застосувань.

Ключові переваги, виявлені в ході роботи:

– Відсутність додаткових матеріалів і кріпильних деталей – що безпосередньо знижує собівартість продукції і масу вузла.

– Виключення теплового впливу на метал – на відміну від зварювання, формоутворювальне з’єднання не спричиняє температурних деформацій і не змінює структуру матеріалу.

– Скорочення часу складання – процес не потребує часу на твердіння (як при склеюванні) або складного позиціонування й затиснення (як при зварюванні).

– Широка варіативність конструктивних рішень – одна й та сама концепція реалізується у десятках виконань, адаптованих до конкретних умов.

– Можливість розбирання з’єднань (при защіпних і байонетних варіантах).

4.2. Аналіз конструктивних варіантів і практичне застосування

На основі тривимірного моделювання у SolidWorks виявлено такі закономірності:

З’єднання з виступами та пазами є найбільш гнучким і широко застосовним типом. Збільшення кількості виступів, їх розташування під кутом та загинання у протилежні сторони суттєво підвищують міцність з’єднання. Лінії ослаблення значно спрощують операцію загинання виступів після складання, що особливо актуально при малих товщинах матеріалу.

З’єднання з гачками забезпечують надійний механічний зв’язок без операцій загинання; однак їх застосування обмежене напрямком можливих

навантажень. Захисні фаски на гачках підвищують безпеку складання і знижують ризик пошкодження матеріалу.

Защіпні з’єднання потребують найретельнішого проектування, оскільки міцність і надійність замикання залежать від точності виготовлення пружного елемента і витриманих зазорів. При правильному розрахунку вони забезпечують зручне розбірне з’єднання.

Байонетні з’єднання (з поворотом) ефективні для кріплення труб до листових елементів там, де необхідне швидке з’єднання і роз’єднання.

Комбіновані з’єднання відкривають можливість інтеграції в єдиний вузол деталей із різних матеріалів (метал, пластмаса), що розширює область застосування методу.

4.3. Рекомендації щодо проектування

На основі отриманих результатів сформульовано такі рекомендації для проектувальників:

– Вибір типу з’єднання здійснювати з урахуванням очікуваних навантажень, вимог до розбірності, товщини матеріалу та технологічного оснащення.

– Для з’єднань з виступами та пазами витримувати рекомендовані допуски, враховуючи товщину матеріалу і наявність покриттів.

– Для защіпних з’єднань обов’язково моделювати механіку пружного деформування елемента до початку виготовлення.

– Лінії ослаблення застосовувати при виготовленні об’ємних форм з одного листа та при необхідності загинання виступів після складання.

– Форму та розміщення пазів обирати з урахуванням концентрації напружень: пази із заокругленими кутами суттєво підвищують втомну міцність з’єднання.

– При проектуванні зачіпних елементів враховувати можливість доступу для розбирання.

4.4. Обмеження методу та напрямки вдосконалення

Попри переваги, формоутворювальні з’єднання мають ряд обмежень, що потребують подальшого дослідження:

– обмежена несуча здатність порівняно зі зварними з’єднаннями;

– нерівні поверхні з’єднань, що ускладнює виконання естетичних вимог;

– залежність якості від матеріалу (необхідна висока пластичність, малий пружній повернення);

– потреба у прецизійному лазерному різанні для забезпечення необхідних допусків.

Перспективним напрямком є проведення натурних випробувань з’єднань для кількісного визначення їх міцності та стійкості до різних видів навантажень, а також розширення досліджень на нові матеріали – алюмінієві сплави, нержавіючу сталь, багатошарові матеріали.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено методи формоутворювального з’єднання листового металу без застосування кріпильних елементів. На основі аналізу літератури, теоретичних досліджень і тривимірного моделювання зроблено такі висновки:

1. Формоутворювальне з’єднання листового металу є перспективною і технологічно обгрунтованою альтернативою традиційним методам (зварюванню, клепанню, склеюванню) для широкого кола промислових застосувань. Метод відрізняється відсутністю додаткових матеріалів, виключенням теплового впливу на метал і спрощеним складанням.

2. Лазерне різання з ЧПК є визначальною технологічною основою, що забезпечує необхідну точність виготовлення геометричних елементів з’єднань. Вільне згинання доповнює лазерне різання як гнучкий метод формоутворення без зміни інструменту.

3. Запропонована класифікація охоплює чотири основні групи з’єднань: за геометричними елементами механічного зв’язку; за розташуванням деталей; за способом механічного замикання; за функціональними розширеннями. Така систематизація дозволяє структурувати і порівнювати різноманітні конструктивні рішення.

4. З’єднання з виступами та пазами є найбільш гнучким типом із широкою варіативністю виконань. Міцність з’єднання зростає зі збільшенням кількості виступів, їх нахиленим розташуванням і загинанням у різні боки.

5. Защіпні з’єднання є найскладнішими у проектуванні, але забезпечують розбірне з’єднання без додаткових кріпильних елементів і привабливі для застосувань, де потрібне багаторазове розбирання.

6. Застосування ліній ослаблення суттєво спрощує ручне загинання матеріалу і дозволяє виготовляти тривимірні форми з одного листового заготовника, що ефективно для дрібносерійного та прототипного виробництва.

7. Виявлені обмеження методу (несуча здатність, залежність від матеріалу, естетичні обмеження) визначають напрямки подальших досліджень, зокрема натурних випробувань на міцність і стійкість до навантажень для кількісного підтвердження і розширення проектних рекомендацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калінін О. І. З’єднання деталей машин. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – 268 с.
2. Коваленко В. С. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. – Київ: Либідь, 2015. – 512 с.
3. Окерблом Н. О., Лаптєв В. П. Технологія зварювання металів. – Київ: Техніка, 2016. – 352 с.
4. Cary H. B., Helzer S. C. Modern Welding Technology. – 6th ed. – Upper Saddle River: Pearson Education, 2005. – 784 p.
5. Huth H. Riveting and Mechanical Fastening in Engineering Structures. – Berlin: Springer, 2009. – 420 p.
6. Petrie E. M. Handbook of Adhesives and Sealants. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 800 p.
7. Steen W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. – 4th ed. – London: Springer, 2010. – 558 p.
8. Powell J. CO_2 Laser Cutting. – London: Springer-Verlag, 1998. – 320 p.
9. Ion J. C. Laser Processing of Engineering Materials. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p.
10. Todd R. H., Allen D. K., Alting L. Manufacturing Processes Reference Guide. – New York: Industrial Press, 1994. – 640 p.
11. Groover M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems. – 5th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 1025 p.
12. Thompson R. Sheet Metal Design Handbook. – New York: McGraw-Hill, 2004. – 480 p.
13. Budynas R. G., Nisbett J. K. Shigley’s Mechanical Engineering Design. – 9th ed. – New York: McGraw-Hill, 2011. – 1050 p.
14. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Engineering and Technology. – 7th ed. – Pearson Education, 2014. – 1200 p.

15. Dassault Systèmes. SolidWorks 2022 User Guide. – Waltham: Dassault Systèmes, 2022. – 950 p.
16. DIN 6930. Design of Sheet Metal Parts. – Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2013.
17. DIN 8588. Sheet Metal Forming Processes. – Berlin: DIN Standards, 2003.
18. AWS Welding Handbook. Welding Processes. – 9th ed. – Miami: American Welding Society, 2011.