

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення автоматизованої системи процесу формоутворення  
металевих виробів  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи АУТПм-22-1

Кононенко В.А.

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизоване  
управління технологічними процесами

Керівник доц. Демська Н. П.

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2023р.

Я - Володимир Віталійович Іванюк, ек-  
сперт ХНУРЕ, розумлю і підтримую коні-  
шину закладу із академічної доброчесності.  
Я не надав і не сформував неодушевлену допо-  
мogu під час підготовки евалюаційної  
роботи, виконання ідеї, рекомендацій і  
показів інших авторів мають координати  
на відкобівне джерело.

04.01.2024

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Автоматизоване управління технологічними процесами \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_

« 01 » вересня 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Кононенку Віталію Анатолійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи процесу формоутворення металевих виробів

Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 р. № 1286 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 27.01.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Конструкція має приводи: подачі заготовки з пачки, накопичувального конвєсера, скидання заготовки з накопичувача (пневмоциліндр), подачі заготовки на напрямні (пневмоциліндр), упору заготовки (пневмоциліндр), подачі дорнів та зміщення заготовки до упору до позиції згинання та пробивання (пневмоциліндр);

3.2 Верстат має гідравлічні приводи: руху затиску заготовки до згинальних валків (гідроциліндр), руху напрямних роликів (гідроциліндр), повороту згинальних валків (гідроциліндр), підриву дорнів при їх витягуванні (гідроциліндр), подачі пробивних циліндрів (пневмоциліндр); 3.3 Модуль являє собою комплекс в якому об'єднані електромеханічні, пневматичні проводи (агрегати) та програмне забезпечення, що разом забезпечує злагоджену роботу по переміщенню та орієнтуванню, формування заготовки; 3.4 Модуль повинен забезпечувати очікувані геометричних та енергосилові параметри готового виробу.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ. Визначення мети, об'єкту і предмету дослідження; 4.2 Дослідження питання удосконалення процесу формоутворення виробів з малопластичних металів; 4.3 Розробка математичної моделі та проведення розрахункового аналізу процесу згинання сталевих труб; 4.4 Розрахунок параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів; 4.5 Підбір технології процесу формоутворення виробів з малопластичних металів; 4.6 Питання забезпечення безпечних умов роботи обслуговуючого персоналу з налагодження та ремонту верстату; 4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Графічний матеріал у вигляді презентації – 20 арк. ф. А 4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Визначення мети, об'єкту і предмету дослідження	01.09-15.09.2023	викон.
2	Дослідження питання удосконалення процесу формоутворення виробів з малопластичних металів	15.09-30.09.2023	викон.
3	Аналіз параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів методом комп'ютерного моделювання	01.10-15.10.2023	викон.
4	Розробка математичної моделі та проведення розрахункового аналізу процесу згинання сталевих труб	15.10-31.10.2023	викон.
5	Розрахунок параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів	01.11-13.12.2023	викон.
6	Підбір технології процесу формоутворення виробів з малопластичних металів	13.12-31.12.2023	викон.
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	10.01.2024	викон.
8	Оформлення пояснювальної записки	12.01.2024	викон.
9	Подання роботи на рецензію	18.01.2024	викон.
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.01.2024	викон.
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	26.01.2024	викон.

Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Кононенко В.А.

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Демська Н. П.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64 арк., 27 рис., 6 табл., 2 дод., 30 джерел.

ФОРМОУТВОРЕННЯ, МАЛОПЛАСТИЧНІ МЕТАЛИ, ГНУТТЯ,  
ГЕОМЕТРИЧНА ФОРМА, ОПРАВКА, ТРУБА.

Об'єкт дослідження – процес формоутворення деталей з малопластичних матеріалів при холодному гнутті.

Предмет дослідження – геометричні та енергосилові параметри деталі, виготовленої шляхом гнуття за допомогою розробленого автоматизованого механізму.

Мета роботи – розроблення автоматизованої системи процесу формоутворення виробів, для підвищення ефективності виробництва деталей шляхом холодного гнуття.

В роботі наведено результати аналізу основних публікацій, нормативних, довідкових матеріалів за темою роботи, проведено аналіз існуючих процесів формоутворення металевих виробів, виконана робота по розробці 3D-моделі трубозгинального верстату з автоматизованим механізмом подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей з можливістю використання як частини виробничої лінії з виготовлення окремого продукту, проведено аналіз технічного завдання.

## ABSTRACT

Explanatory note: 64 pages, 27 figures, 6 tables, 2 appendix, 30 sources.

MOLDING, LESS PLASTIC METALS, BENDING, GEOMETRIC SHAPE, MANDLE, PIPE.

The object of research is the process of forming parts from low-plastic materials during cold bending.

The subject of the study is the geometrical and energetic parameters of the part manufactured by bending with the help of the developed automated mechanism.

The purpose of the work is to develop an automated system for the process of forming products, to increase the efficiency of the production of parts by cold bending.

The work presents the results of the analysis of the main publications, normative and reference materials on the topic of the work, the analysis of the existing processes of forming metal products was carried out, the work was carried out on the development of a 3D model of a pipe bending machine with an automated mechanism for feeding the workpiece and automatic unloading of finished parts with the possibility of use as part of a production line on the manufacture of a separate product, an analysis of the technical task was carried out.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз існуючих процесів формоутворення металевих виробів шляхом згинання.....	12
1.1 Дослідження питання удосконалення процесу формоутворення виробів з малопластичних металів .....	12
1.2 Автоматизація процесу формоутворення виробів з малопластичних металів.....	21
1.3 Аналіз параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів методом комп'ютерного моделювання...	25
1.4 Висновки до розділу.....	30
2 Аналіз технічного завдання та постановка задач дослідження.....	32
2.1 Дослідження процесу формоутворення виробів з малопластичних металів.....	32
2.2 Розробка математичної моделі та проведення розрахункового аналізу процесу згинання сталевих труб .....	37
2.3 Висновки до розділу.....	49
3 Оптимізація форми елементів конструкції.....	51
3.1 Розрахунок параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів.....	51
3.2 Питання забезпечення безпечних умов роботи обслуговуючого персоналу, який здійснює роботи з обслуговування, налагодження та ремонту верстату.....	53
3.3 Висновки до розділу.....	57
Висновки .....	59
Перелік джерел посилання .....	61
Додаток А Апробація наукових результатів .....	65

Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	75
--	----



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГВС – гнучкі виробничі системи;

МСЕ – метод скінченних елементів;

РТК – роботехнічний комплекс

ПР – промисловий робот;

СЕ – скінченні елементи;

САПР – системи автоматизованого проектування;

ТП – технологічні процеси;

ЧПУ – числове програмне управління.

## ВСТУП

З поміж існуючих методів обробки металів на ринку України і світу одним з найпоширенішим є процес його гнуття. Вагому нішу промислового виробництва займають вироби з гнутого профілю, які використовуються як у важкій так і легкій промисловості. За допомогою «холодної» технології обробки металевих профілів можна досягти привабливого та естетичного зовнішнього вигляду готових виробів без додаткових витрат енергоресурсів.

З точки зору енергетичних витрат процеси гнуття найчастіше є найбільш економічними. Проте під час формоутворення заготовок, насамперед з малопластичних металів, інтенсивно вичерпується запас пластичності, що може призвести до утворення тріщин, гофроутворення, розривів металу та небажаної технологічної спадковості. Саме тому, в умовах сьогодення, автоматизація процесу гнуття металевих виробів на рівні конкретних виробництв відповідає найважливішим потребам сучасності та в подальшому має бути досліджена.

Розроблення автоматизованої системи процесу формоутворення металевих виробів є метою дослідницької роботи. Досягнути поставленої мети планується шляхом аналізу існуючих на теперішній час трубозгинальних верстатів, які здійснюють процес холодного гнуття заготовок труб з малопластичних металів з метою забезпечення раціонального вибору геометричних параметрів виробів та вдосконалення енергосилових параметрів процесу.

В даній роботі буде проаналізовано та переглянуто різні способи формоутворення металевих виробів на прикладі згинання. Серед них можна окремо виділити вальцювання, компресійний згин, поворотно-витяжне згинання (намотування), а також згинання тягою. Обираючи спосіб згинання труб слід звертати увагу на рівень якості готової деталі, товщини стінки, бажаного діаметру та забезпечення найменшого радіусу вигину.

Об'єктом дослідження є процес формоутворення деталей з малопластичних матеріалів при холодному гнутті.

Предмет дослідження – геометричні та енергосилові параметри готового виробу, формоутвореного шляхом гнуття за допомогою розробленого автоматизованого механізму.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести аналіз існуючих способів формоутворення металевих виробів шляхом згинання;

- проаналізувати існуючі технології трубозгинальних верстатів та факторів, що впливають на процес проектування таких вузлів;

- розробити 3D-модель автоматизованого механізму згинання. Такий механізм буде забезпечений функцією подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей та в подальшому матиме можливість використання як частини виробничої лінії з виготовлення конкретного кінцевого продукту.

Робота виконана відповідно до [1-3], результати опубліковані в [4-5].

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ШЛЯХОМ ЗГИНАННЯ

1.1 Дослідження питання удосконалення процесу формоутворення виробів з малопластичних металів

Суть гнуття металу виходячи з [6] зводиться до того, що одна частина заготовки перегинається по відношенню іншої на будь-який завданий кут. Спосіб згинання металевих виробів використовується з метою надання заготовці вигнутої форми згідно кресленника.

Слід враховувати, що при згинанні, після зняття навантаження кут згинання трохи збільшується. В процесі виготовлення деталей з мінімальними радіусами вигину існує небезпека розриву зовнішнього шару заготовки у місцях вигину [6].

Також слід зазначити, що значення найменшого допустимого радіусу вигину заготовки труби залежатиме від обраного способу гнуття, фізико-механічних властивостей матеріалу та від якості поверхні самої заготовки.

Якщо деталі мають малий радіус заокруглення, то їх слід виготовляти з пластичних металів або попередньо застосовувати термообробку (відпал). В процесі виготовлення виробів, отриманих шляхом гнуття часто виникає необхідність в отриманні ділянок труб, які мають криволінійні вигини під різними кутами. Процесу гнуття можна піддавати як цільнотягнуті так і електрозварні сталеві труби та труби з кольорових металів і сплавів [7].

Також процес гнуття труб можна виконувати як з наповнювачем, таким як річний пісок, так і без нього. Наповнювач запобігає гофроутворенню у місцях, де здійснюється вигин стінок металеві труби. Сам процес гофроутворення залежатиме від властивостей матеріалу заготовки, її геометричних параметрів (діаметра) та завданого радіусу вигину [6].

Здійснення процесу гнуття труб так званим холодним способом з наповнювачем при використанні ручної праці робочого доцільно виконувати у такому порядку. Дерев'яною пробкою щільно закривають спочатку один кінець труби. Тим часом через інший кінець трубу наповнюють сухим піском. Щоб пісок дещо ущільнився злегка постукують по трубі молотком. Опісля забивають пробкою і другий кінець труби. Місце вигину намічається та трубу встановлюється в пристосування. При використанні зварних труб заготовка встановлюється швом з боку вигину. Опісля труба згинається на завданий кут. Отриману деталь перевіряють або шаблоном, або по зразку, потім виймають із пристосування, пробки вибивають, а пісок висипають [7].

При гарячому гнутті труб використовують наповнювач. Заготовка труби заповнюється піском, але в заглушках роблять спеціальні отвори, які забезпечать вихід газів, що будуть утворюватися при діях температури. Місця вигину підігріваються до температури 850-900°C. Для цього використовують паяльну лампу або газовий пальник, а потім трубу згинають у пристосуванні до необхідної величини кута [8].

Існують певні співвідношення між величиною довжина підігріваної ділянки та діаметром труби. Так, практично доведено, що для забезпечення кута вигину 90°C довжина підігрітої ділянки має відповідати шести діаметрам труби, для забезпечення кута вигину рівному 60°C – чотирьом діаметрам, при куті 45°C – трьом, при 30°C – двом. Після завершення процесу гнуття заготовку слід охолодити водою, заглушки вибити, а саму трубу звільнити від наповнювача [6].

Для виконання гнуття труб з кольорових металів перед самими процесом гнуття в заготовку заливають розплавлену каніфоль. Здійснюють процес гнуття після застигання каніфолі. Для виплавлення каніфолі із зігнутої труби її починають підігрівати з кінців, поступово переходячи до середини [6].

Існують певні умови, яких слід дотримуватися при згинанні ,а саме:

– потрібно стежити за рівномірністю витягування зовнішніх стінок та

за посадкою внутрішніх стінок труби;

– не можна згинати трубу і випрямляти складки, якщо труба охолола до температури 800 °С ( про що свідчить світло-вишневий колір), щоб уникнути розривів. В такому випадку для труб великих діаметрів при згинанні використовують багаторазове нагрівання;

– трубу слід згинати досить плавно, не допускати ривків, а гофри, що з'явилися поступово випрямляти молотком;

– після етапу перевірки труби за зразком або шаблоном необхідно видалити заглушки, висипати наповнювач, а потім очистити та промити трубу зсередини.

Вальцювання труб полягає в обкатуванні кінців труб зсередини за допомогою спеціального інструменту (ролика). Для вальцювання інструмент затискають в слюсарних лещатах. Труба встановлюється в отвір, що відповідає її діаметру (загартована втулка), а потім ударами молотка по оправці кінець труби заочується до необхідних розмірів. Кінці труб діаметром більше 18 мм прокатують за допомогою спеціального прокатного верстата, який має сталевий стрижень з конусом на одному кінці і квадратною головкою на іншому. Стрижень розміщений в корпусі, всередині якого розташовані ролики з невеликою конусністю. Найбільш продуктивним є прокатування на спеціальних прокатних машинах і подібних механізмах [6].

В процесі гнуття з використанням ручної праці виникають певні види браку – це і відхилення розмірів виготовлених виробів від зазначених на кресленні, недотримання кута вигину, недостатня якість оброблених поверхонь. Брак може виникати внаслідок неправильного розміщення місць згину, при застосування значних нерівномірних зусиль, використанні оправок, які не відповідають розмірам, при слабкому затисканні заготовки в лещатах тощо [6].

З метою уникнення браку та для забезпечення масового виробництва гнуття металевих труб здійснюється на згинальних машинах.

Відповідно до [7] згинання тягою є найпоширенішим методом, який використовується на згинальних машинах роторного типу, які можуть мати привод (гідравлічний, пневматичний, електричний/механічний), ручний або цифровий керований. Ці машини виконують близько 95% операцій згинання труб. Основний інструмент для згинання тягою складається з обертової форми для згинання, затискної матриці та прес-форми.

При згинанні витяжкою заготовка кріпиться до форми для згинання за допомогою затискної матриці. Коли згинальна матриця обертається, вона притягує заготовку до пресової матриці та, якщо необхідно, щоб запобігти руйнуванню стінки, над внутрішньою оправкою. Притискна матриця може залишатися нерухомою або рухатися разом із заготовкою, щоб усунути тертя ковзного контакту [7].

Згинання тягою є найбільш універсальним і гнучким способом гнуття. Використовується для виконання одиничних згинів до  $180^\circ$  стандартними інструментами та багаторазових або складних згинів спеціальними інструментами (наприклад, оправкою). Він також забезпечує точний контроль потоку металу, необхідний для згинання тонкостінних труб малого радіуса. Одинарні вигини можна з легкістю зробити на сталевих трубках товщиною до 0,25 мм. Однак товщина стінки має бути не менше ніж 0,31-0,41 мм, якщо передбачається багаторазове або складне згинання. Це обмеження зумовлене складністю необхідного інструменту та зміцненням стінок труби за точкою дотику першого згину.

Вальцювання – є найбільш широко використовуваним процесом деформації та відноситься до високоефективних технологічних процесів. Він заключається в процесі проходження металу між двома роликками, які створюють стискаючі напруги, зменшуючи товщину металу. Там, де прості форми потрібно виготовляти у великій кількості, прокатка є найекономічнішим процесом виробництва.

Можна виділити три основних види вальцювання [7]:

– формувальне (використовується для отримання фасонних заготовок з

наступним штампуванням на молотах або пресах);

– штампувальне (використовується для отримання штампованих заготовок);

– калібрувальне (використовується замість обробки матеріалів різанням, забезпечуючи точність виготовлених деталей холодним методом [8].

За допомогою інструмента (узагальнена схема конструкції наведена на рис. 1.1) здійснюється процес гнуття намотуванням.

В загальному вигляді вона складається з таких частин: шаблону 1, який має вигляд ролика в який вмонтовано затискну колодку 2, до складу також входять затискач 3, дорн 4 та опірня колодка 5.

Вказаний інструмент може бути складовою частиною верстату для гнуття труб.

Процес гнуття заготовки труби із застосуванням такого інструменту можна виконати в такий спосіб: трубу слід надіти на дорн 4 та встановити в рівчак згинаючого шаблону 1. Потім трубу закріплюють за допомогою затискача 3. Опірною колодкою 5, трубу в процесі гнуття притискує до шаблону. Вмикаємо верстат і шаблон автоматично повертається на необхідний кут гнуття, стягуючи при цьому трубу з дорну. Так як односторонній зазор між рівчаком шаблону і дорном буде набагато більшим товщини стінки труби, складки в зоні стиску не будуть з'являтися. [9].

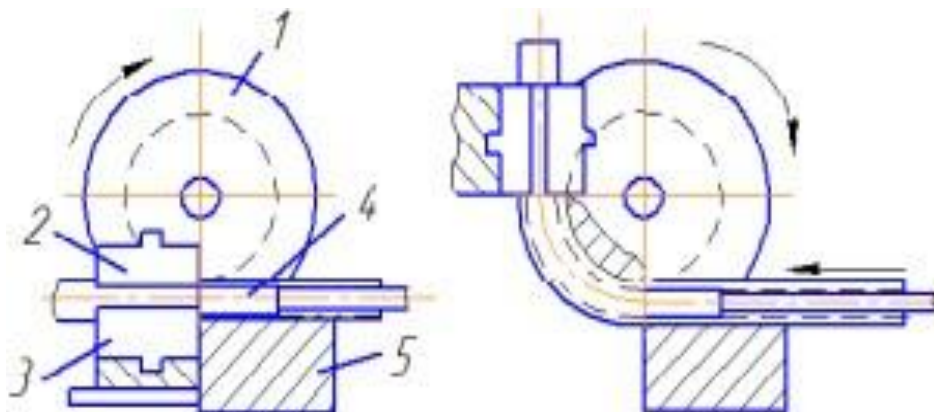


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема інструмента для згинання заготовки труби намотуванням



Дорнове згинання профільної труби – це технологічний процес, що пропонує кілька переваг, які роблять його дуже привабливим для різних індустрій та проектів[9]. До переваг дорнового згинання профільної труби відносяться висока точність та повторюваність згинання. Дорнове згинання дозволяє досягти видатної точності у формуванні вигинів та кутів профільної труби. Це особливо важливо для проектів, де необхідно дотримуватися суворих геометричних вимог [9].

Процес дорнового згинання дозволяє зменшити деформацію матеріалу, що особливо важливо для труб, що використовуються в конструкційних або декоративних цілях. Дорнове згинання може бути застосоване до різних матеріалів, таких як сталь, нержавіюча сталь і навіть спеціалізовані сплави. Це забезпечує гнучкість у виборі матеріалу в залежності від вимог проекту [6].

Цей метод згинання ідеально підходить для створення кастомних деталей та компонентів, які відповідають унікальним потребам нашого проекту. Метод забезпечує видатну точність та продуктивність, що є ключовим фактором для успішної реалізації проекту [9].

Згинання труби просунулося далеко вперед від ущільнення труб твердим мокрим піском. Колись високими технологіями був 6-метровий пакувальний стенд, укомплектований піском і водою. Кабельні оправки з гнучкими вкладеними сегментами-блюдцями використовувалися до кінця 1950-х років. Відтоді дорном є універсальна гнучка оправка зі сталевими ланками різних форм зі звичайним, малим та ультрамалим кроком ланок. Досі використовуються одноплщинні, згинальні та грубі оправки. На рис. 1.2 показано різні конфігурації оправок [10].

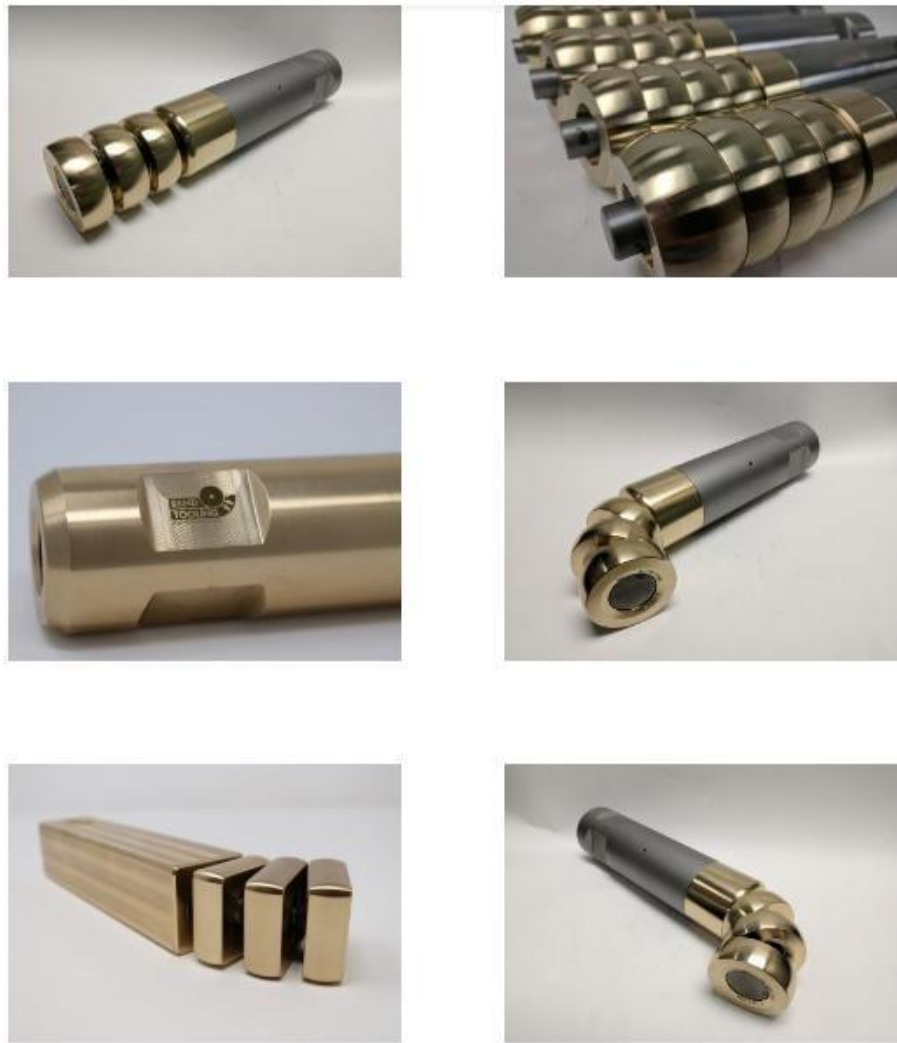


Рисунок 1.2 – Універсальна гнучка оправка зі сталевими ланками

Оправка (дорн) – це інструмент, який вставляється всередину труби, чи іншої порожнистої секції в області дотичної до згину. Його призначення полягає в тому, щоб підтримувати зовнішню стінку заготовки, коли вона натягується навколо форми згину, і зменшити кількість сплюснення під час згину [9]. Крім того, оправлення запобігає утворенню зморшок на внутрішній стінці згину. Інколи оправка має допоміжну функцію як інструмент для визначення розміру при роботі з дуже вузькими допусками в тонкостінних трубах, які зазвичай використовуються в авіаційній та аерокосмічній промисловості [10].

На більшості тягово-згинальних верстатів оправка прикріплена до стрижня, закріпленого в задній частині машини. Стрижень має можливість

поперечного та поздовжнього регулювання для позиціонування оправки відносно радіуса згину та в точці дотику згину. Необхідна довжина опори визначається міцністю заготовки, радіусом і ступенем вигину.

Оправка з вставкою є найпростішим типом і використовується для найменш критичних вигинів, які потребують оправки. Це просто циліндрична форма з обробленим радіусом на одному кінці. Усі оправки мають різьбовий отвір або інший тип фіксатора в задній частині, щоб їх можна було прикріпити до опорного стрижня. Оправка заглушки розташовується так, щоб її кінець був на 1,6-3,2 мм поза точкою дотику форми згинання. Це підтримує зовнішню стінку згину в точці, де межа текучості перевищується, і згин фактично формується [10].

Формувальна оправка є удосконаленням типу втулки, зовнішній край її наконечника має контур відповідно до зовнішнього радіуса заготовки. Зазвичай він розташовується так, щоб весь контурований кінчик був попереду точки дотику. Таким чином, він підтримує зовнішню стінку матеріалу трохи глибше в зоні згину, ніж оправка. Сформований наконечник цієї оправки зазвичай не перевищує довжину більше половини зовнішнього діаметра труби.

Форми оправки для використання з м'якою сталлю або будь-яким кольоровим матеріалом майже завжди виготовляються з інструментальної сталі та загартовані, щоб протистояти зносу, спричиненому натягуванням матеріалів на них. Вибрана інструментальна сталь не повинна деформуватися при термічній обробці. Після загартування оправки зазвичай шліфуються та поліруються, щоб їхня гладка поверхня створювала якомога менший опір. Оправки, які використовуються для згинання нержавіючої сталі, мають бути виготовлені з міцної алюмінієвої бронзи, яка стійка до зачеплення та розтирання під сильним тиском, необхідним для оправок з нержавіючої сталі. Такі оправки зазвичай потребують лише легкого полірування після механічної обробки, щоб отримати відповідну обробку поверхні.

Заглушки та оправки виготовляються з певним зазором між внутрішнім діаметром заготовки та оправкою для полегшення завантаження та розвантаження заготовки. Величина заниженості оправки залежить від типу матеріалу та фізичних якостей труби, що згинається, а також від радіуса вигину. Для більшості згинів у безшовних трубах або трубах з розміром зовнішнього діаметра до 31,8 мм і товщиною стінки до 2,41 мм, достатньо щоб зазор складає 0,13-0,18 мм між оправкою та внутрішнім діаметром труби. Для більш товстостінних стін слід вказати зазори до 0,38 мм або більше.

Намотування або поворотно-витяжний спосіб згинання є одним з найпоширеніших в серійному та крупносерійному виробництві. Такий вид згинання реалізований на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ), які можуть мати гідравлічний або електричний приводи.

Трубозгинальні верстати класифікують за різними ознаками. Проте у світовій практиці склалася досить стійка та універсальна класифікація за кількістю осей верстатів з ЧПУ. Тобто трьохвісьовий верстат може виконувати тривимірне гнуття деталі, але в одну сторону та з одним радіусом. Для використання 2-х або 3-х різних радіусів потрібна іще одна рухлива вісь верстата.

Прикладами таких верстатів є OMG CN -2T від компанії OMG (Італія) або CNC-30 EMR-P від компанії CSM (Китай). Існує кілька компоновок верстатів, але, як правило, для реалізації гнуття в другому напрямку передбачається додаткова згинальна консоль з інструментальним оснащенням, що дзеркально повторює оснащення першої.

Ключові порівняльні характеристики різних трубозгинальних верстатів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики трубозгинальних верстатів

Характеристики верстатів	Верстат OMG CN-2T	Верстат CNC-30 EMR-P
1	2	3
Максимальний розмір труби	40x2 мм	30x2 мм
Максимальний кут згину	190°	190°
Максимальний радіус згину	100 мм	270 мм
Мінімальний радіус згину	40 мм	15 мм
Максимальна довжина заготовки	4500 мм	2800
Встановлена потужність	38 кВт	15,92 кВт
Точність	±0,1 мм	±0,1 мм
Рівень автоматизації процесу	Неповна автоматизація процесу	Неповна автоматизація процесу

Виходячи з вищевикладеного можна дійти висновку, що існують спільні недоліки наявних на світовому ринку верстатів, які не залежать від загальних технічних характеристик верстатів (експлуатаційних даних гнуття, характеристик обробки труби та інших загальних характеристик). До таких недоліків можна віднести неповну автоматизацію процесу виробництва.

Тобто жодним з досліджених зразків не забезпечується робота без участі людини – оператора. Отже існує необхідність створення автоматизованого механізму згинання, який може виконувати функцію подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей та мати можливість використання як частини виробничої лінії з виготовлення окремого продукту.

## 1.2 Автоматизація процесу формоутворення виробів з малопластичних металів

Аналізуючи визначення автоматизації виробничих процесів серед різних джерел, робимо висновок, що найбільш повне його визначення наведено в [11]. Під автоматизацією слід розуміти комплекс заходів з

розробки нового технологічного обладнання, яке здійснює робочі і допоміжні процеси без участі людини. Тобто це конструкторсько-технологічна задача. Метою автоматизації є створення нової техніки на базі прогресивних технологічних процесів обробки, складання і контролю. Створюються нові методи і схеми обробки, конструкцій та компонувань устаткування і комплексів, які, були б неможливі, при безпосередній участі людини в процесі виробництва. Натомість автоматизація виробничих процесів пов'язана з великими капіталовкладеннями. Вона має на меті підвищення показників ефективності виробництва, таких як продуктивності праці, якість продукції за рахунок скорочення кількості робочих місць обслуговуючого персоналу порівняно з неавтоматизованим виробництвом [11].

Рівень та способи автоматизації залежать від серійності виробництва й оснащеності його технічними засобами. За рівнем автоматизації та функціональними можливостями засоби виробництва можна виділити дві різні групи:

– до першої групи можна віднести універсальне устаткування з ручним управлінням. Таке устаткування дасть змогу забезпечити максимальну гнучкість виробництва;

– до другої групи відносяться автоматичні лінії, які мають жорстку програму робіт. Вони забезпечать більш високу продуктивність праці при меншій потребі в робочій силі, а також високу якість продукції. Натомість такі лінії менше пристосовані до видозміни продукції, що випускається підприємством.

З точки зору розв'язуваних ними задач виділяють п'ять різновидів автоматизації.

Перший – стосується безпосередньо автоматизації циклу обробки. Такий вид автоматизації зводиться до того, щоб здійснювати керування послідовністю та характером руху робочих інструментів задля одержання заданих розмірів, форм та якості поверхні оброблюваної деталі.

Слід зазначити, що у верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ) автоматизація першого рівня найбільш повно віднайшла реалізацію. Вони можуть оптимально здійснювати функції управління для широкої номенклатури деталей. В порівнянні з верстатами з ручним управління, ЧПУ верстати істотно підвищують як продуктивність праці, так і якість продукції, що виготовляється тим чи іншим підприємством [11].

Робочий на першому рівні автоматизації може вчиняти наступні дії: встановлювати та знімати предмети праці або заповнювати предмети праці необхідними матеріалами, здійснювати пуск та зупинку обладнання; спостерігати за роботою обладнання, здійснювати контроль за обробкою; робити заміну інструменту, налагодження та переналагодження обладнання; робити прибирання на робочому місці [11].

До першого рівня автоматизації зазвичай можна віднести професії автоматників, верстатників, операторів, які займаються обслуговуванням автоматичних та напіваавтоматичних ліній, наладчиків автоматичних ліній тощо.

До другого рівня автоматизації відносяться операції з завантаження та вивантаження (встановлення або зняття деталі з устаткування). на цьому рівні робітник може обслуговувати декілька технологічних одиниць устаткування одночасно.

Такий рівень автоматизації в основному забезпечується створенням роботизованих технологічних комплексів. Робот також одночасно може обслуговувати одну чи кілька одиниць технологічного обладнання.

Відносно третього рівня автоматизації – контролю, який раніше виконувався людиною. В тому числі це стосується контролю:

- стану інструменту, його своєчасної заміни;
- якості деталей (якості поверхні, розмірів, і т.п.);
- контролю за станом верстата, ходом технологічного процесу, переналагоджуванням або адаптивним керуванням.

Такий вид автоматизації вищезгаданих дозволяє звільнити робочого від постійного безпосереднього зв'язку з верстатом та дає можливість розширити сферу обслуговування устаткування одним. Цей рівень характеризується створенням гнучких виробничих модулів (ГВК) та адаптивних роботехнічних комплексів (РТК). Вони являють собою комплекси, до складу яких входять багатоопераційні верстати, промислові роботи, пристрої приймання та переміщення, пристрої для діагностики, контролю, переналагодження, інші допоміжні пристрої та механізми. Управління комплексом здійснюється за допомогою загального пристрою.

Четвертий рівень – переналагодження устаткування. На більшості існуючих машинах та обладнання переналагодження здійснюється вручну та займає значну частину часу (це може займати від декількох годин до кількох днів). Чим частіше є потреба в переналагодженні, тим більше часу неефективно втрачається. Тому переналагодження устаткування є однією з пріоритетних задач в умовах сьогодення. Обладнання, яке може автоматично переналагоджуватись, дає змогу забезпечити ритмічність роботи виробництва, зменшує витрати часу на виробничий цикл виготовлення продукції, скорочує обсяг незавершеного виробництва.

Гнучкі виробничі системи (ГВС) знаходяться на п'ятому рівні автоматизації. Вони дають змогу забезпечити комплексну автоматизацію всіх ланок виробничого процесу. В тому числі процеси розробки необхідної конструкторсько-технологічної документації, планування, підготовки та управління виробництвом, процеси виготовлення продукції тощо. [11].

В результаті дослідження процесу формоутворення виробів з малопластичних металів планується спроектувати автоматизований механізм згинання з функцією подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей, який може використовуватись як частини виробничої лінії з виготовлення окремого продукту. Цей механізм дасть можливість в автоматичному режимі здійснювати управління послідовністю і характером



рухів робочого інструмента з метою одержання заданих геометричних параметрів – форми, розмірів і якісних характеристик оброблюваної деталі.

Розроблений автоматизований механізм буде призначений для здійснення процесу гнуття, сортування, орієнтування та подання в верстат деталей.

1.3 Аналіз параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів методом комп'ютерного моделювання

При згинання профілю на етапі проектування операцій формоутворення виробів з малопластичних металів методом гнуття слід враховувати методи, які використовуються.

До таких методів відносять компресійний згин, вальцювання, поворотно-витяжне згинання (намотування) та протяжка. Від якості та необхідної продуктивності, бажаного діаметру, товщини стінки та мінімального радіуса вигину залежить вибір того чи іншого методу згинання труби [7].

Точність обробки профілю та стан готової деталі також буде залежати від обраних методів гнуття.

Ряд параметрів, такі як геометрична форма інструменту, швидкість деформування заготовки, течія металів, їх температурна стійкість, тощо будуть впливати на конкурентоспроможність виробництва та собівартість одержаних виробів. Тобто можна зробити висновок, що існують такі групи параметрів – технологічні, конструктивні, фізико-механічні, які слід враховувати з метою забезпечення основної мети виробництва.

Значна кількість важливих елементів конструкції, якими є осесиметричні тіла обертання, у процесі виготовлення та експлуатації зазнають великих змін форми, які часто відбуваються при підвищених температурах, що призводить до зміни фізико-механічних характеристик матеріалу та розвиток різних видів деформацій. Враховуючи можливість

одночасних деформацій пластичності та повзучості, зумовлених як силовим навантаженням, так і зовнішніми температурними впливами, визначення несучої здатності цих об'єктів потребує вирішення задач термов'язкопружної пластичності з урахуванням врахувати пошкодження матеріалу. Імовірність вирішення таких задач механіки твердого тіла, що деформується, суттєво залежить від адекватності використовуваних фізичних співвідношень розглянутим процесам деформування матеріалу, зокрема, з урахуванням наявності великих деформацій і пошкоджень матеріалу [7].

Для чисельного моделювання процесів вирішення задач термов'язкопружної деформації вісесиметричних тіл на основі методів скінченних елементів використовуються скінченні елементи (СЕ), які являють собою прямокутники довільної форми [12].

З метою аналізу зазначених параметрів доречно застосовувати методи числового аналізу та комп'ютерного моделювання [13].

Суть методу базується на теорії, що будь-яка безперервна величина (переміщення, температура, тиск) може апроксимувати дискретною моделлю, яка побудована на великій кількості шматково-безперервних функцій. У базовому випадку робиться припущення, що безперервна величина наперед не відома, і значення цієї величини потрібно визначити в деяких внутрішніх точках області. Якщо для початку зробити припущення, що числові значення цієї величини в кожній внутрішній області відомі, то дискретну модель буде легко побудувати. Далі можемо здійснити перехід до загального випадку [14].

В основі методу лежить дискретизація об'єкта з метою розв'язування рівнянь механіки суцільного середовища в припущенні, що ці співвідношення виконуються у межах кожної з елементарних областей. Ці області називаються кінцевими елементами. Вони можуть відповідати реальній частині простору, як, наприклад, просторові елементи (рис. 1.3–1.4), або ж бути математичною абстракцією, як елементи стрижнів, балок, пластин чи оболонок (рис. 1.5). У межах кінцевого елемента призначаються

властивості обмеженої ним ділянки об'єкта (це можуть бути, наприклад, характеристики жорсткості та міцності матеріалу, щільність, тощо) і описуються поля необхідних величин (стосовно механіки твердого тіла це переміщення, деформації, напруги тощо).

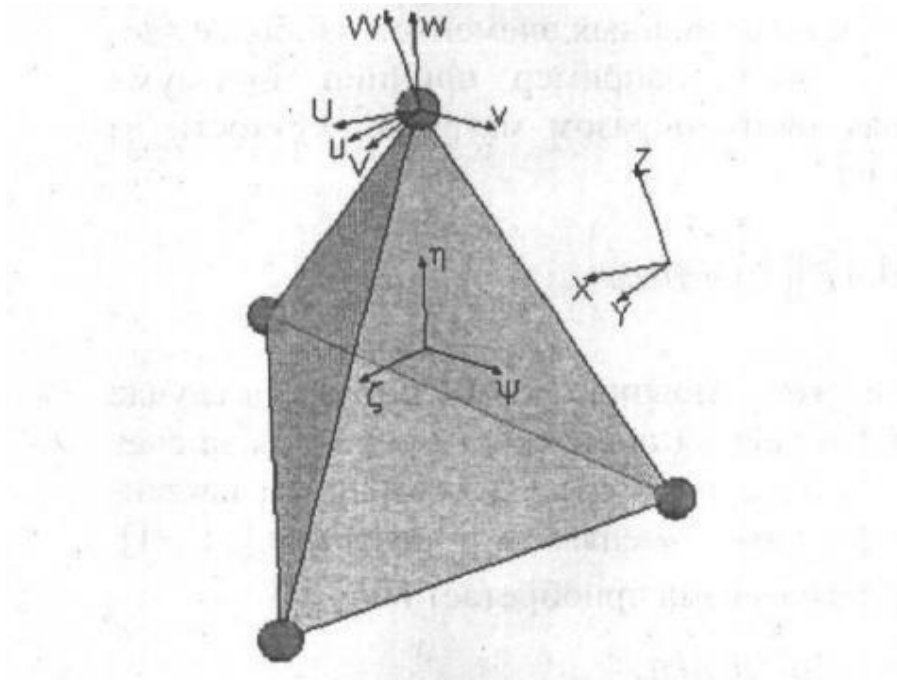


Рисунок 1.3 – Лінійний об'ємний скінченний елемент

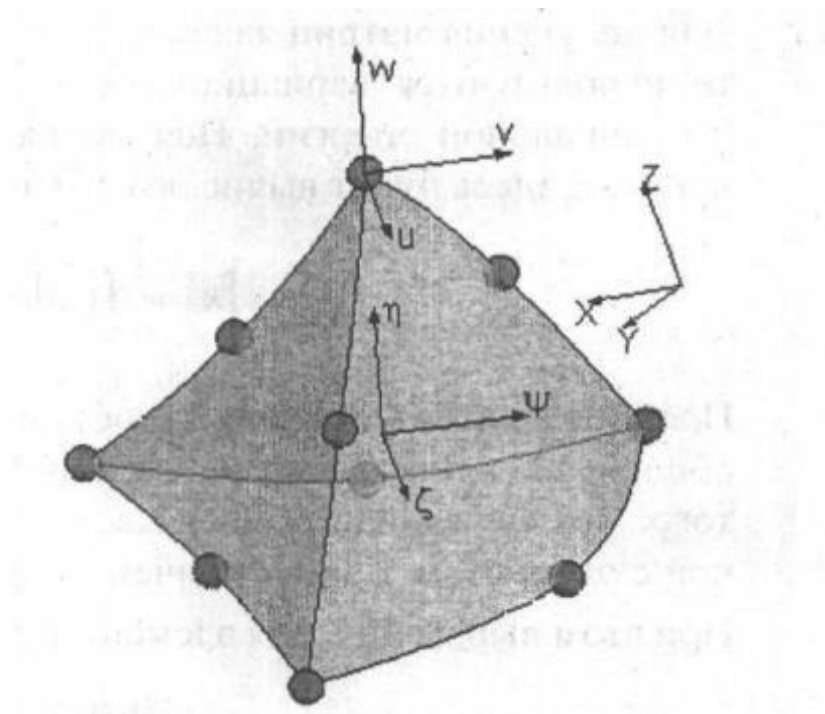


Рисунок 1.4 – Параболічний об'ємний скінченний елемент

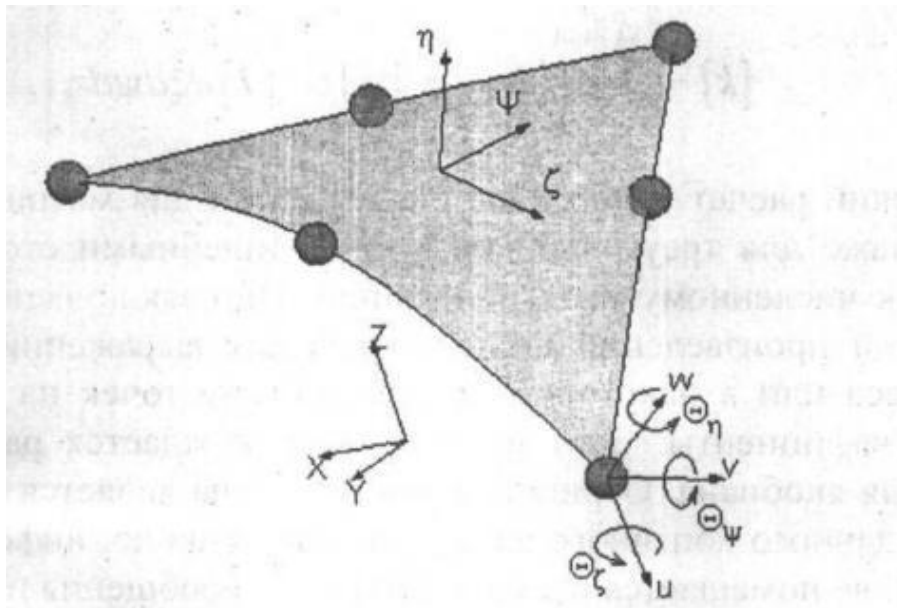


Рисунок 1.5 – Параболічний скінченний елемент поверхні

Параметри з другої групи призначаються у вузлах елемента. Потім вводяться інтерполюючі функції, за допомогою яких відповідні значення можна обчислити в будь-якій точці всередині елемента або його межі. Завдання математичного опису елемента зводиться до того, щоб зв'язати фактори, що діють у вузлах. У механіці суцільного середовища це, як правило, переміщення та зусилля [15].

При побудові дискретної моделі можна зробити висновок, що безперервні величини діють таким чином[15]:

- фіксується кінцева кількість точок у даній області. Це вузлові точки або вузли;
- значення безперервних величин в кожній точці вважається змінним;
- область визначення безперервних величин розбивається на кінцеву кількість областей. Такі області називаються елементами. Такі елементи мають загальні вузлові точки, а в сукупності вони апроксимують форму області;
- безперервна величина апроксимується на кожному елементі поліномом, що визначається за допомогою вузлових значень цієї величини. Для кожного елемента визначається свій поліном. Поліноми підбираються

так, щоб збереглася безперервність величини уздовж меж елемента. Це називається функцією елемента. Вибір форми елементів і їх функцій для конкретних завдань визначає точність наближеного рішення і залежить від винахідливості і майстерності інженера [15].

Враховуючи наявність математичного апарату, який дає можливість отримати матриці жорсткості кінцевих елементів, привести навантаження, прикладених до поверхні або обсягом елемента зусиль до вузлів, а також шляхом розв'язання обернених задач: обчислення полів деформацій та напруг в об'ємі елемента на базі переміщень у вузлах, можна побудувати сам алгоритм МСЕ [15].

Метод скінченних елементів використовує дискретизацію системи за кількома елементами для вирішення диференціальних рівнянь, замінюючи нескінченну кількість змінних обмеженою кількістю елементів відомої поведінки. Елементи мають кінцеві розміри, звідки і пішла назва методу.

Відповідно до типу та розмірів проблеми можуть виникнути різні форми поділу. З них ми визначили вузли та сітки[15]:

Вузли: вузли — це скінченні елементи, з'єднані точками, які можуть рухатися відповідно до навантаження, таким чином даючи відповіді щодо досліджуваного явища.

Сітка: кількість вузлів представлятиме кількість невідомих факторів, які матиме проблема, а її сума відома як сітка [15].

Ця методологія розв'язує математичні рівняння з використанням наближень через підрозділи геометрії, тому вибір відповідної сітки дуже важливий для якості результатів. Його точність залежить від кількості та розміру вузлів і елементів, якості сітки та типу використовуваної функції. Для кращої точності, чим менше повинна бути площа елемента і чим більше кількість вузлів і елементів у сітці. Однак дуже велика кількість елементів призводить до збільшення похибки округлення, що може погіршити точність результату та споживання обчислювальної енергії [15].

Коротше кажучи, геометрія того, що ви хочете проаналізувати, розділена на елементи, які є невеликими частинами, які представляють безперервну область проблеми. Таким чином, можна розробити структурний аналіз за допомогою переміщень, деформацій і напруг. Також можна змодельовати різні сценарії та, таким чином, оцінити продуктивність даного продукту щодо міцності, жорсткості та втоми [16].

Іншими словами, метод скінченних елементів дозволяє нам визначити, чи відповідає аналізований продукт або компонент необхідним стандартам, спостерігати точки концентрації напруги та зрозуміти поведінку конструкції перед навантаженням. Таким чином, він дозволяє покращувати геометрію об'єкта ще до його виготовлення.

Технологія може дозволити інтеграцію між програмним забезпеченням, що використовується для створення геометричного зображення, яке називається CAD (Computer Aided Design), і програмним забезпеченням, яке використовується для вирішення проблеми на основі методу кінцевих елементів, називається CAE (Computer Aided Engineering), залишаючи швидше та більш ефективні аналізи.

Нижче наведено етапи аналізу методом скінченних елементів:

- побудова CAD-моделі системи, що аналізується.
- визначення властивостей матеріалу.
- побудова сітки моделі в програмному забезпеченні CAE.
- визначення навантаження та обмежувальних умов.
- пошук рішення.
- аналіз результатів.

#### 1.4 Висновки до розділу

В ході проведення досліджень проаналізовано існуючі процеси формоутворення металевих виробів шляхом гнуття.

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок що надзвичайно важливим для сучасного машинобудування є удосконалення існуючих і розробка нових технологій формоутворення деталей, які з мінімальними затратами матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів забезпечували б високу продуктивність, а також високу якість виробів.

Також можна стверджувати про недосконалість існуючих на сучасному ринку трубозгинальних верстатів, що полягає в неповній автоматизації їх процесу виробництва.

Пропонується створити автоматизований механізм згинання.

В подальшому планується розробити математичну модель та провести розрахунковий аналіз процесу згинання сталевих труб методом кінцевих елементів.

Також планується розрахувати встановлені енергосилові витрати процесу згинання сталевих труб, а також напружено-деформований стан та ступінь використання ресурсу пластичності в них для дорнового та бездорнового методів гнуття.

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Дослідження процесу формоутворення виробів з малопластичних металів

В результаті дослідження процесу формоутворення виробів з малопластичних металів було спроектовано автоматизований механізм згинання, призначений для здійснення процесу гнуття, сортування, орієнтування та подання в верстат деталей.

Він виконує такий спектр завдань:

- аналіз наявності заготовки;
- автоматизований збір і передача даних з накопичувального конвеєру;
- збір і передача даних при орієнтуванні заготовки;
- подача двох геометрично орієнтованих деталей;
- здійснення процесу формоутворення деталі;
- вивантаження готової деталі до конвеєру.

Загальний вигляд автоматизованого механізму наведено на рис. 2.1.

Розроблена структурна схема механізму наведена на рис. 2.2.

Модуль являє собою комплекс в якому об'єднані електромеханічні, пневматичні проводи (агрегати) та програмне забезпечення, що разом забезпечує злагоджену роботу по переміщенню та орієнтування, формування заготовки.

Верстат має привід подачі заготовки з пачки (мотор-редуктор М1), привід накопичувального конвеєра (мотор-редуктор М2), привід скидання заготовки з накопичувача Ц1 (пневмоциліндр), привід подачі заготовки на напрямні Ц2 (пневмоциліндр), привід упору заготовки Ц3 (пневмоциліндр), привід подачі дорнів та зміщення заготовки до упору до позиції згинання та пробивання Ц4 (пневмоциліндр). Верстат має гідравлічні приводи: привід



руху затиску заготовки до згинальних валків (Ц5; гідроциліндр), привід руху напрямних роликів Ц6 (гідроциліндр), привід повороту згинальних валків Ц7 (гідроциліндр), привід підриву дорнів при їх витягуванні Ц8 (гідроциліндр), привід подачі пробивних циліндрів Ц9 (пневмоциліндр).

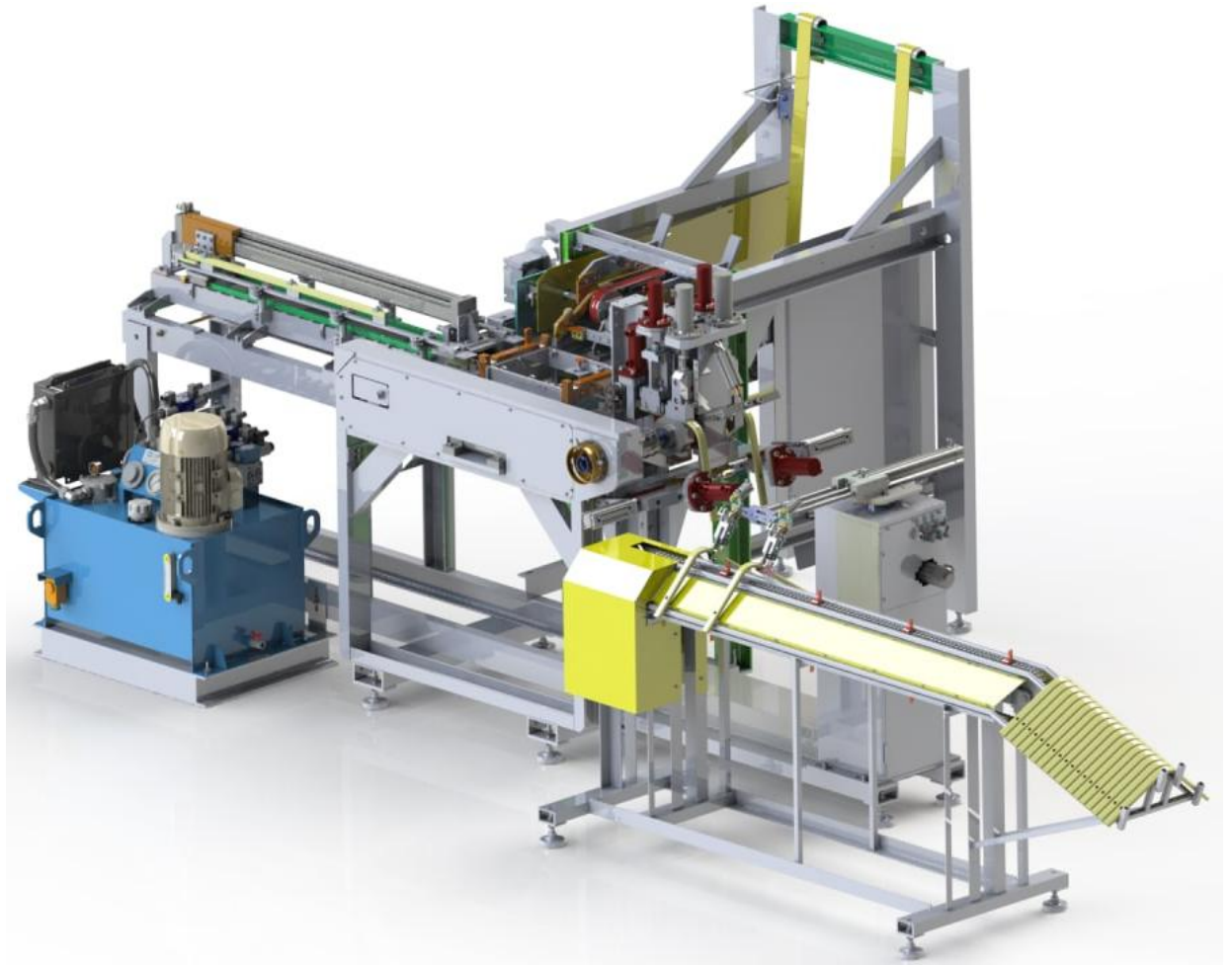


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд автоматизованого механізму

Пробивання отворів здійснюється за допомогою гідроциліндрів Ц10. Верстат оснащений механізмом вивантаження готових деталей, до складу якого входять такі приводи як: Ц11 (пневмоциліндр) – привід переміщення захватів, привід корекції положення захоплень Ц12 (пневмоциліндр), захоплення деталей Ц13 (пневмоциліндр). Поворотний механізм забору готових деталей на  $90^\circ$  здійснюється приводом М3 (сервомотор).

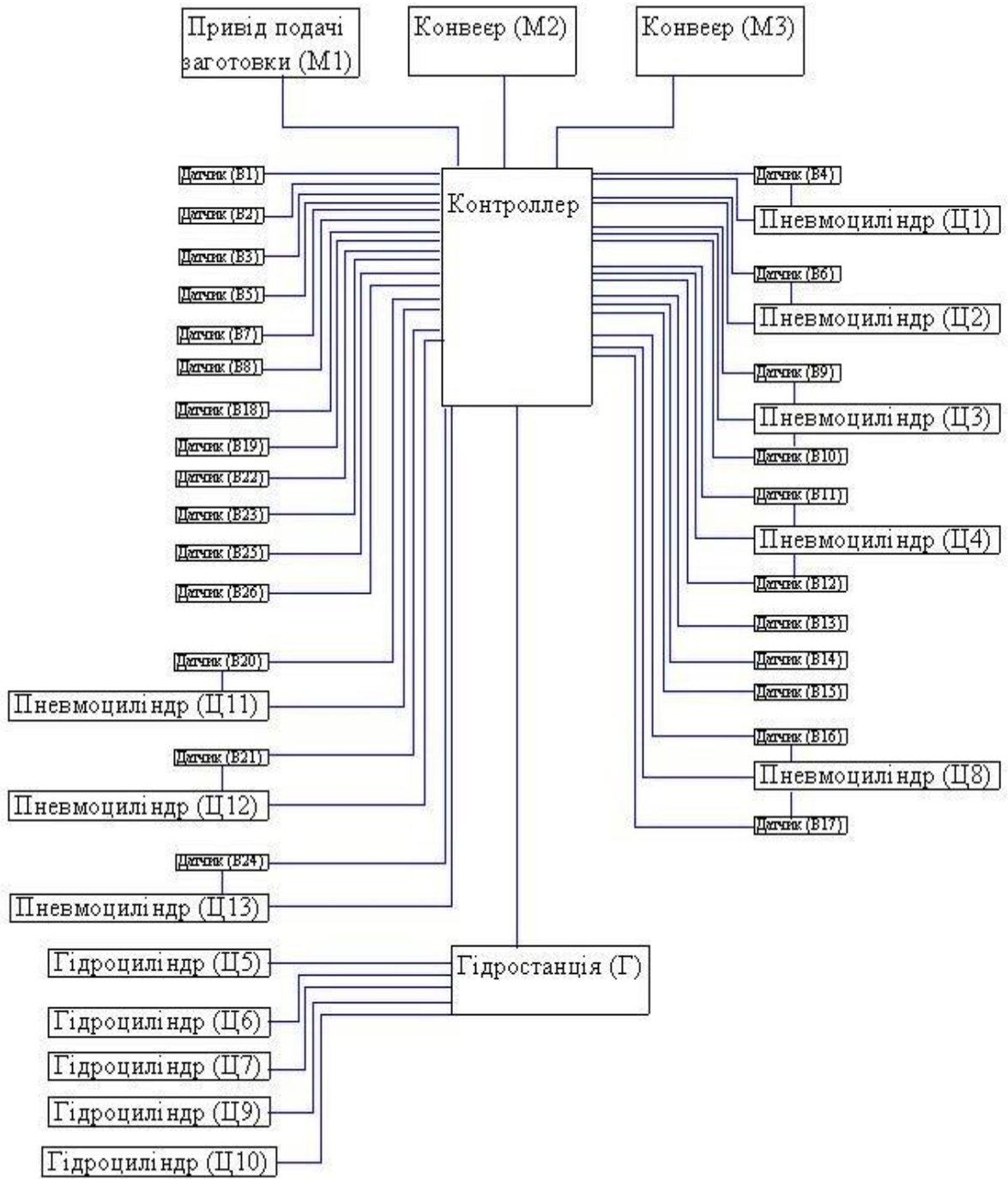


Рисунок 2.2 – Структурна схема автоматизованого механізму

Розміщення заготовки в механізмі наведено на рис. 2.3.

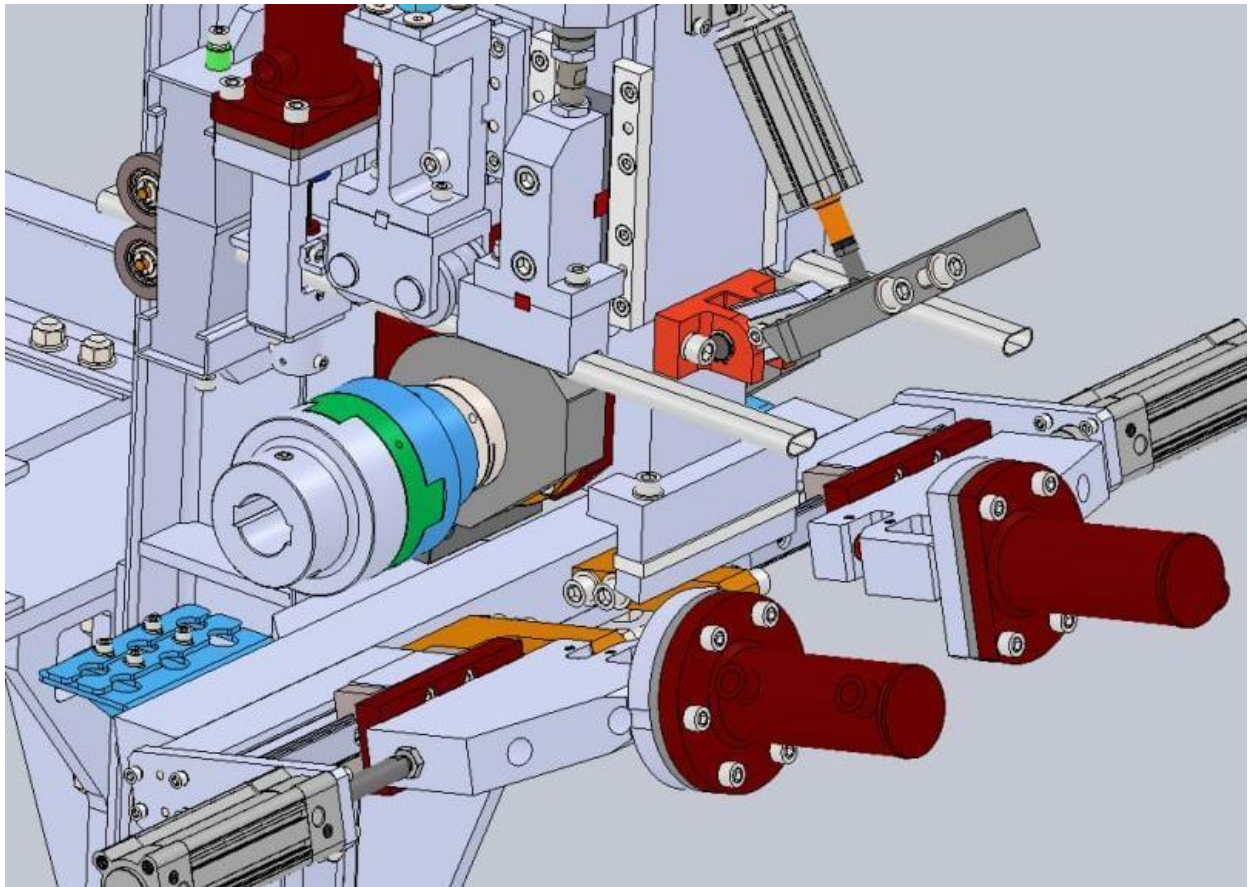


Рисунок 2.3 – Розміщення заготовки в механізмі

Далі спробуємо зорієнтуватися у фізичних процесах, що протікають під час згинання (рис. 2.4).

На профільну трубу діють різні за напрямом та значенням сили, що сплющують її:

- зсередини – сила стиснення;
- зовні – розтягування.

Різноспрямованість векторів цих сил призводить до напруги, що виникають при зміні конфігурації продукту. Чим більше сили сплющування, тим значніше витягується труба в перпендикулярному напрямі.



Рисунок 2.4 – Дія сил напруги на прикладі готового виробу

Тому гнути трубу потрібно так, щоб не порушилася співвісність її ділянок, цілісність стінки, що розтягується, уникати утворення складок на внутрішній поверхні заготівки, що гнеться. Також необхідно зважати на те, що після деформування трубного профілю властиве «відпружинювання» і повернення в початковий стан.

У спроектованому механізмі буде використовуватися оправка (дорн) наведена на рис. 2.5, який складається з основної частини (корпус), формувального наконечника, вісі та пружного елемента.

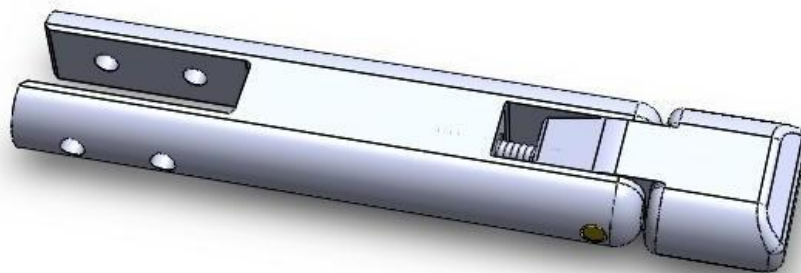


Рисунок 2.5 – Оправка (дорн)

Використання заданої оправки дасть можливість забезпечити якість поверхні, уникнути утворення складок на внутрішній поверхні та просідання на зовнішній стороні заготовки.

В даному розділі розроблені 3D-моделі автоматизованого механізму згинання з функцією подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей, в механізмі планується використовувати оправку (дорн) яка дасть можливість забезпечити якість поверхні заготовки в процесі гнуття.

В подальшому планується дослідити методику розрахунку геометричних параметрів готового виробу, та розрахувати енергосилові витрати в процесі згинання сталевих труб з використанням оправки та без неї.

## 2.2 Розробка математичної моделі та проведення розрахункового аналізу процесу згинання сталевих труб

Під час забезпечення механічного формоутворення деталей криволінійного профілю можливі три види деформації: пружні, пружнопластичні, пластичні. Під час прикладання зусиль для вигину на трубогибочних верстатах деформації, що виникають в металі трубних заготовок, супроводжуються такими явищами [16]:

- утворенням ділянки нейтральних волокон;
- зсувом нейтральної осі відносно геометричної осі труби у бік центру згинання за рахунок різниці моментного опору зовнішньої та внутрішньої частин згинання, тобто, відповідно, розтягнутої та стислої зон перетину труби;
- подовженням та укороченням волокон у подовжньому і поперечному напрямі на зовнішній і внутрішній частинах згину;
- зменшенням товщини стінки на зовнішній частині згину і збільшенням її на внутрішній частині за рахунок виникнення поздовжнього напруження;

- зміною форми поперечного і поздовжнього перетинів у згинанні;
- зміною загальної довжини труби;
- порушенням плавності профілю з можливим утворенням складок (гофр).

Маючи дані механічних характеристик і геометричних параметрів труби, можна визначити параметри процесу згинання: зусилля, необхідне для згинання; величину пружної деформації після зняття навантаження; розміри та форми поверхні робочого інструменту. Визначаючи ці параметри, розв'язуються завдання згинання труб з раціональним розподілом металу у поперечному перетині згину та без порушення суцільності. На виконання цих умов впливають такі чинники: пластичність матеріалу; геометричні параметри (діаметр, товщина стінки згину, форма поперечного перетину труби); спосіб згинання [16].

Для полегшення створення, зміни, аналізу та оптимізації проектів доречно використовувати системи автоматизованого проектування. Аналіз силових навантажень в нашому випадку будемо здійснювати за допомогою інструмента SOLIDWORKS Simulation. Це інтуїтивно зрозуміле віртуальне середовище тестування статичного лінійного руху в часі. Він забезпечує одночасний інженерний підхід, допомагаючий на етапі проектування дізнатися, чи буде створений продукт працювати належним чином і як довго він прослужить [16].

За допомогою обраного інструмента методом скінченних елементів проведемо дослідження процесу гнуття заготовок труб з різною товщиною стінки для визначення товщини заготовки, яка забезпечить оптимальні показники якості деталі з мінімальними видозмінами геометричних форм.

Схема механізму гнуття заготовки наведена на рис. 2.6.



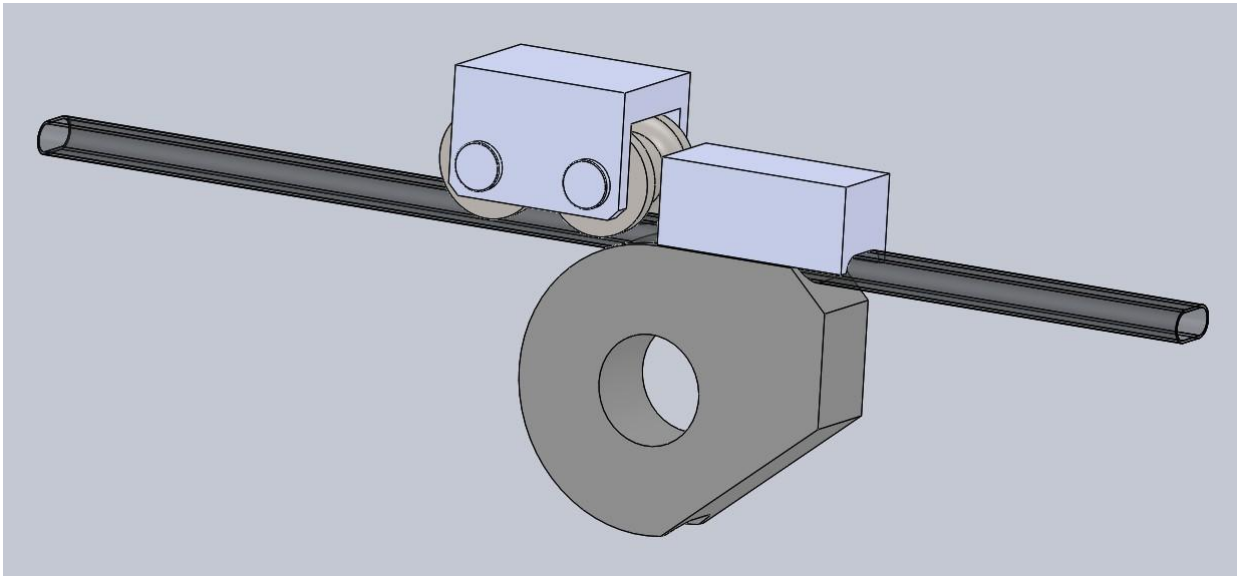


Рисунок 2.6 – Макет схеми механізму гнуття заготовки

Вона включає в себе фасонний валок, прижим, блок прижимних роликів.

Заготовка – труба 30x15, сталь 08 кп з параметрами, наведеними в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики властивостей матеріалу заготовки

Показник	Характеристика
Критерій міцності за замовчуванням	Максимальна міцність von Mises
Межа плинності	175 N/мм <sup>2</sup>
Межа міцності при розтягуванні	390 N/мм <sup>2</sup>
Модуль пружності	203000 N/мм <sup>2</sup>
Кофіцієнт Пуассона	0,29
Масова щільність	7871 kg/m <sup>3</sup>
Модуль зсуву	790000 N/мм <sup>2</sup>
Коефіцієнт теплового розширення	1,25e-05 /Kelvin

Критерій максимальної напруги за Мізесом ґрунтується на теорії енергії формозміни також відомої як теорія Мізес-Хенкі (Mises-Hencky).

У обчисленні головних напруг  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  і  $\sigma_3$ , напруга Мізесу визначається як:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \left( \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ — головні нормальні напруження.

Теорія Мізес-Хенкі стверджує, що пластичний матеріал починає пошкоджуватися в тих місцях, де напруга за Мізесом дорівнює граничній напрузі. У більшості випадків, межа плинності використовується як гранична напруга. Проте алгоритм програми дозволяє використовувати граничне розтягування або задавати свою граничну напругу.

$$\sigma_{\text{vonMises}} > \sigma_{\text{гранична}} \quad (2.2)$$

У разі чистого зсуву (зрізу)  $\tau$  напруга по Мізесу може бути виражена як:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = (\sqrt{3})^{1/2} \tau \quad (2.3)$$

Руйнування з'являється, якщо:

$$\tau_{\text{макс.}} = 0,577 \times \sigma_{\text{плинності}} \quad (2.4)$$

Проведемо дослідження для заготовок з товщиною стінки  $h = 1.2$  мм,  $h = 1.5$  мм,  $h = 2$  мм,

Результати досліджень для товщини стінки  $h = 1.2$  мм наведені на рис. 2.7-2.11.



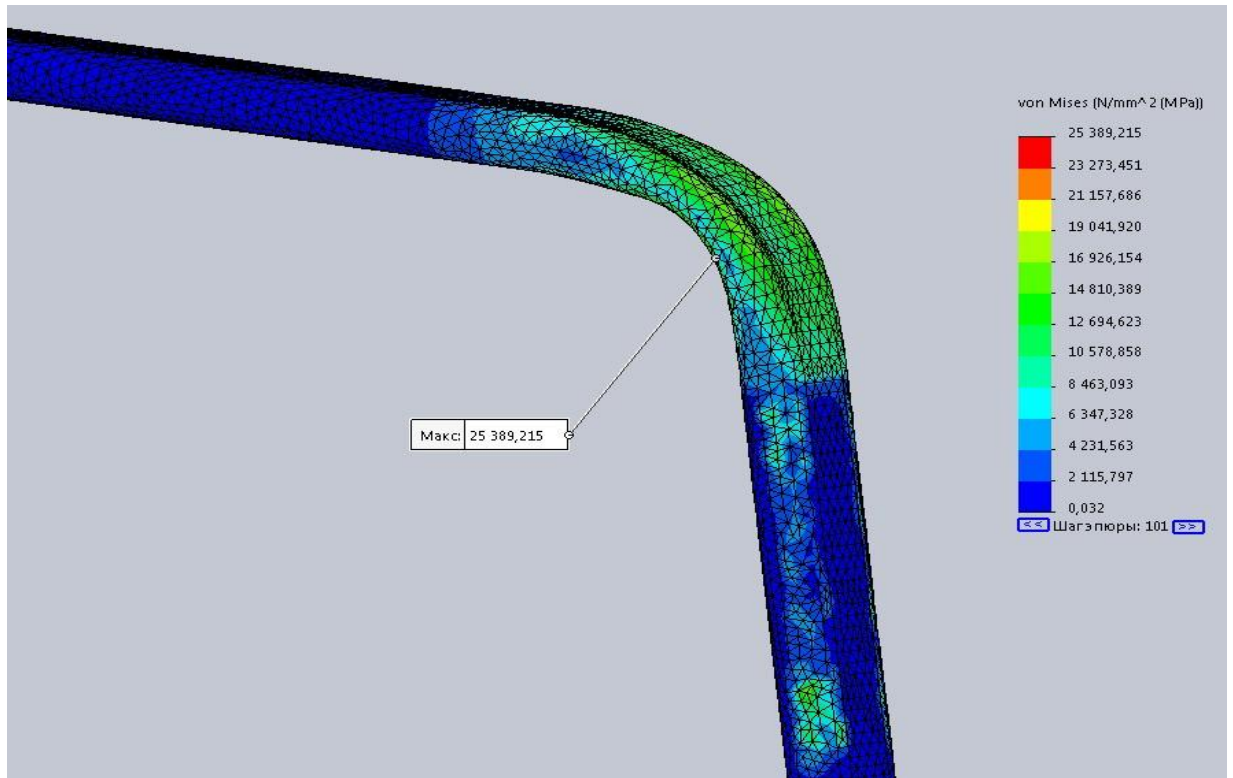


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд деталі зверху при товщині стінки  
 $h = 1.2$  мм

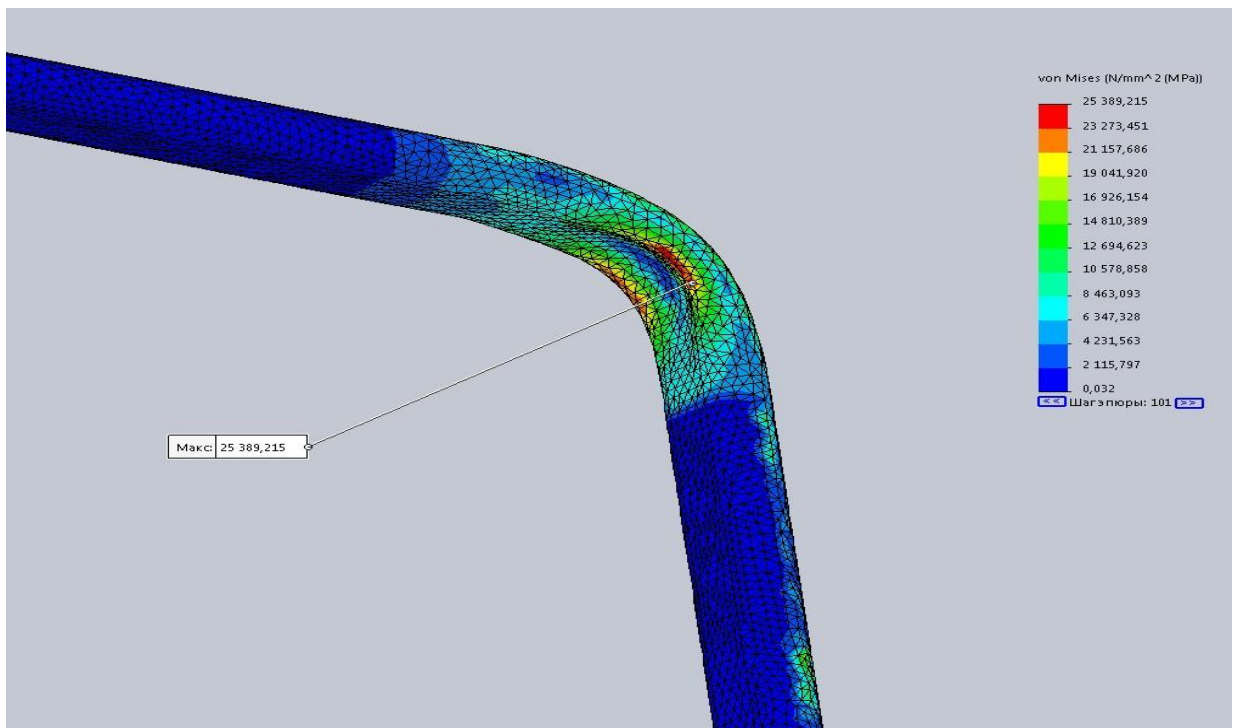


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд деталі знизу при товщині стінки  
 $h = 1.2$  мм

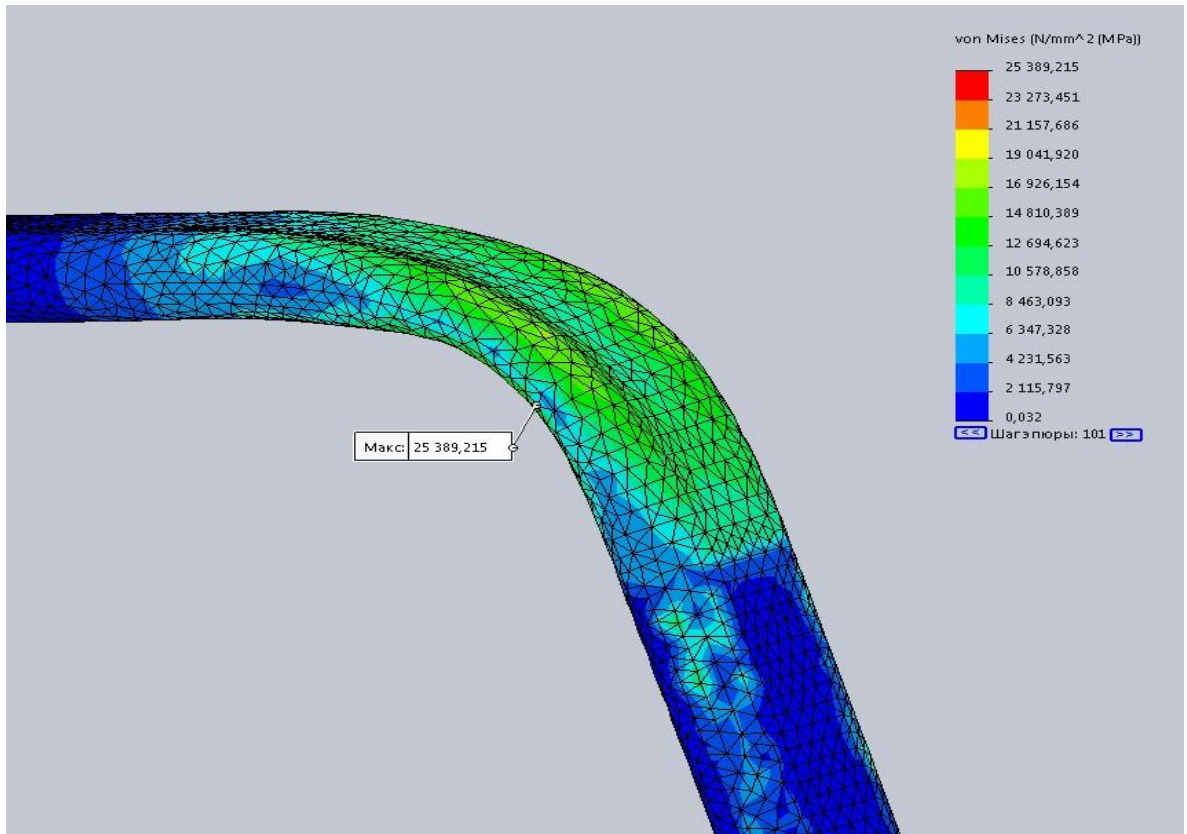


Рисунок 2.9 – Детальний вигляд одержаної деформації деталі при товщині стінки  $h = 1.2$  мм

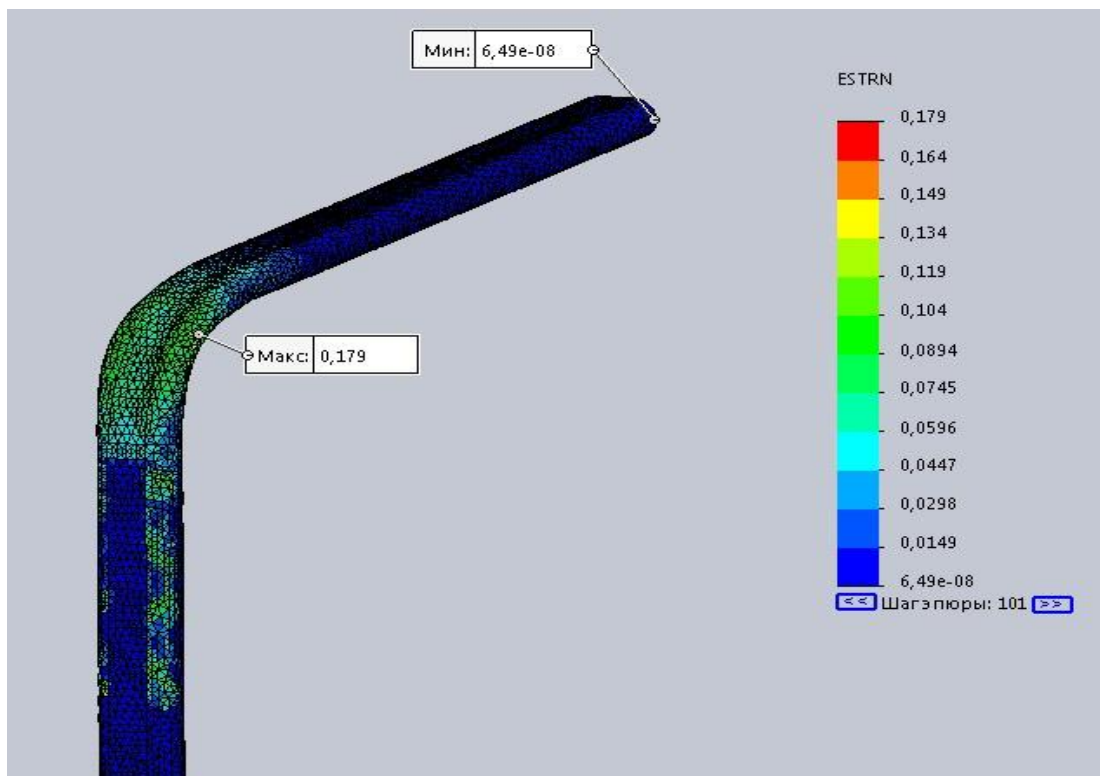


Рисунок 2.10 – Еюра деформації деталі при товщині стінки  $h = 1.2$  мм

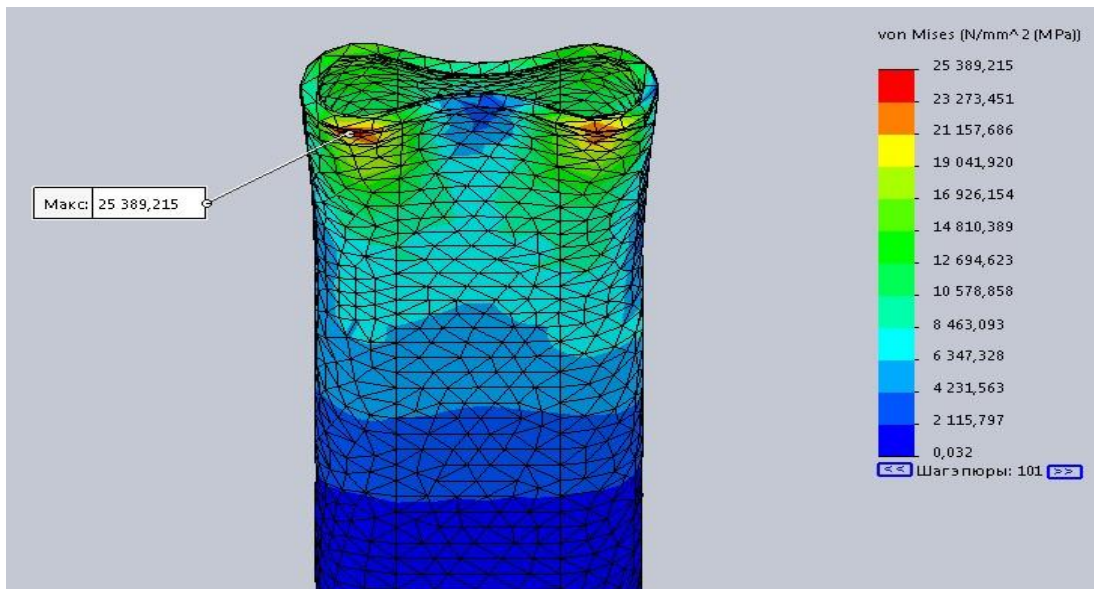


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд деталі у розрізі при товщині стінки  $h = 1.2$  мм

Проведемо аналогічні дослідження для заготовок труб зі стінкою 1,5 мм та 2 мм.

Результати досліджень представлені на рис. 2.12-2.15.

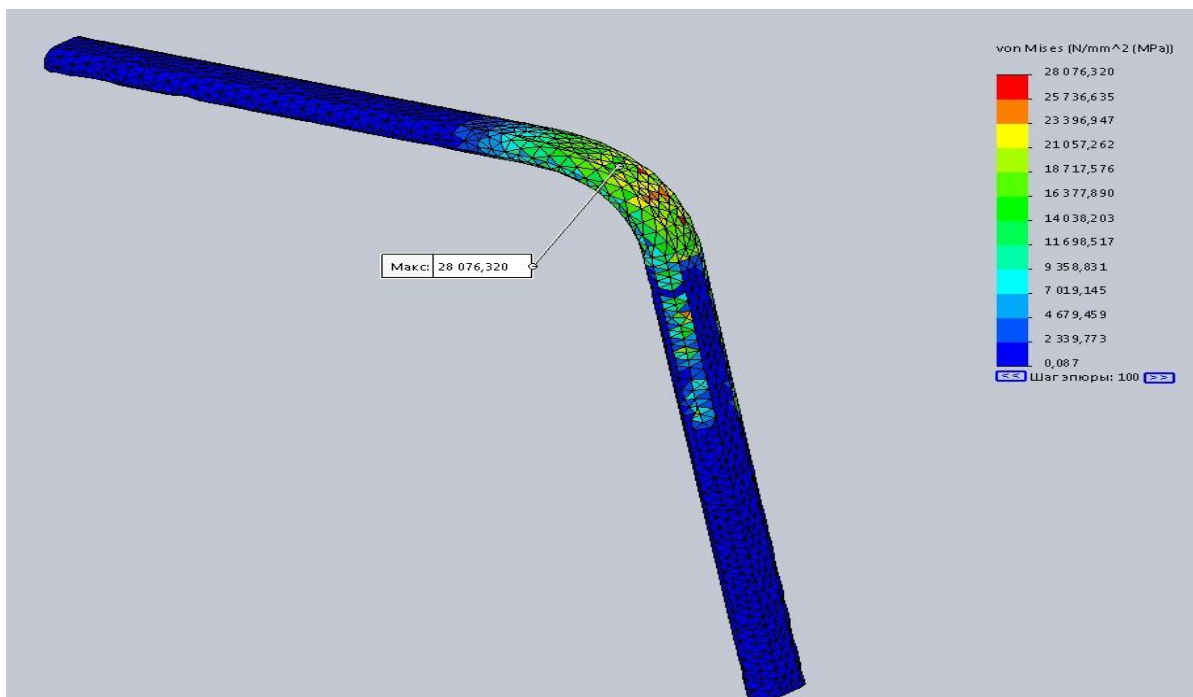


Рисунок 2.12 – Детальний вигляд зверху одержаної деформації деталі при товщині стінки  $h = 1,5$  мм

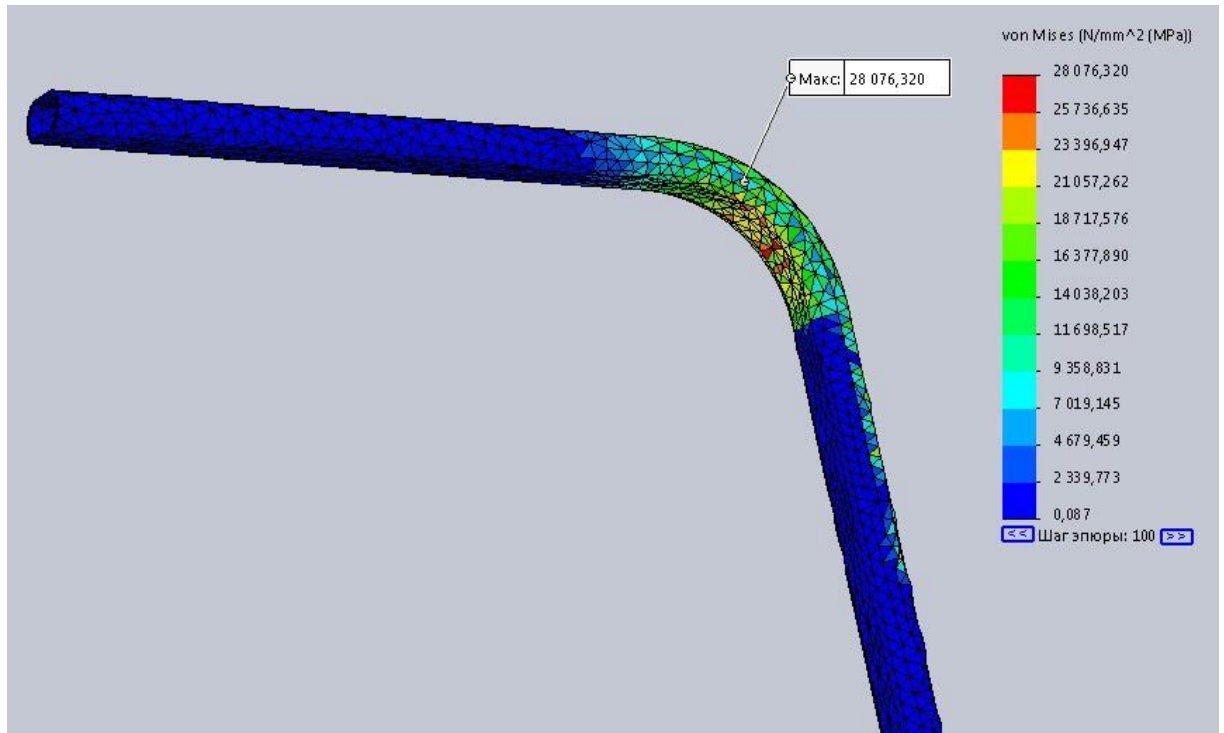


Рисунок 2.13 – Детальный вид снизу одержаної деформації деталі при товщині стінки  $h = 1,5$  мм

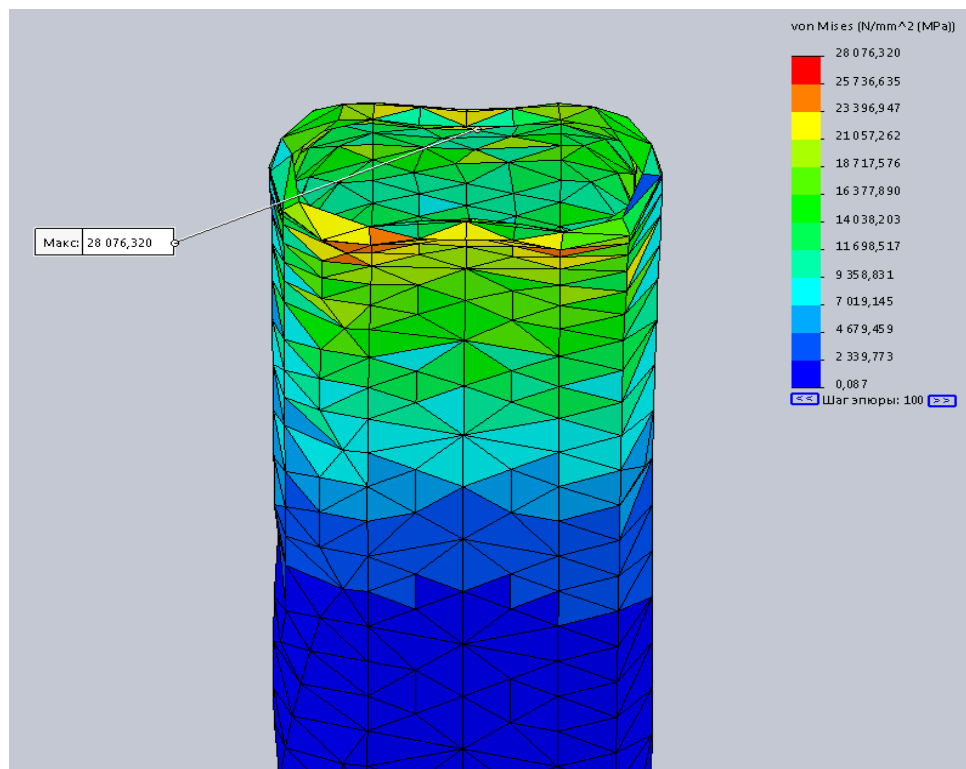


Рисунок 2.14 – Загальний вигляд деталі у розрізі при товщині стінки  $h = 1.5$  мм

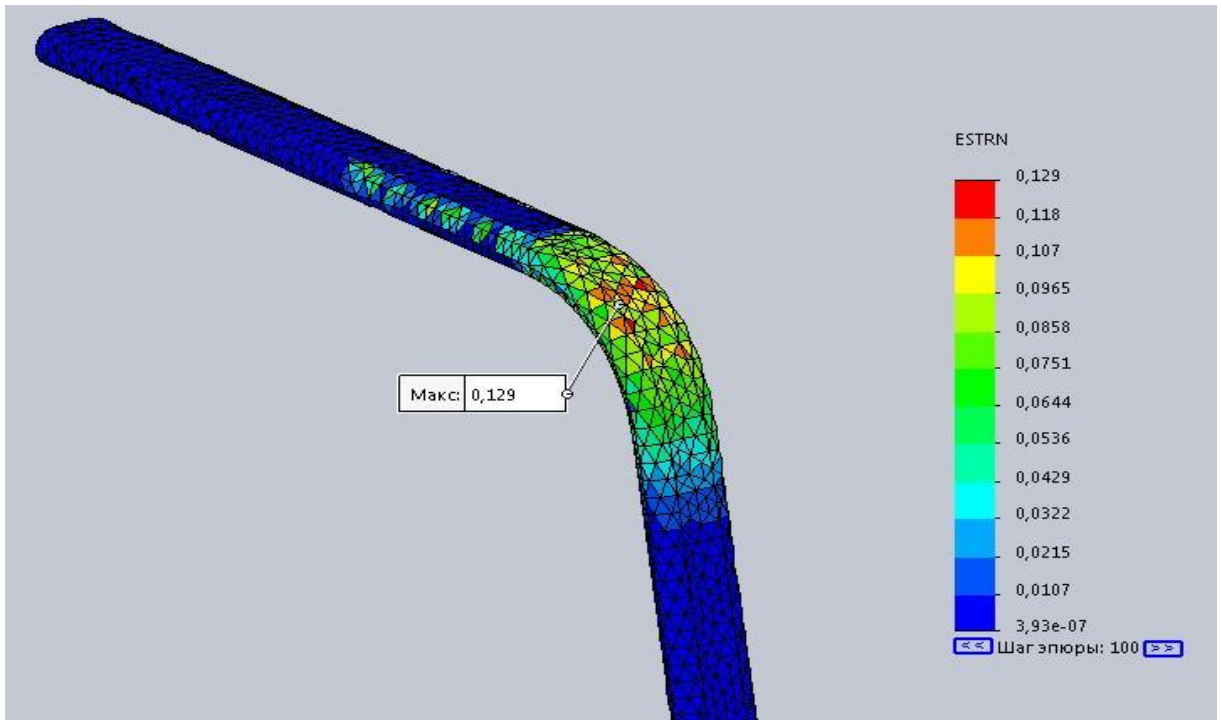


Рисунок 2.15 – Епюра деформації деталі при товщині стінки  $h = 1,5$  мм

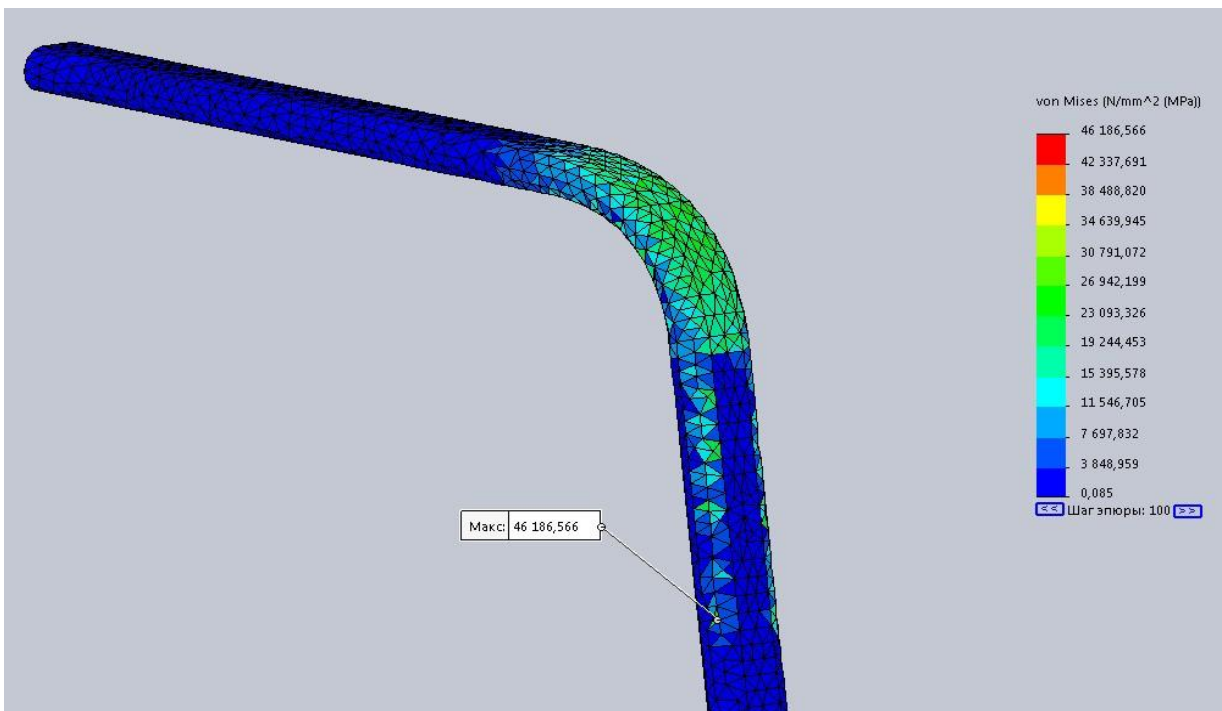


Рисунок 2.16 – Детальний вигляд зверху одержаної деформації деталі при товщині стінки  $h = 2$  мм



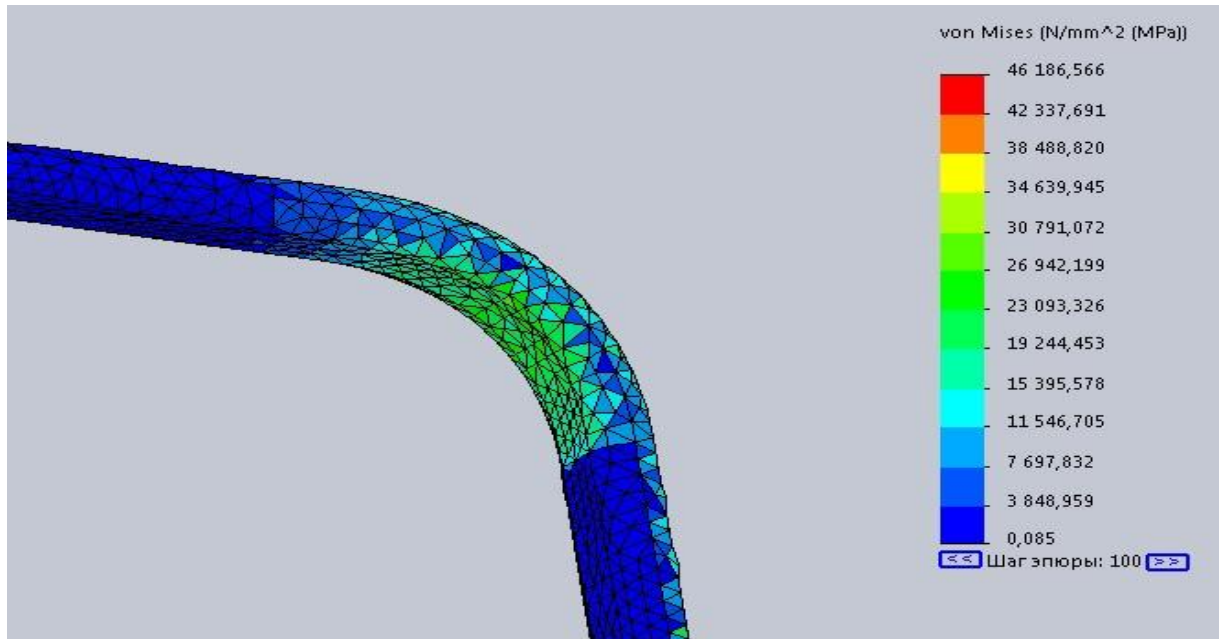


Рисунок 2.17 – Детальний вигляд знизу одержаної деформації деталі при товщині стінки  $h = 2$  мм

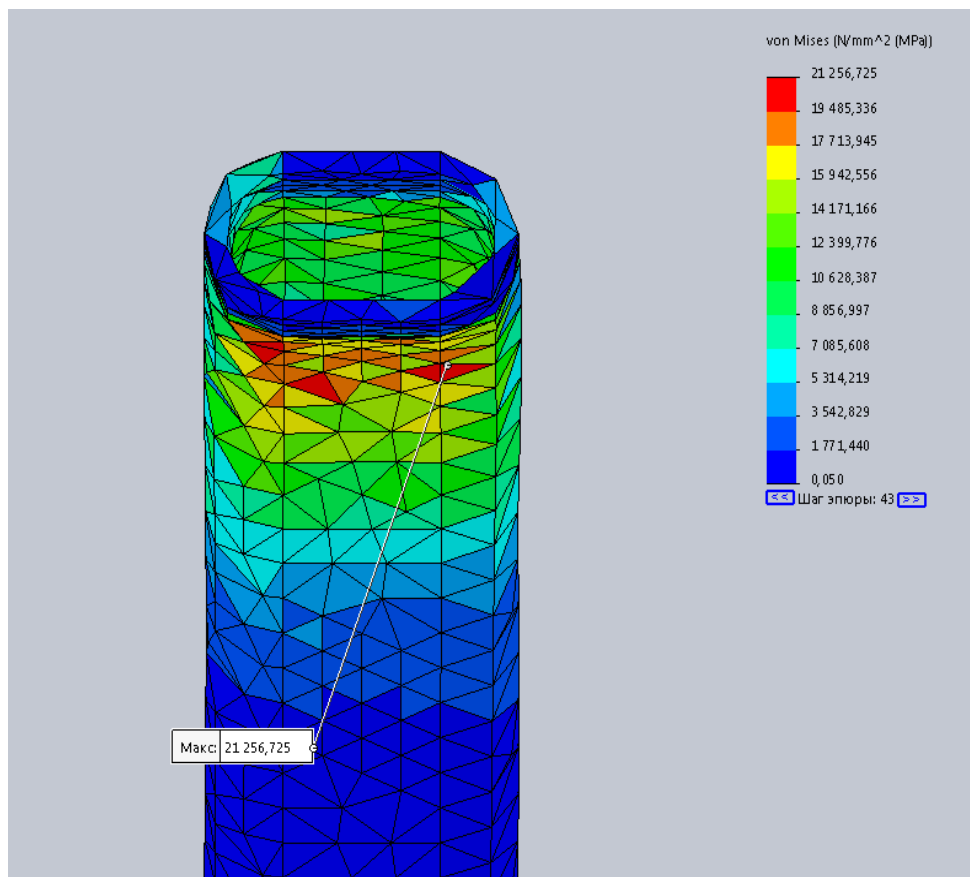


Рисунок 2.18 – Загальний вигляд деталі у розрізі при товщині стінки  $h = 2$  мм

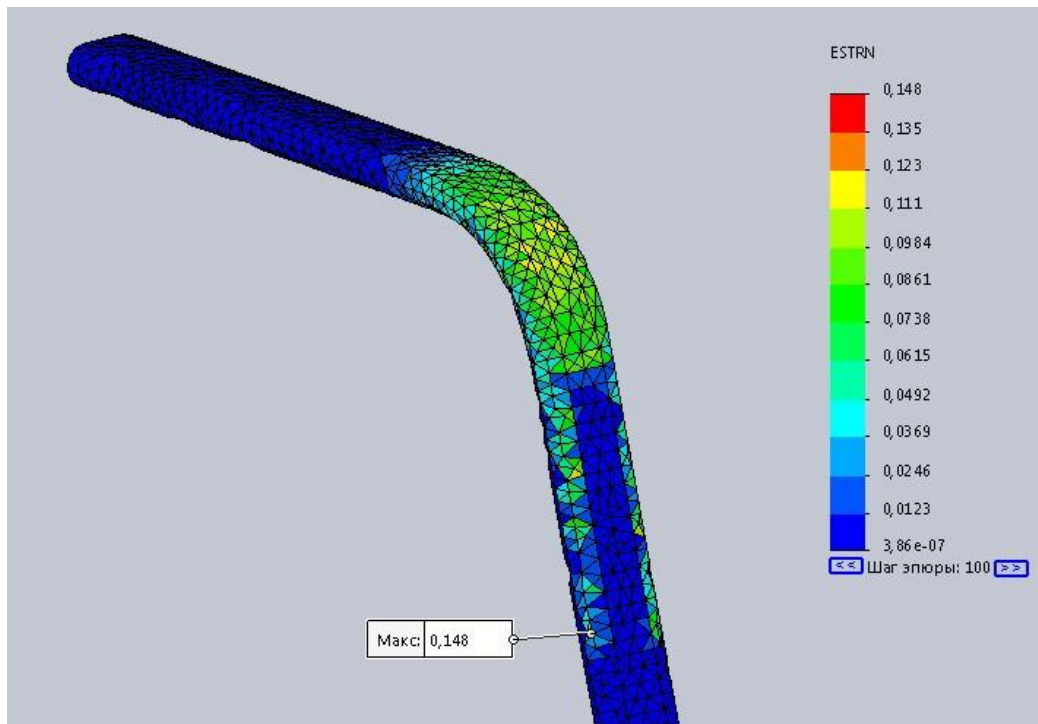


Рисунок 2.19 – Епюра деформації деталі при товщині стінки  $h = 2$  мм

Таким чином деформована деталь матиме геометричні параметри наведені на рис. 2.20.

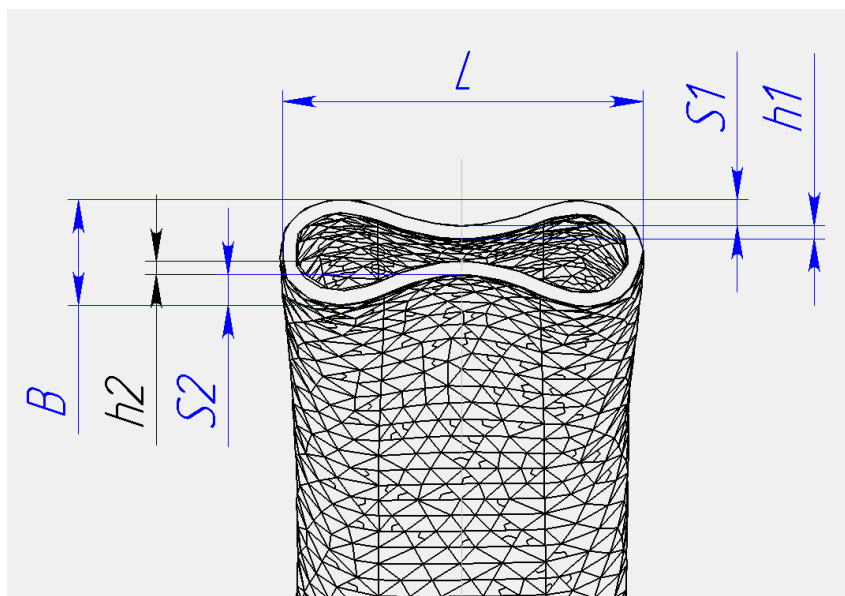


Рисунок 2.20 – Геометричні параметри деформованої деталі

Геометричні параметри деформованої деталі для різної товщини стінки наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Геометричні параметри деформованої деталі

Параметри заготовки	L, мм	B, мм	S1, мм	S2, мм	h1,мм	h2,мм
30x15x1,2	32,41	9,46	2,33	2,74	1,17	1,19
30x15x1,5	30,43	13,12	0,6	0,94	1,52	1,59
30x15x2	30,25	13,84	0,4	0,6	1,97	2,02

Таким чином при різних значеннях товщини стінки заготовки в ході гнуття спостерігається зміна габаритних параметрів гнутої деталі (ширини L, мм та висоти B, мм).

На внутрішній (S2, мм) та зовнішній (S1, мм) поверхнях стінок прослідковується впадини які для труби з товщиною стінки 1,2 мм та 1,5 мм має неприпустимі значення, виходячи з естетичної точки зору.

Натомість для товщини стінки 2 мм значення цих параметрів є допустимими, тобто при подальшій обробці деталі дефект деформації буде непомітним. Параметри товщини стінок готової деталі (h,мм) в зоні гнуття також змінюються за рахунок пластичної плинності металу [17].

Шляхом моделювання встановлено напружено-деформовані стани отриманих деталей.

Енергосилові характеристики деформованих деталей для різних товщин стінок наведені в табл. 2.3.



Таблиця 2.3 – Енергосилові характеристики деформованих деталей

Товщина стінки, мм	Напруга $\sigma$ МПа			Деформація
	мінімум ( $\sigma_{\min}$ )	максимум ( $\sigma_{\max}$ )	по осі X ( $\sigma_x$ )	
1,2	0,031	25389,2	12799,9	0,179
1,5	0,038	19903,02	14328,2	0,129
2	0,138	20656,3	20373,9	0,118

Показники інтенсивності деформацій, отриманих шляхом гнуття заготовок з різною товщиною стінки в зоні максимальної деформації дають змогу зробити висновок, що мінімальних показників параметр (0,118) досягає при гнутті металу з товщиною 2 мм [18].

Розподіл напруг (мінімальної, максимальної та вздовж осі X або вздовж заготовки) ілюструє, що величина непруги вздовж осі X становить  $\sigma_x = 12799,9$  МПа для товщини стінки 1,2 мм,  $\sigma_x = 14328,2$  МПа для товщини стінки 1,5 мм та  $\sigma_x = 20373,9$  МПа для товщини стінки 2 мм.

### 2.3 Висновки до розділу

Проведеним аналізом методом скінченних елементів в середовищі SOLIDWORKS Simulation розраховано способи формоутворення металевих виробів шляхом згинання для різної товщини стінки заготовки.

Проаналізовано зміни геометричних та енергосилових параметрів заготовок для вибору оптимальної товщини стінки заготовки виходячи з отриманих показників. Керуючись розрахунками встановлено, що оптимальним варіантом є товщина стінки заготовки 2 мм. Вона забезпечить естетичні властивості вихідного продукту.

Натомість з економічної точки зору, виходячи з середньої вартості труби 2 мм (орієнтовно 72 грн за метр погонний) при 42 грн за погонний

метр за трубу зі стінкою 1,2 мм існує необхідність перегляду способу гнуття та доопрацювання обладнання.

Таким чином пропонується застосувати дорнове згинання профільної труби, яке забезпечить високу точність формоутворення та повторюваність заготовки.

### 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ

3.1 Розрахунок параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів

За допомогою оправки дорна аналогічно методом скінченних елементів проведемо повторні дослідження процесу гнуття заготовок труб з товщиною стінки 1,2 мм для визначення параметрів видозміни геометричних форм та енергосилових характеристик деталі (рис. 3.1 та рис. 3.2).

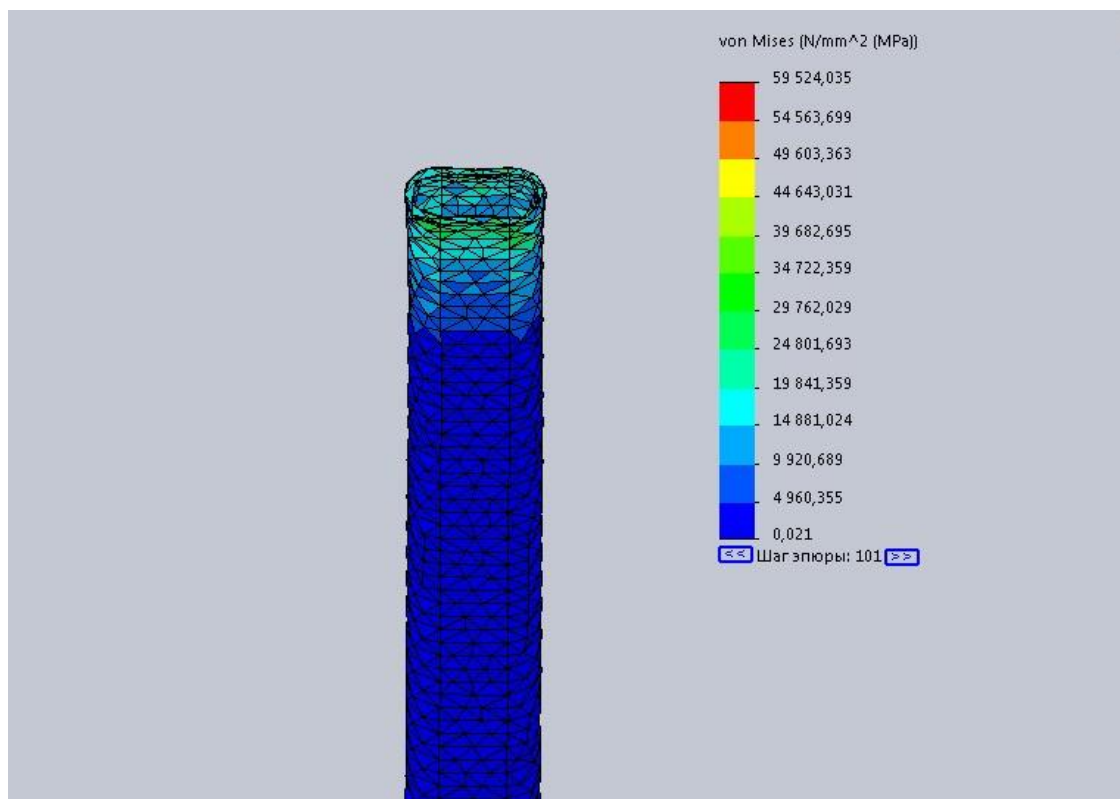


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд деталі у розрізі при товщині стінки  $=1.2$  мм з використанням оправки-дорна

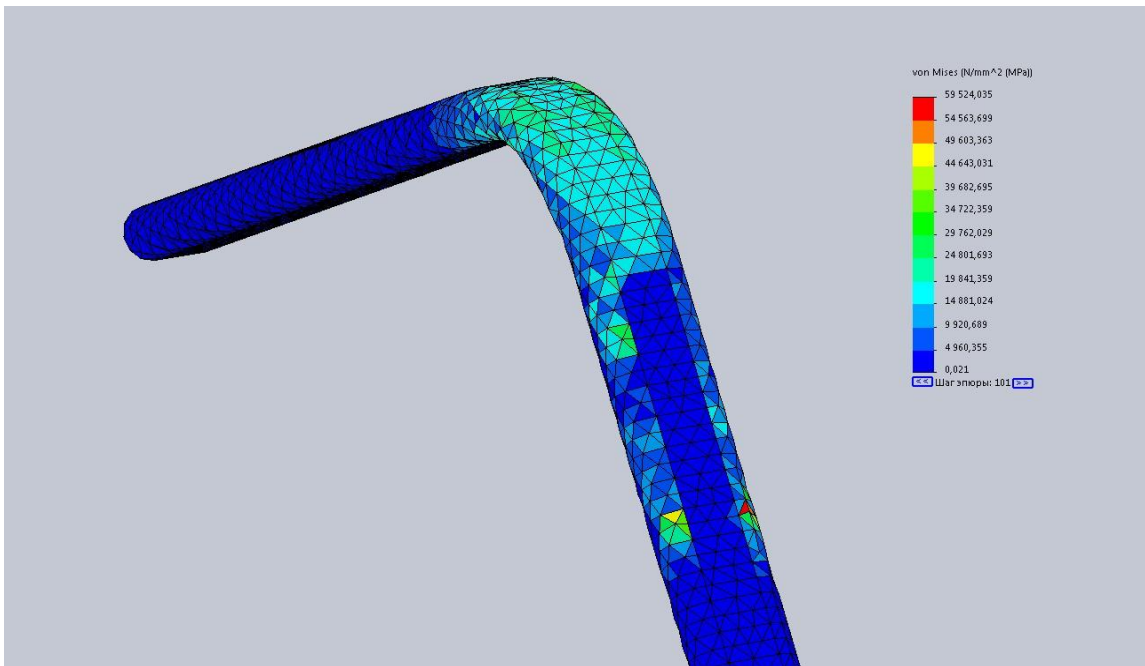


Рисунок 3.2 – Детальний вигляд одержаної деформації деталі при товщині стінки  $h = 1.2$  мм з використанням оправки-дорна

Шляхом моделювання встановлено напружено-деформовані стани отриманих деталей [18].

Енергосилові характеристики деформованої деталі з товщиною стінки 1,2 мм наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Енергосилові характеристики деформованої деталі

Товщина стінки, мм	Напруга $\sigma$ МПа			Деформація
	мінімум ( $\sigma_{\min}$ )	максимум ( $\sigma_{\max}$ )	по осі X ( $\sigma_x$ )	
1,2	0,0209	59524,0	21944,8	0,302

Показники інтенсивності деформацій, отриманих шляхом гнуття, в зоні максимальної деформації дають змогу зробити висновок, що даний параметр досягає значення 0,302 при гнутті металу з товщиною стінки 1,2 мм при цьому даний показник зміщується до точки прижиму [19].

Розподіл напруг (мінімальної, максимальної та вздовж осі X або вздовж

заготовки) ілюструє, що величина напруги вздовж осі X становить  $\sigma_x = 21944,8$  МПа для товщини стінки заготовки  $t = 1,2$  мм.

Тобто сама деталь вздовж лінії згину знаходиться в допустимих значеннях напруги та деформації.

Геометричні параметри деформованої деталі з використанням оправки – дорна наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Геометричні параметри деформованої деталі з використанням оправки – дорна наведені в табл.3.2.

Параметри заготовки	L, мм	B, мм	S1, мм	S2, мм	h1,мм	h2,мм
30x15x1,2	30,3	14,5	0,2	0,3	1,16	1,27

3.2 Питання забезпечення безпечних умов роботи обслуговуючого персоналу, який здійснює роботи з обслуговування, налагодження та ремонту верстату

Суб'єктом в роботі розглядається персонал, який здійснює роботи з обслуговування, налагодження та ремонту верстату [20].

Вимоги до безпеки праці при експлуатації обладнання визначаються керівництвом з експлуатації, правилами протипожежної безпеки та загальними вимогами щодо безпеки та виробничої санітарії. До верстата має бути забезпечений вільний доступ для проведення налагоджувальних робіт та механічного обслуговування. Джерелом небезпеки є електричний струм і частини верстата, що рухаються, гнучкі трубопроводи гідравлічної системи.

Персонал, допущений до обслуговування, налагодження, ремонту електроустаткування зобов'язаний [21]:

- мати допуск до обслуговування електроустановок напругою до 1000 В;

- знати чинні правила технічної експлуатації та безпеки обслуговування електроустановок промислових підприємств, які

відповідають вимогам ДСТУ 7237:2011 «Загальні вимоги та номенклатура видів захисту», ДСТУ ІЕС/TR 61010-3-031:2007 «Вимоги безпеки до електричного устаткування для вимірювання, керування та лабораторного застосування»;

- керуватися вказівками заходів безпеки керівництва з експлуатації та експлуатаційної документації на комплектуючі вироби, що входять до складу електроустаткування;

- знати роботу електричної схеми верстата;

- знати роботу гідросистеми верстата.

З метою забезпечення безпеки при роботі на верстаті, напруга живлення мережі на введенні до електричної шафи має бути від 0,9 до 1,1 номінального значення, а відхилення частоти від номінального значення – в межах  $\pm 1$  Гц.

Здійснюючи роботи пов'язані зі зняттям напруги в електроустаткуванні, необхідно керуватися наступними принципами [22]:

- обов'язкове відключення устаткування від електромережі та вжиття заходів, що унеможливають необачне або помилкове увімкнення комутаційної апаратури;

- оснащення приводів ручного та ключів дистанційного управління апаратурою плакатами застережного характеру;

- для забезпечення захисту працівників від ураження електричним струмом періодична перевірка на наявність напруги на струмовідних частинах, які треба заземлити;

- обов'язкове оснащення установок заземленням, розміщення застережних вказівних плакатів;

- облаштування робочого місця працівника або частин устаткування, що залишилися під напругою огороженнями та розміщення на огороженнях застережних вказівних плакатів.

Для забезпечення захисту від випадкового дотику до частин устаткування, що залишилися під напругою застосовуються такі види захисту [22]:

- основне – ізолювання струмовідних частин;
- додаткове – посилене ізолювання струмовідних частин;
- захисні огорожі ( можуть бути як тимчасові так і стаціонарні);
- захисні оболонки;
- ізолювання робочого місця працівника;
- безпечне розташування струмовідних частин;
- захисне вимкнення;
- малі напруги;
- попереджувальна звукова та світлова сигналізація
- електрозахисні засоби;
- блокування;
- встановлення застережних знаків безпеки;
- використання засобів індивідуального захисту.

Металеві неструмовідні частини також можуть бути під напругою внаслідок пошкодження ізоляції. З метою запобігання ураженню електричним струмом під час дотику до них застосовують окремо або в поєднанні такі види захисту [20]:

- заземлення;
- зрівнювання потенціалів;
- автоматичне вимкнення живлення;
- захисний електричний поділ кіл;
- використання систем наднизької напруги (безпечної, захисної);
- ізолювальні приміщення, зони, майданчики;
- вирівнювання потенціалів.

Такі види захисту можуть застосовуватись як окремо так і в поєднанні один з одним для забезпечення оптимального захисту [21].

Верстат та пристрої, які можуть опинитися під небезпечною напругою, повинні мати надійні заземлення.

Якість заземлення повинна бути перевірена зовнішнім оглядом та вимірюванням опору між металевими частинами верстата, кожного пристрою та затискачем заземлення, що знаходиться на введінні до верстата. Опір заземлення має перевищувати 0,1 Ом [20].

На пульті управління встановлена червона грибоподібна кнопка «Аварійний стоп» для екстреного відключення всіх виконавчих механізмів верстата [20].

Після закінчення роботи потрібно відключити верстат від енергоносіїв: пневмомережі, електромережі, відключити гідро станцію.

Заходи безпеки під час експлуатації гідро обладнання полягають в наступному [20].

При експлуатації та обслуговуванні станції гідравлічної необхідно дотримуватись заходів безпеки, передбачених при роботі на металорізальних деревообробних верстатах, автоматичних лініях та іншому технологічному обладнанні. Не допускається до роботи на гідро станції персонал, не ознайомлений з правилами техніки безпеки. При підключенні гідро станції до енергоджерела забезпечити заземлення відповідно до правил технічної експлуатації електроустановок. Не дозволяється пуск гідро станції без необхідної кількості олії в баку або при несправній контрольно-вимірювальній апаратурі. Експлуатація станції повинна проводитись за суворого дотримання правил пожежної безпеки. негайно припинити роботу при виявленні будь-яких відхилень від нормальної роботи. Перед розбиранням гідро станції необхідно відключити всі енергоджерела та вжити заходів проти їх випадкового включення [22].

Не допускається розбирання станції, а також гідроблоків, що знаходяться під тиском.

Не допускається розбирання маслопроводів, а також підтягувати кріпильні деталі та з'єднання гідросистеми, що знаходяться під тиском.



Не допускається зварювальні роботи на маслопроводах, що знаходяться під тиском [22].

Усі зміни до електроустановок, зроблені під час їх експлуатації, необхідно відображати у схемах і кресленнях та підтверджувати записами в оперативному журналі. Обов'язково зазначаються причин та дати внесення змін та прізвища особи, що внесла зміни [20].

Такі зміни до схем мають доводитися до відома всіх працівників, для кого є обов'язковим їх знання (з обов'язковим записом в оперативному журналі) [20].

Особа, відповідальна за електрогосподарство зобов'язана переглядати електричні (технологічні) схеми на їх відповідність фактичним експлуатаційним схемам один раз на три роки, режимні схеми – не рідше одного разу на рік з відміткою в них про перевірку [21].

### 3.3 Висновки до розділу

Виходячи з проведених досліджень робимо висновок, що при однакових значеннях товщини стінки заготовки (а саме 1,2 мм) в ході гнуття без використання оправки та з використанням такої спостерігаються різні габаритні параметри гнутої деталі. Водночас геометричні параметри гнутої деталі з використанням дорна превалюють [19].

Так, на внутрішній ( $S_2$ , мм) та зовнішній ( $S_1$ , мм) поверхнях стінок впадини майже непомітні та досягають значень  $S_1=0,2$  мм,  $S_2= 0,3$  мм.

Також при дорновому способі гнуття параметри товщини стінок готової деталі ( $h_1 = 1,16$  мм,  $h_2 = 1,27$  мм) в зоні гнуття за рахунок пластичної плинності металу мають допустимі значення для подальшої обробки.

Проведені експериментальні дослідження двох різних технологій процесу формоутворення виробів з малопластичних металів та апробація

результатів такого дослідження із застосуванням застосунку SOLIDWORKS Simulation дають можливість стверджувати, що застосування оправок при гнутті труб є ефективним та буде в подальшому використано у розробці автоматизованого механізму згинання з функцією подачі заготовки для існуючого виробництва.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було розглянуто процес розроблення автоматизованої системи процесу формоутворення металевих виробів. Були визначені мета, об'єкт і предмет дослідження, виконано ознайомлення з основними публікаціями, нормативними, довідковими матеріалами за темою роботи, проведено аналіз існуючих процесів формоутворення металевих виробів, виконана робота по розробці 3D-моделі трубозгинального верстату з автоматизованим механізмом подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей з можливістю використання як частини виробничої лінії з виготовлення окремого продукту, проведено аналіз технічного завдання.

Для досягнення поставленої у кваліфікаційній роботі мети були виконані такі завдання:

- проаналізовано методику розрахунку геометричних параметрів готового виробу;
- розраховано енергосилові витрати в процесі згинання сталевих труб з використанням оправки та без неї.

У результаті проведених розрахунків зроблено висновки при однакових значеннях товщини стінки заготовки (а саме 1,2 мм) в ході гнуття без використання оправки та з використанням такої спостерігаються різні габаритні параметри гнутої деталі. Водночас геометричні параметри гнутої деталі з використанням дорна превалюють.

Так, на внутрішній ( $S_2$ , мм) та зовнішній ( $S_1$ , мм) поверхнях стінок впадини майже непомітні та досягають значень  $S_1=0,2$  мм,  $S_2=0,3$  мм.

Також при дорновому способі гнуття параметри товщини стінок готової деталі ( $h_1=1,16$  мм,  $h_2=1,27$  мм) в зоні гнуття за рахунок пластичної плинності металу мають допустимі значення для подальшої обробки.

Проведені експериментальні дослідження двох різних технологій процесу формоутворення виробів з малопластичних металів та апробація результатів такого дослідження із застосуванням за стосунку SOLIDWORKS Simulation дають можливість стверджувати, що застосування оправок при гнутті труб є ефективним та буде в подальшому використано у розробці трубозгинального верстату з автоматизованим механізмом подачі заготовки та автоматичного вивантаження готових деталей з можливістю використання як частини виробничої лінії з виготовлення окремого продукту для існуючого виробництва.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 65 с.

2. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу : [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoiradi-universitetu.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoiradi-universitetu.pdf).

3. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП “УкрНДНЦ”. 2016. 30 с.

4. Кононенко В. А. Аналіз параметрів, що впливають на процеси формоутворення виробів з малопластичних металів методом комп'ютерного моделювання // матеріали V Міжнародної наукової конференції «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття»: Ужгород, 19 травня, 2023р. 2023. С. 109-110.

5. Кононенко В. А. Дослідження питання удосконалення процесу формоутворення виробів з малопластичних металів // матеріали 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 2. Харків: ХНУРЕ. 2023. 9-10 с.

6. Основи слюсарної справи: Навч. посібник / Сушко О.В. та ін.; за ред. Сушко О.В. Мелітополь: ТПЦ «Forward press», 2020. 152 с.: іл.

7. Miller G. Tube Forming Processes : монографія. Dearbon, Michigan : SME, 2003. 377 p. URL: <https://fliphtml5.com/zroi/owip> (date of access: 01.10.2023).

8. Гунько І. В. Оцінка граничних можливостей процесу та деформівності матеріалів при формуванні заготовок вальцюванням / І. В. Гунько // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 47(953). – С. 23–28.

9. Аналітичний огляд технологічних способів гнуття труб та пропозиції щодо їх удосконалення / О. І. Горбенко та ін. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2014. № 1. С. 122–125.

10. Inserted And Cable Mandrel Assemblies For Rotary-Draw Tube Bending: [Електрон. ресурс].– Режим доступу: <https://bendtooling.com/mandrels/>

11. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник / Кривий Ріг: КК НАУ. 2017. 444 с.

12. Овчаренко В.А., Подлесний С.В., Зінченко С.М. О 35 Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2008. 380 с.

13. Basic, H.; Demirdzic, I.; Muzaferija, S. (2020). Calculation of the plastic metal flow in the cold extrusion technology by finite volume method, Technical Journal, Vol. 14, No. 4, 493-498, doi:10.31803/tg-20200811175336

14. Іванченко Г., Максим'юк Ю., Козак , А, & Мартинюк І. . (2021). Побудова розв'язувальних рівнянь напіваналітичного методу скінчених елементів для призматичних тіл складної форми. Управління розвитком складних систем, (46), 55–62. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.55-62>

15. Максим'юк Ю. В. Розв'язувальні співвідношення моментної схеми скінчених елементів в задачах термов'язкопружнопластичного деформування / Ю. В. Максим'юк, А. А. Козак, О. В. Максим'юк // Будівельні конструкції. Теорія і практика : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; гол. ред. О.

Д. Журавський. - Київ : КНУБА, 2019. - С. 10-20.

16. Коробко Б.О. Прогресивні технології у машинобудуванні: навч. посіб. для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти / Б.О. Коробко, Є.А. Фролов, С.В. Попов, С.Г. Ясько. – Полтава : Нац. ун-т імені Юрія Кондратюка, 2020. – 168 с.

17. Пилипець, М. І., Васильків, В. В., Радик, Д. Л., Пилипець, О. М. (2021). Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. Перспективні технології та прилади, (18), 112-123.

18. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Demska, N. (2021). Вирішення питання модернізації виробничого обладнання з використанням кібер-фізичних виробничих системи керування. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, (3 (17)), 106-116.

19. Холодне гнуття сталевих прямокутних труб в трубогині з проточкою спеціального профілю на фасонному валку / В. Л. Калюжний, Я. С. Олександренко, І. П. Куліков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ«ХП», 2016. № 31(1203). С. 36–41. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2519-2671.

20. ДСТУ 7237:2011 «Загальні вимоги та номенклатура видів захисту»

21. ДСТУ ІЕС/TR 61010-3-031:2007 «Вимоги безпеки до електричного устаткування для вимірювання, керування та лабораторного застосування».

22. Технічна документація при експлуатації електроустановок [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://oppb.com.ua/articles/tehnichna-dokumentaciya-pry-ekspluataciyi-elektroustanovok>

23. Режим доступу: <http://solidworks.com.ua>

24. Ресурс з питань авторського права та промислової власності / Журнал «Інтелектуальна власність»: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.intelvlas.com.ua>

25. Офіційний веб-портал державної служби інтелектуальної власності України: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sdip.gov.ua>
26. Державне підприємство «Український інститут промислової власності»: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrpatent.org>
27. Державне підприємство «Українське агентство з авторських та суміжних прав»: [Електрон. ресурс]. –Режим доступу: <http://www.uacr.kiev.ua>
28. Офіційний веб-портал науково-дослідного інституту інтелектуальної власності: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ndiiv.org.ua>
29. Спеціалізована база даних «Винаходи (корисні моделі) в Україні»: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://base.uipv.org/searchINV/>
30. Optimizing tube bender tooling to improve results [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipefabrication/optimizing-tube-bender-tooling-for-optimized-to-improve-results>