

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**«Вдосконалення технології листового штампування лонжерона  
легкового автомобіля»**

Рівень вищої освіти перший бакалаврський

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 132 Матеріалознавство

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 26 22148.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу група МТВА-22-1



Підпис

Олександр Чорний

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Олег БАБАК

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис


Олег МАКОВКІН

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026

Дата



Підпис

Олександр ДИХА

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»


Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський

Освітньо-професійна програма – «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ

 проф., д.т.н. Диха О.В.  
15.04 2026 року

## **З А В Д А Н Н Я** НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Чорному Олександрю Івановичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Вдосконалення технології листового штампуння лонжерона легкового автомобіля»

керівник роботи Бабак Олег Петрович к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 8 січня 2026р. № 7(Д14)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла дослідження; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз конструкції лонжеронів легкових автомобілів та тенденцій розвитку їх виробництва; 2 Розробка конструкції та технології виготовлення лонжеронів у САПР; 3 Аналіз напруженого деформованого стану заготовки при n- подібному згинанні; 4 Моделювання в САПР технології згинання лонжеронів та аналіз точності їх виготовлення.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15.04.26

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строки виконання	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	20.05.2026	
2	<i>Технологічний розділ</i>	25.05. 2026	
3	<i>Конструкторський розділ</i>	30.05. 2026	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	2.06. 2026	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	5.06. 2026	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	9.06. 2026	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	10.06. 2026	

Студент

Керівник роботи

  
Підпис

  
Підпис

Олександр ЧОРНИЙ  
Ім'я, прізвище

Олег БАБАК  
Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційну роботу виконано студентом гр. МТВА 22-1 Чорним Олександром Івановичем на тему: «Вдосконалення технології листового штампування лонжерона легкового автомобіля».

Актуальність дослідження: Дедалі більше листових деталей автомобілів, у тому числі лонжерони, виготовляються з сталей, що важко деформуються. Використання листових матеріалів з більш високими характеристиками міцності викликає низку технологічних проблем, включаючи збільшення енергосилових показників процесу, менший ресурс пластичності матеріалу, збільшення пружного пружинення та зниження точності виробів. Розробка нових методів моделювання процесів штампування лонжеронів, які є більш точними та високої якості, є необхідною для зниження виробничих витрат і виготовлення виробів із важкодеформованих матеріалів. Удосконалення етапів розробки технології та створення оснащення, яке базується на методах моделювання технологічних процесів виготовлення лонжеронів із важкодеформованих матеріалів за допомогою САПР, є важливими питаннями.

Метою роботи є розробка методу проектування процесу холодного листового штампування лонжеронів з мінімальним значенням пружинення, використовуючи модель процесу штампування п-подібного згинання в САПР.

Завдання роботи:

1. Аналіз технології та моделювання процесів пластичної деформації лонжеронів п-подібною формою.
2. Розробка в САПР електронної моделі лонжерону.
3. Розробка методики чисельного аналізу напруженодеформованого стану при п-подібному згинанні.
4. Розробка методики проектування процесів п-подібної згинання лонжеронів на основі спланованого експерименту.

Наукова новизна Розробка нового підходу до проектування технологічних процесів п-подібного згинання, щоб створити лонжерони, які не мають геометричних дефектів.

Об'єкт дослідження: Методика деформованого стану при п-подібному аналізу згину напружено та метод проектування процесу холодного листового штампування лонжеронів на основі спланованого експерименту

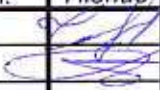



Предмет дослідження: Виробництво лонжеронів високої якості без геометричних дефектів з матеріалів, що важко деформуються.

Кваліфікаційна робота містить 94 сторінок машинописного тексту з рисунками та таблицями, а також список використовуваних джерел із 14 найменувань, вступ, чотирьох розділів та висновок.

Ключові слова: ШТАМПУВАННЯ ЛОНЖЕРОНІВ, ВИРОБНИЦТВО ЛОНЖЕРОНІВ, АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ, ТЕХНОЛОГІЯ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Аналіз конструкції лонжеронів легкових автомобілів та тенденцій розвитку їх виробництва.....	8
1.1 Огляд конструкційних особливостей лонжеронів легкових автомобілів.....	8
1.2 Механічні властивості матеріалів лонжеронів сучасних легкових автомобілів.....	12
1.3 Пружне деформування та методи підвищення точності виготовлення лонжеронів легкових автомобілів.....	16
1.4 Тенденції розвитку виробництва виготовлення лонжеронів легкового автомобіля.....	19
2 Розробка конструкції та технології виготовлення лонжеронів у САПР.....	28
2.1 Моделювання лонжеронів легкових автомобілів у САПР.....	28
2.2 Розробка технології виготовлення лонжеронів.....	39
2.3 Методи підвищення точності виготовлення лонжеронів.....	41
2.3.1 Конструктивні засоби забезпечення жорсткості лонжеронів.....	41
2.3.2 Технологічні методи забезпечення зниження пружинення...	42
3 Аналіз напруженого деформованого стану заготовки при п- подібному згинанні.....	45
3.1 Особливості аналізу процесу згинання.....	45
3.2 Методи чисельного аналізу напружено-деформованого стану..	48
3.3 Аналіз напруженого стану .....	51
3.4 Аналіз деформованого стану .....	59

					КвРМТВА 26. 22148. 000 ПЗ			
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Вдосконалення технології листового штампування лонжерона легкового автомобіля	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.	Чорний						4	94
Перевір.	Бабак							
Реценз.								
Н. Контр.	Маковкін							
Затверд.	Диха					ХНУ група МТВА 22-1		

4 Моделювання в САПР технології згинання лонжеронів та аналіз точності їх виготовлення.....	63
4.1 Моделювання штампування та аналіз точності лонжерону при вільному згинанні.....	63
4.2 Моделювання штампування та аналіз точності лонжерону при згинанні з виштовхувачем.....	77
4.3 Моделювання процесу згинання та аналіз точності штампування методом планованого експерименту.....	80
4.3.1 Побудова матриці запланованого експерименту .....	80
4.3.2 Побудова матриці запланованого експерименту для “поліпшеної схеми”.....	88
Висновок.....	91
Список використаних джерел.....	92
Додатки.....	94

## Вступ

Листове штампування є важливою частиною автомобільної промисловості. Лицьові частини автомобіля, деталі кузова або рами, а також комплектуючі частини виготовляють шляхом пластичної деформації металу. Інженери-конструктори та інженери-технологи повинні працювати у суворих рамках стандартів, щоб зробити легкові автомобілі більш конкурентоспроможними та модернізувати їх. Сучасні стандарти та прогрес у автомобілебудуванні вимагають швидкого та високоякісного впровадження нових технологій і конструкцій.

Сучасні автомобільні лонжерони з листового металу мають складну форму поверхні. Конструктори використовують елементи жорсткості під час проектування, а технологи використовують процеси штампування із заданим напружено-деформованим станом, що підвищує точність і надійність лонжеронів, щоб зменшити дефекти при подальшому виготовленні.

Виробництво лонжеронів, які мають високу точність і певні технічні характеристики, вимагає широкого розуміння впливу різноманітних конструктивних і технологічних параметрів. Натурні випробування та чисельне моделювання використовуються для створення цієї бази знань. Метод кінцевих елементів дозволяє комп'ютерним симуляціям вивчати наслідки зміни будь-якого параметра процесу та конструкції лонжеронів. Чисельне моделювання збільшує якість продукту та час на технічну підготовку.

**Актуальність дослідження:** Дедалі більше листових деталей автомобілів, у тому числі лонжерони, виготовляються з сталей, що важко деформуються. Використання листових матеріалів з більш високими характеристиками міцності викликає низку технологічних проблем, включаючи збільшення енергосилових показників процесу, менший ресурс пластичності матеріалу, збільшення пружного

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

пружинення та зниження точності виробів. Розробка нових методів моделювання процесів штампування лонжеронів, які є більш точними та високої якості, є необхідною для зниження виробничих витрат і виготовлення виробів із важкодеформованих матеріалів. Удосконалення етапів розробки технології та створення оснащення, яке базується на методах моделювання технологічних процесів виготовлення лонжеронів із важкодеформованих матеріалів за допомогою САПР, є важливими питаннями.

**Метою роботи** є розробка методу проектування процесу холодного листового штампування лонжеронів з мінімальним значенням пружинення, використовуючи модель процесу штампування п-подібного згинання в САПР.

**Завдання роботи:**

1. Аналіз технології та моделювання процесів пластичної деформації лонжеронів п-подібною формою.
2. Розробка в САПР електронної моделі лонжерону.
3. Розробка методики чисельного аналізу напруженодеформованого стану при п-подібному згинанні.
4. Розробка методики проектування процесів п-подібної згинання лонжеронів на основі спланованого експерименту.

**Наукова новизна** Розробка нового підходу до проектування технологічних процесів п-подібного згинання, щоб створити лонжерони, які не мають геометричних дефектів.

**Об'єкт дослідження:** Методика деформованого стану при п-подібному аналізу згину напружено та метод проектування процесу холодного листового штампування лонжеронів на основі спланованого експерименту

**Предмет дослідження:** Виробництво лонжеронів високої якості без геометричних дефектів з матеріалів, що важко деформуються.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1 Аналіз конструкції лонжеронів легкових автомобілів та тенденцій розвитку їх виробництва

## 1.1 Огляд конструкційних особливостей лонжеронів легкових автомобілів

Лонжерон автомобіля — це міцний конструктивний елемент, який використовується для створення несучої конструкції кузова легкового автомобіля. Він необхідний для кріплення навісних елементів, силового агрегату та інших деталей кузова. Для забезпечення безпеки пасажирів у разі лобового зіткнення автомобіля Лонжерон повинен витримати значні навантаження, що передаються на кузов через колеса автомобіля під час руху. На рисунку 1.1 показано лонжерони кузова легкового автомобіля.



Рисунок 1.1 – Кузов легкового автомобіля

Мета створення таких елементів полягає в тому, щоб забезпечити достатню міцність і жорсткість при мінімальній вазі. Конструкція лонжерона повинна мати

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

низку характеристик, щоб задовольнити ці вимоги:

1. Геометрію та різні розміри профілів перерізів, для забезпечення міцності та жорсткості.
2. Технологічні отвори, а також отвори для вентиляції та монтажу агрегатів та вузлів виконуються у місцях, де менше навантаження.
3. Ребра жорсткості, для підвищення міцності та жорсткості конструкції та виконання функцій "демпфера" при лобових зіткненнях.
4. Фланці для кріплення лонжерона в кузов, при складанні кузова та навісних деталей. Легкові автомобілі можуть мати різні конструкції та виконувати різні завдання.

Лонжерони роздільної конструкції встановлені в різних місцях кузова. Вони встановлені в передній частині, щоб посилити конструкцію моторного відсіку, а в середній частині, щоб посилити днище салону.

Зміцнення заднього кузова ззаду. Як показано на рисунку 1.2, лонжерони автомобіля «шкода» мають просту конструкцію з мінімальними посиленнями та отворами овальної форми, щоб зняти лонжерони в аварії. Зовні метал має товщину три міліметри, а моторний щит має дві міліметри товщини.



Рисунок 1.2 – Лонжерони автомобіля «Шкода»

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Хоча існує велика кількість різновидів кузова, не всі зазначені вище лонжерони використовуються. Найчастіше в несучій конструкції відсутні передні та задні лонжерони, але вони завжди є на передній частині кузова. Це можна пояснити кількома причинами:

- Установка силового агрегату виконується здебільшого автомобілів у передній частині кузова
- Забезпечення належної безпеки пасажирів автомобіля (рисунок 1.3)
- Технологічність складання несучого кузова автомобіля та навісних вузлів та агрегатів.



Рисунок 1.3 – Каркас безпеки

Крім того, можна спроектувати кузов, що несе, з цілісним лонжероном, розташованим від переднього бампера до заднього бампера. Надійність цієї конструкції збільшується завдяки тому, що вона дуже схожа за конструктивними особливостями на рамну конструкцію (рисунок 1.4), і вона також є складною у виготовленні.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



Рисунок 1.4 – Рама

Завжди, незалежно від виду лонжеронів, вони парні і розташовані паралельно, а іноді під невеликим кутом.

У цій роботі ми розглянемо лонжерони, які встановлюються в підкапотному просторі передньої частини сучасного легкового автомобіля (рис. 1.5). Це тому, що цей елемент несучої конструкції відіграє значну роль.

Основні конструктивні характеристики лонжерону включають товщину заготовки, висоту вертикальних полиць, ширину фланця та розміри нижньої полиці.

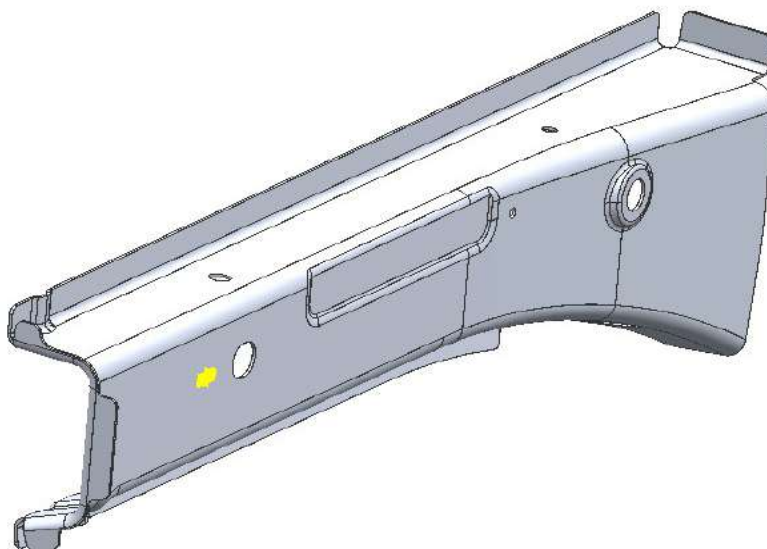


Рисунок 1.5 – Лонжерон сучасного автомобіля

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

## 1.2 Механічні властивості матеріалів лонжеронів сучасних легкових автомобілів

Автомобілі легкого типу повинні бути міцними, легкими та економічними. В автомобільній промисловості споживачі та можливості виробництва визначають темпи розвитку. Розробка нових конструкцій автомобілів часто суперечить цим трьом вимогам (малюнок 1.6). Проблеми та протиріччя, що виникають, найчастіше сприяють розвитку та покращенню конструкції автомобіля.



Рисунок 1.6 – Блок-схема проблем, що виникають при розробці концепції автомобіля

Точний прогноз і контроль пружинення дозволяють конструкторам оснащення оцінити ймовірність отримання бажаної форми виробу та внести необхідні модифікації лише на основі цих даних. Надійна чисельна процедура може значно скоротити час виконання та виробничі витрати,

оскільки не потрібно проводити експериментальні проби.

Основними тенденціями розвитку автомобілів є дизайн, технологія, безпека пасажирів, міцність, вага та витрати. Іноді фактори змінюють місця.

Вибір матеріалів для деталей автомобіля багато в чому залежить від задоволення цих вимог. Сьогодні в будівництві автомобілів використовуються різні матеріали, включаючи метали, пластики, композити, скло та інші. Однак автомобілі масового використання в основному складаються з металевих деталей, які складаються з різних сталей.

Межа міцності (-в) і гранична величина деформації розтягування до руйнування (-р) є двома критеріями, за якими класифікують сталі, які використовуються в автомобілебудуванні (рис. 1.7).

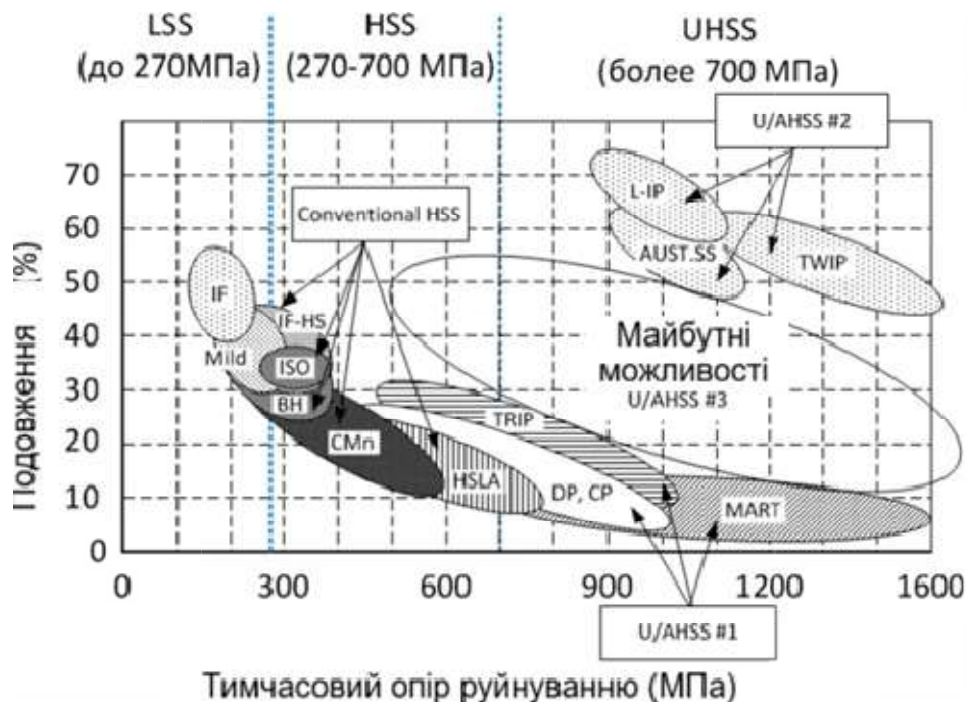


Рисунок 1.7 - Діаграма, що ілюструє діапазон властивостей сучасних сталевих матеріалів в автомобілебудуванні

Вони зазвичай поділяються на три групи:

- Сталі зі зниженою міцністю (LSS) До них відносяться

високопластичні IF (без ізоляції), низьковуглецеві сталі марок 01,08, м'які м'які сталі та сталі високої міцності (HSS-High Strength Steel), такі як сталь з термічним зміцненням при охолодженні (BH-сталь), низьколегована сталь (HSLA-High Strength Low Alloy), сталь C-Mn, двофазні сталі (DP) і сталі ультрависокої міцності AHSS (Advanced High Strength Steel) Сталі, які мають пластичну деформацію через механізм двійникування, включають такі типи сталей, як DP, TRIP (Transformation Induced Plasticity), CP (Complex Phase), мартенситні (MS) та ферито-бейнітні (FB) сталі, а також TWIP (Twinning-Induced Plasticity).

Матеріали, які використовуються, також поділені на функціональні групи через широкий спектр вимог, які повинні задовольняти конструкції вузлів і деталей автомобіля (рис. 1.8):

1. Групи сталі AHSS мають високу межу міцності при низькій межі пластичної деформації. Такі сталі використовуються для штампування підсилювача бампера, поперечки даху та середніх стійок.

2. Сталі групи HSS мають високу межу міцності при високій пластичності. Передні стійки, лонжерони, брызговики середньої підлоги та панель багажника штамнуються з цієї сталі.

3. Сталі групи LSS застосовуються для штампування лицьових деталей автомобіля, а також деяких деталей кузова, що несе (двері, капот, крила тощо).

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

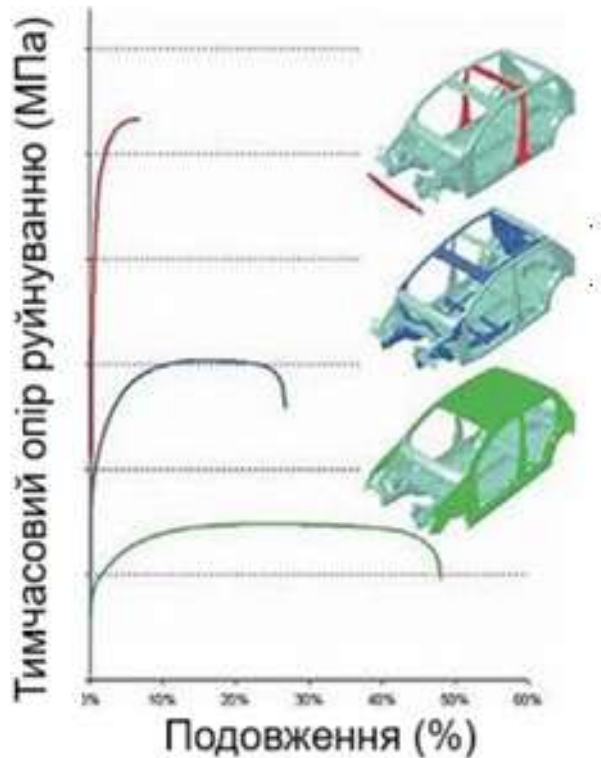


Рисунок 1.8 показує напругу (в МПа) в залежності від подовження (у відсотках) для різних типів сталі та їх використання в конструкції кузова.

Лонжерон легкового автомобіля може бути виготовлений з сталей HSS і належить до другої групи.

Друга група має широкий вибір сталей HSS, оскільки в ній міститься велика кількість кузовних деталей, які складають приблизно 50% всіх кузовних деталей. Виробники керуються такими факторами при виборі сталі:

- Локалізацією автовиробника
- Класом випуску
- Призначенням виробу
- Екологічними нормами
- Вартість сталі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

15

### 1.3 Пружне деформування та методи підвищення точності виготовлення лонжеронів легкових автомобілів

Дефекти, що виникають під час виробництва та складання кузова, визначаються конструкцією лонжерону, матеріалом, з якого він виготовлений, і технологією виробництва.

Основний метод виготовлення лонжеронів для легкових автомобілів — це штампування з листового металу. Гибкість є основною умовою формування лонжерону. Виготовлені з листових матеріалів, які важко деформуються, лонжерони можуть мати дефекти при згинанні. Складкоутворення та хвилястість, пережим, наступний перелом, подряпини та шорстка поверхня є типовими дефектами листового штампування. Ці недоліки посилюють спотворення форми, яке виникло в результаті деформації пластику. Після зняття навантаження деформація високоміцних сталей HSLA викликає значну залишкову напругу. Це впливає на кінцеву форму виробу. Форми інструменту, параметрів процесу, геометрії та матеріалу заготовки впливають на точність виготовлення кінцевого виробу. Щоб запобігти виготовленню неякісного продукту, важливо враховувати всі ці елементи під час виробництва. Коли деформація завершена, форма виготовленої деталі повинна відповідати розмірам і формі інструменту.

Пружне деформування матеріалу через рахунок залишкових напруг, що виникають при знятті зовнішніх навантажень, називається пружинкою. Складний фізичний процес і стан пружини в основному визначається геометрією деталі, її фізико-механічними властивостями та напругою та деформацією, що виникають перед розвантаженням штампу. У листовому штампуванні існує чотири види пружинення: згинальне, мембранне,

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

кручення та комбіноване, залежно від геометрії спотворення виробу після розвантаження. При плоскій деформації матеріал згинається, що викликає згинальні пружинення. Мембранне пружинення відбувається, коли матеріал розвантажується від плоского стискання чи розтягування. При деформації виробів, таких як панелі та лонжерони, які мають значну різницю у формі та розмірах перерізу, можна спостерігати пружини кручення. пружина, яка виникає внаслідок нерівномірних пластичних деформацій у різних напрямках.

Найпоширенішим типом пружинення в промисловому середовищі є комбіноване та згинальне. Матеріал зазвичай згинається поза площиною, а також одночасно розтягується або стискається в площині через складну геометрію виробу (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Спотворення геометрії виробу, викликані пружиненням

Після розвантаження залишкові пружні напруги змінюють форму матеріалу. Рисунок 1.10 показує результат спотворення форми після пружинення, а геометрія автомобільної деталі представлена у двох перерізах. Вимірювання були зроблені за допомогою оптичного сканера. Однією з причин проблем збирання є те, що пружинення викликає значні відхилення геометрії деталі від проекту дизайнерів. У зв'язку зі зростаючою тенденцією використання листів з алюмінієвих сплавів і високоміцних сталей у сучасних

конструкціях автомобілів пружинення є серйозною проблемою. тому що матеріали з цих матеріалів мають більші геометричні спотворення при розвантаженні через свої механічні властивості.

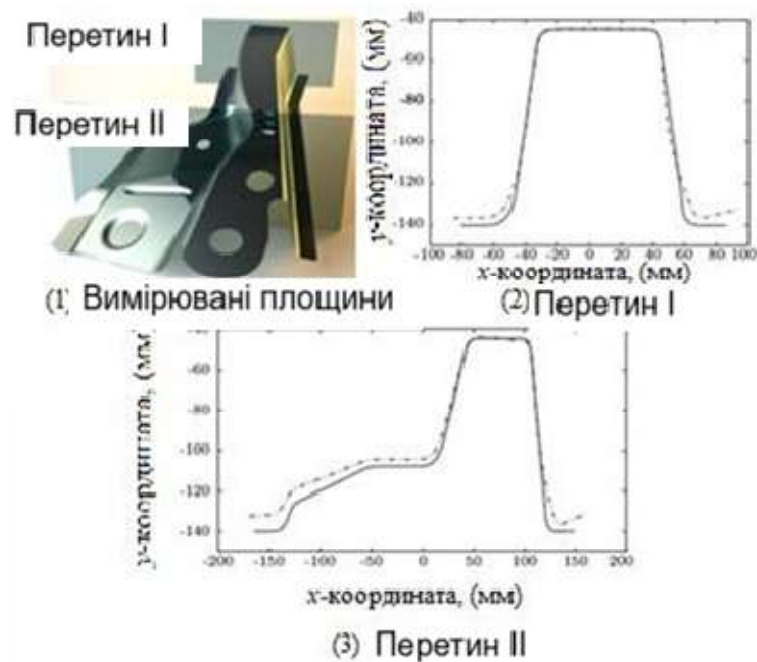


Рисунок 1.10 – Прояв феномена пружинення у двох перерізах

Управління пружиненням у виробництві лонжеронів базується на технічному контролі та визначенні спотворення геометрії деталі. Завдяки використанню калібрів або вимірювання пружинення матриці можна виміряти спотворення форми. Хоча ці технології дають надійну інформацію про компенсацію пружинення, вони можуть бути дорогими та займати багато часу, особливо коли складні компоненти виготовляються з алюмінію або високоміцних сталей.

Таким чином, для розробки технології штампування лонжеронів використовуються комп'ютерні моделі на етапі проектування процесу штампування та оснащення, щоб контролювати пружини.

Зниження пружинення може бути вирішено за допомогою двох різних підходів:

- керування під час процесу штампування (забезпечуючи ідеальне притискання, деформацію протягом різних стадій процесу штампування тощо);
- керування за допомогою компенсації пружинення (змінюючи форму виробу, інструмент або хід деформування). У процесі розробки технології штампування ці заходи компенсації призначаються.

#### 1.4 Тенденції розвитку виробництва виготовлення лонжеронів легкового автомобіля

У процесі проектування та виготовлення лонжеронів точність і якість виготовлення «закладаються».

Повний цикл сучасного виробництва легкових автомобілів складається з кількох етапів, як показано на рисунку 1.11.

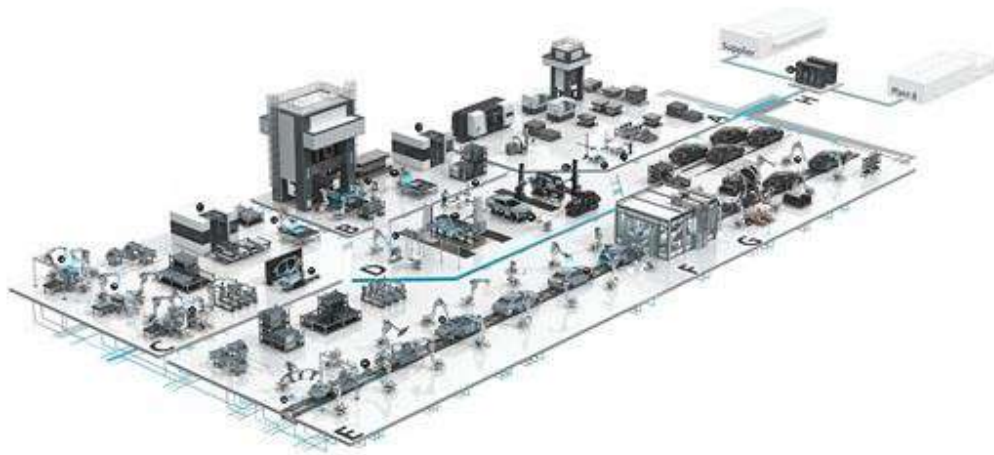


Рисунок 1.11 – Повний цикл виробництва легкового автомобіля

Розглянемо основні етапи виробництва автомобіля, починаючи з моменту отримання готових компонентів, до завершення збирання автомобіля та його виходу з конвеєра.

Принцип Демінга «наступний процес – ваш споживач» [1] лежить в основі всього виробничого ланцюжка виготовлення автомобілів. Відповідно до цього принципу (рисунок 1.12), контроль (1 та 2) необхідний після кожного етапу виробничого процесу.



Рисунок 1.12 – Контроль виробництва легкового автомобіля

Цехи пресового виробництва виготовляють вироби з листового металу, включаючи лонжерони, на заготівельному етапі (рис. 1.13). На цьому етапі також перевіряється штампована продукція, щоб запобігти подальшим проблемам зі складанням (1 і 2).

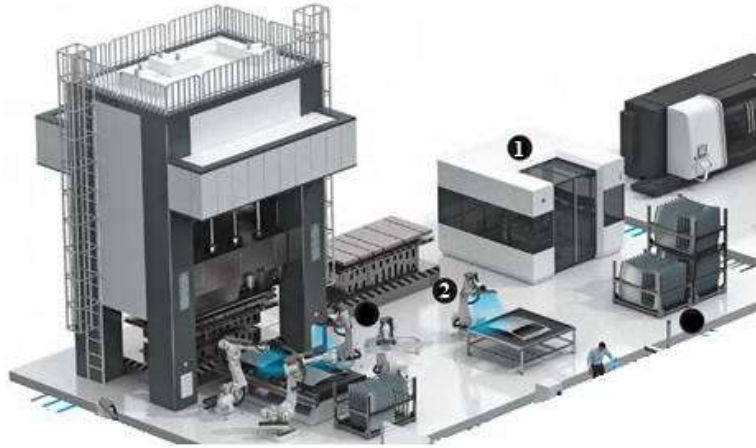


Рисунок 1.13 – Пресове виробництво

В результаті широкого застосування повної чи часткової автоматизації процесів листового штампування в останні роки продуктивність праці зросла. Процеси, які деформують лонжерони за допомогою пластичної деформації металу, включають тепер такі процеси, як глибока витяжка, формування, гаряче штампування та багато інших, окрім раніше відомих операцій листового штампування лонжеронів за допомогою згинання (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Технологія виготовлення лонжеронів згинанням.

Історично лонжерони автомобільних автомобілів виготовлялися за допомогою холодного листового штампування в штампах, як показано на рисунку 1.15. Згодом було запропоновано використовувати гаряче штампування листового матеріалу.



Рисунок 1.15 Механічний прес та штампове оснащення

Обидва варіанти зараз використовуються. Коли потужність обладнання недостатня для деформації металу в холодному стані або коли необхідно деформувати деталь з металу з низькою пластичністю під час обробки, технологію гарячої штампування використовують.

Операція зварювання кузова є важливим етапом процесу збирання автомобіля, як показано на рисунку 1.16.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

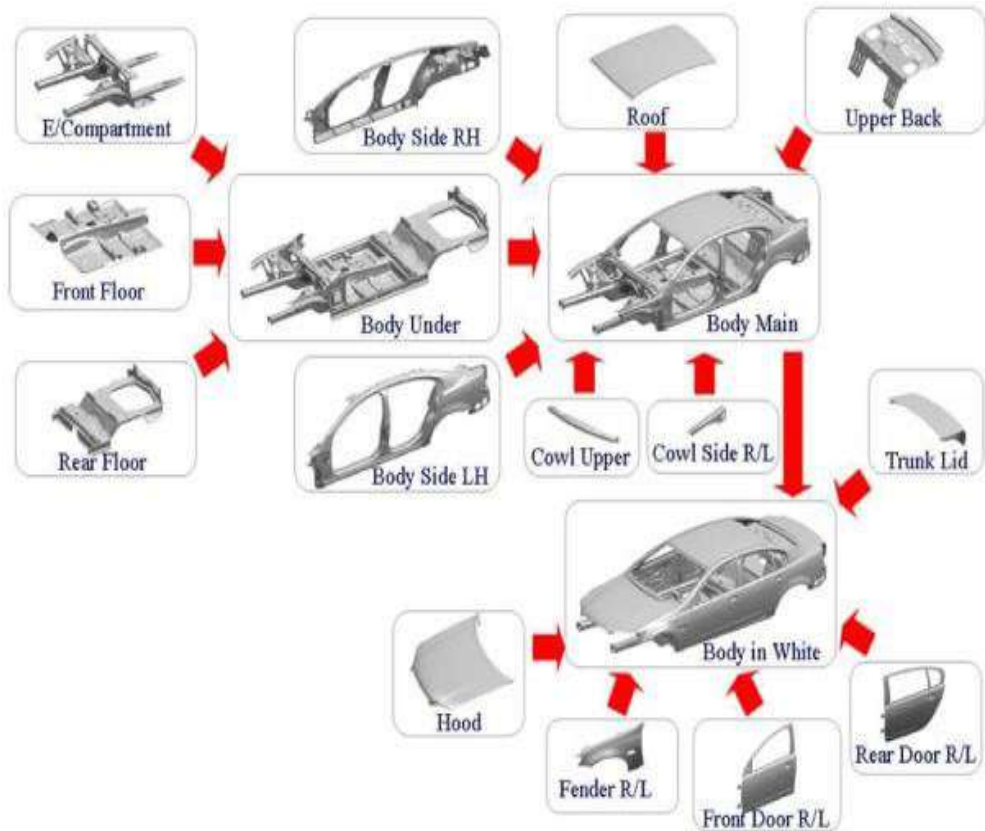


Рисунок 1.16 – Складання кузова легкового автомобіля

При зварному складанні кузова деталі встановлюються в кондукторі та зварюються між собою, як показано на рис. 1.17.



Рисунок 1.17 – Зварювання елементів кузова у кондукторі

Окремі частини кузова зварюються в проміжні великі вузли, такі як середня підлога, задня підлога та передній модуль (1), на рисунку 1.18. На цьому етапі також проводиться зварювання в кондукторах, де деталі встановлюються у відповідні пази, отвори тощо. Крім того, оскільки це початковий етап складання кузова, важливо перевірити виготовлені вузли (2,3,4,5,6), щоб уникнути проблем, таких як зазор капота або неможливість встановити фару у відповідний паз.

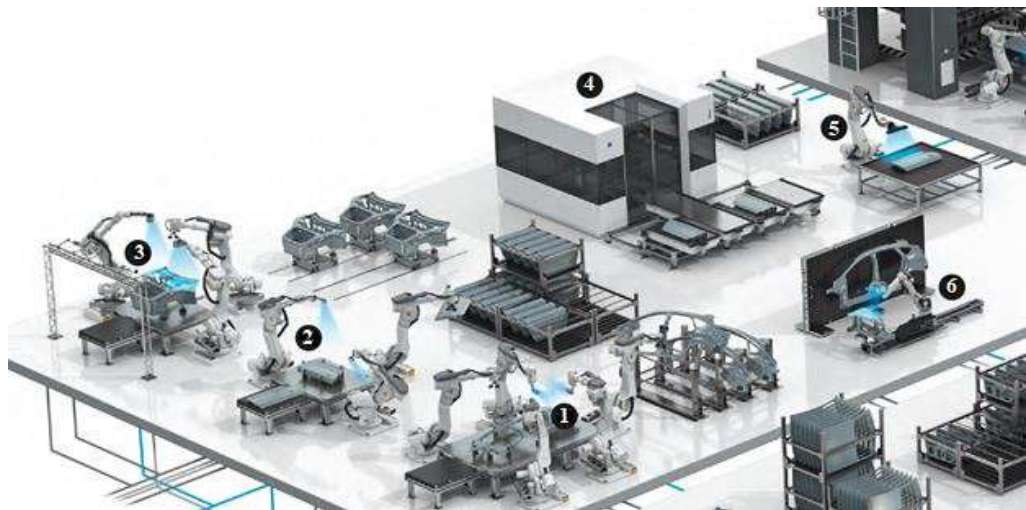


Рисунок 1.18 – Зварювальний цех

Контрольно-вимірювальні машини (КВМ) часто використовують для складного процесу контролю кузова легкових автомобілів. Кожна деталь кузова має вирішальне значення. Таким чином, геометрія кузова перевіряється після кожного етапу збирання, оскільки від цього залежить якість автомобіля.

На рисунку показано елемент загального кондуктора (18).

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

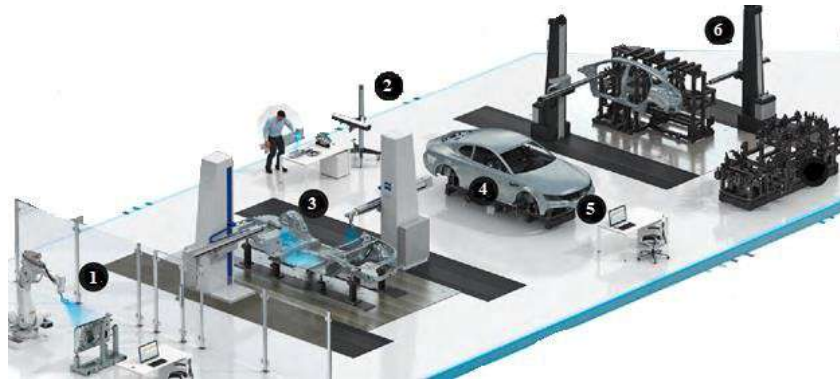


Рисунок 1.19 – Вимірювальна лабораторія



Рисунок 1.20 Контроль геометрії велико-вузлового елемента кузова

На рисунку 1.21 представлений етап створення кузова автомобіля, до цього етапу всі елементи кузова пройшли вже чимало перевірок, але, незважаючи на це, після збирання-зварювання кузова автомобіля існує етап контролю кузова на конвеєрі (Check in-line) (4).

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

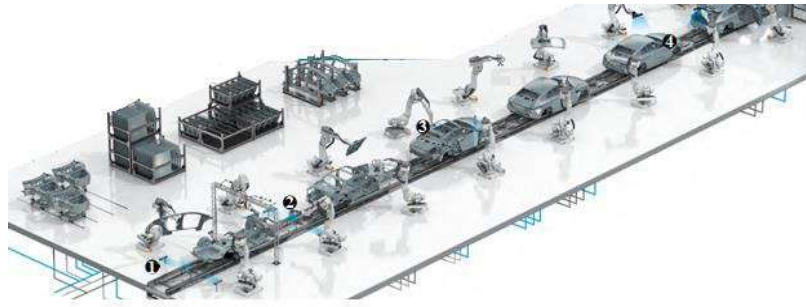


Рисунок 1.21 – Конвеєр складально-кузовного виробництва

Сертифікація геометрії кузова відбувається після його складання та перевірки на четвертому етапі. Після цього кузови відправляються в фарбувальні цехи, де на них наносять захисні покриття, фарби та лак. На останньому етапі складання автомобіля є так зване «весілля», а також складання всіх інших комплектуючих на першому етапі. На другому етапі автомобіль складається в завершальному вигляді. Рисунок 1.22 показує всі ці етапи.



Рисунок 1.22 – Остаточне складання легкового автомобіля

#### Висновки:

1. Дослідження літератури дозволило визначити конструкції, фізико-

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

механічні характеристики та технології виробництва лонжеронів легкових автомобілів, які визначають їх зовнішній вигляд, якість, економічність і безпеку пасажирів.

2. Точність виготовлення лонжеронів визначається процесом пружинення після розвантаження.

3. У КРБ необхідно вирішити такі завдання, щоб зробити виготовлення лонжеронів легкових автомобілів більш якісними, економічними та безпечними для пасажирів:

- провести аналіз літератури та патентних джерел щодо процесів, що впливають на точність виготовлення лонжеронів легкових автомобілів;
- створити модель лонжерону за допомогою САД та САЕ, щоб поставити завдання чисельного моделювання процесу пружинення лонжеронів;
- розробити метод запланованого чисельного експерименту, щоб оцінити вплив технологічних і конструктивних параметрів лонжерону на точність його штампування.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 Розробка конструкції та технології виготовлення лонжеронів у САПР

### 2.1 Моделювання лонжеронів легкових автомобілів у САПР

При проектуванні лонжерону в першу чергу потрібно враховувати його «довкілля». Простір, який оточує деталь або вузол під час збирання та експлуатації, називається оточенням. Це займе майже весь підкапотний простір у випадку з лонжероном. Насамперед ми повинні розглянути зовнішні розміри лонжерона, які залежать від інших більш важливих компонентів кузова. Передня частина кузова автомобіля Шкода Октавія показана на рисунку 2.1. Як показано на малюнку, кронштейн опори двигуна, поперечка щита, брызковик і сам моторний щит оточують лонжерон. Для того, щоб уникнути самоперетинів деталей під час складання лонжерону, під час проектування цих деталей у САПР використовуватимуться поверхні, які описуватимуть зовнішні габарити цих деталей.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>28</i>

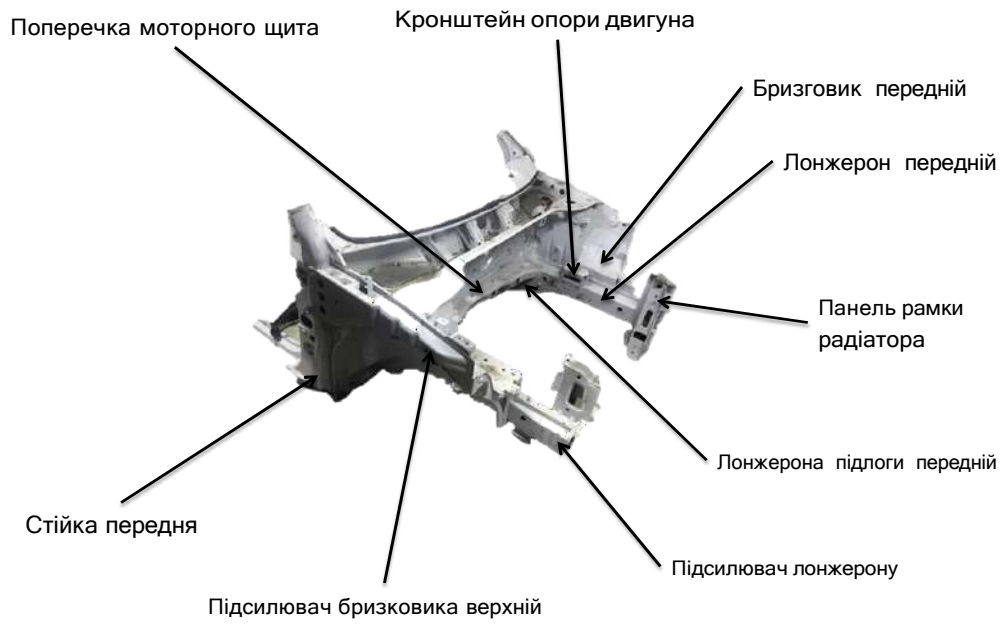


Рисунок 2.1 – Передня частина кузова автомобіля Шкода Октавія.

При складанні та експлуатації Лонжерон взаємодіє з багатьма вузлами та елементами, що призводить до його складної просторової геометрії. Згідно з рис. 2.1, майже 90% деталей кузова автомобіля є парними та дзеркально відбитими щодо середньої поздовжньої площини. Незважаючи на те, що вони розташовані праворуч і лівою стороною автомобіля, вони виконують те саме завдання та можуть мати деякі відмінності в конструкції:

- Підштампування, щоб запобігти стиканню з суміжними елементами або деталями праворуч або ліворуч
- Отвори для приєднання різних датчиків кріпильних елементів, а також інших.
- Вирізки, щоб не перетинатися з іншими деталями

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

..

У Чехії основним виробником автомобілів вважається Шкода груп. У цьому проекті будуть використані такі конструктивні характеристики, які були розроблені на заводі:

- Положення керма на лівій стороні
- Фіксування силового агрегату на лонжерони транспортного засобу
- Ліва сторона акумулятора
- Під капотом з лівого боку розташовані блоки запобіжників і реле.Прокладка кабелю з лівого боку
- Деякі автомобілі мають модуль антиблокувальної системи. Він знаходиться на лівому лонжероні автомобілів Шкода.

Лівий лонжерон був обраний для його раніше визначених функцій. Кордони були створені для проектування, як показано на рисунку 2.2. Площини, що обмежують, які визначають зовнішні габарити, показані на малюнку 2.2. Крім того, щоб уникнути самоперетинання з іншими деталями та вузлами, ці площини показують отвори для приєднання навісного обладнання та орієнтування деталі в штампі під час виготовлення та складання.



Рисунок 2.2 - "Оточення" лонжерона в плоскому вигляді.

					КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

На рисунку 2.3 зображено електронну модель «оточення» лонжерону.

Представлені всі площини, щодо яких буде працювати Лонжерон. На цьому етапі вже можна уявити геометрію та розміри лонжерону. Крім того, щоб зрозуміти, з якими кузовними деталями він буде з'єднаний під час збирання кузова, необхідно продумати місця кріплення кузова, а також навісні вузли та агрегати.

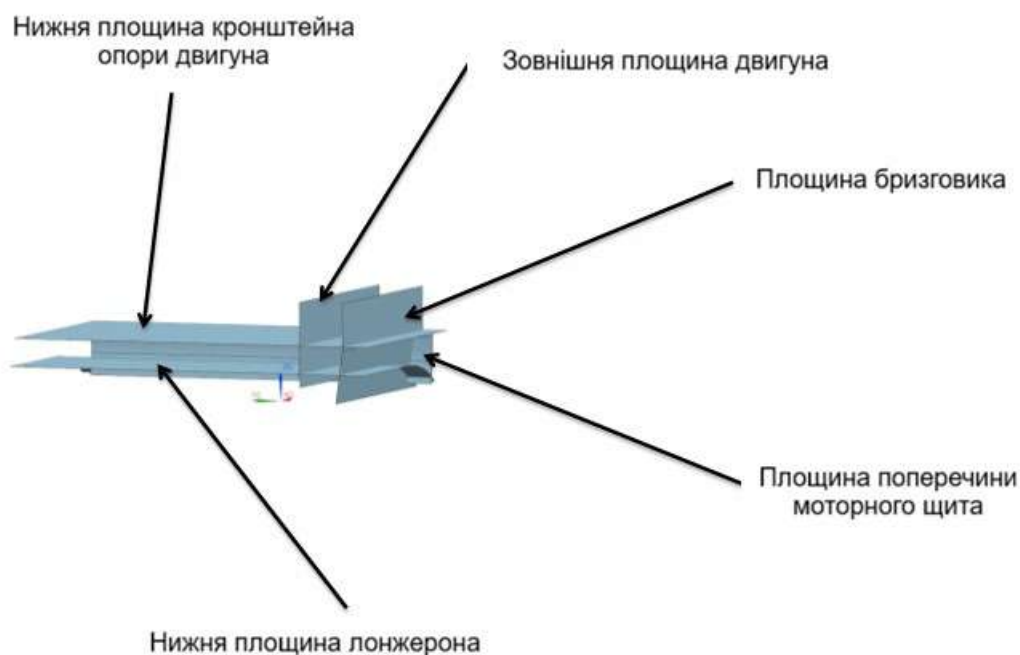


Рисунок 2.3 - Оточення в 3D.

Як показано на рисунку 2.4, лонжерон автомобіля має фланець по всьому контуру на одному з кінців, який з'єднується з підсилювачем бампера або панеллю рамки радіатора. Оскільки в цьому з'єднанні знаходяться поздовжні та поперечні захисні елементи каркасу безпеки, лонжерони та передній підсилювач, дуже важливо отримати відповідність реальної

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

геометрії з електронною моделлю.

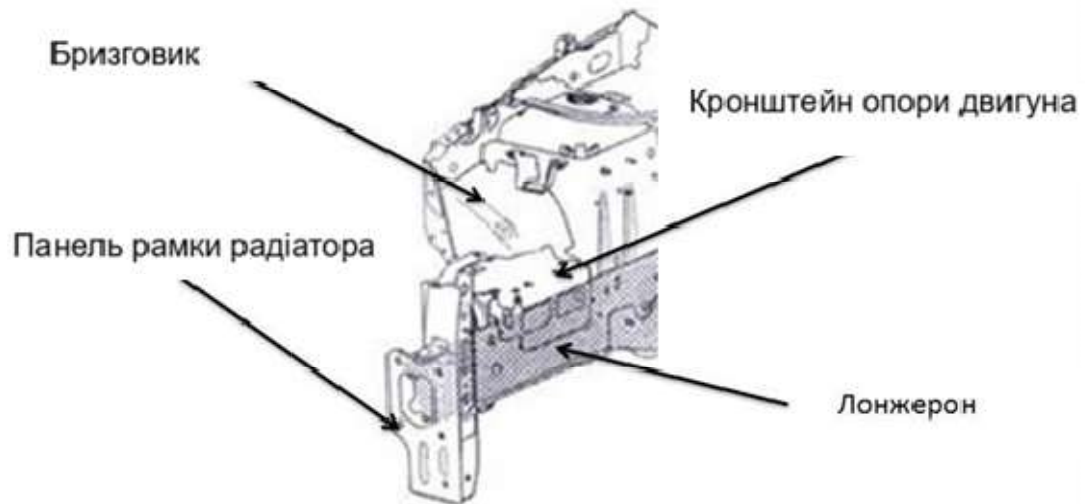


Рисунок 2.4 – Приєднання лонжерону до панелі рамки радіатора.

Всі площини, що обмежують геометрію лонжерону, показані на рисунку 2.5. Після отримання повного оточення можна приступити до безпосереднього проектування лонжерону в САПР.



Рисунок 2.5 – Площина контакту панелі рамки радіатора та лонжерон

Моделювання лонжерону буде виконано за допомогою САД-системи Siemens NX 9.0. Хоча лонжерони виготовляються з листового металу, Siemens NX може використовувати програму «Листовий метал NX», але найчастіше лонжерони проектуються за допомогою додатків «Моделювання» та «Поверхня». Там лонжерон повертає свою першу форму. Після цього можна використовувати функцію «Перетворити на листовий метал», зображену на рис. 2.6, щоб перетворити будь-яке тіло на листовий метал.

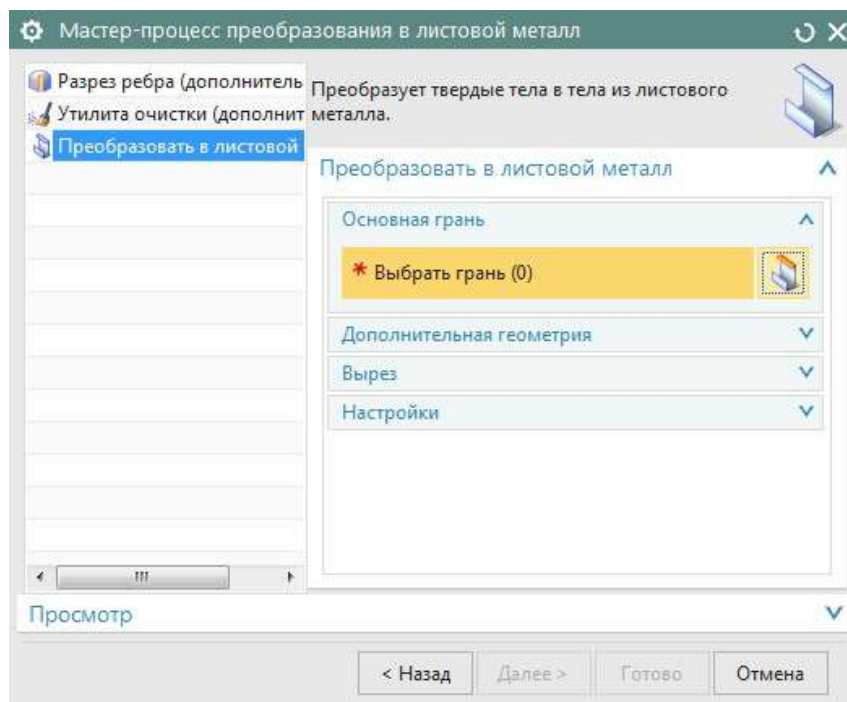


Рисунок 2.6 – Перетворити на листовий метал

У модулі моделювання буде створена перша геометрія, а потім вона буде перетворена на листовий метал, як показано на рис. 2.6. Площина лонжерона була спочатку побудована на відстані 53,4 мм від вертикальної площини брызковика (рисунок 2.7).

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Площина лонжерона

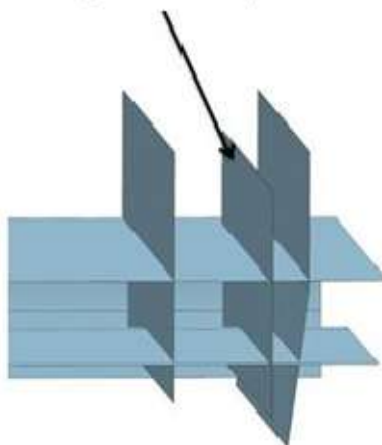


Рисунок 2.7 – Площина нижньої полиці лонжерону

Надалі, як показано на рисунку 2.8, площина лонжерона обрізається іншими площинами за допомогою функції поверхні обрізки. Метою є з'єднання поверхні лонжерону з межами за допомогою площин, зображених на рис. 2.5.

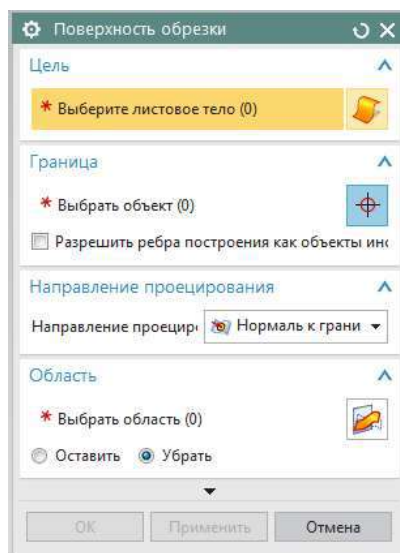


Рисунок 2.8 – Поверхня обрізки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

34

Результат, який вийшов після проведення всіх обрізок, зображено на рисунку 2.9.

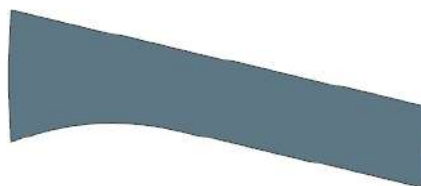


Рисунок 2.9 – Нижня площина лонжерону

Оскільки довжина лонжерону становить 730 мм, його вирішили вигнути на 4 градуси по середині. Місце вигину було заокруглено з  $R=381,5$  мм. Рисунок 2.10 показує результат.

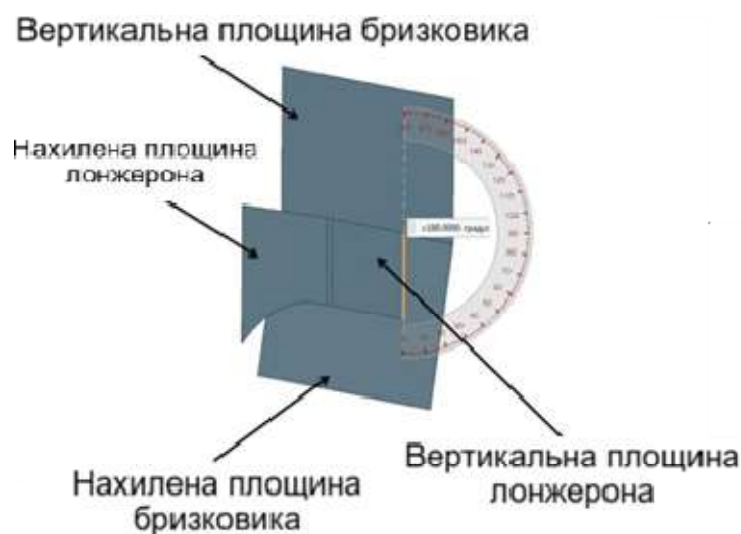


Рисунок 2.10 – Площина лонжерону та площина бризковика

На наступному кроці сполучення між бризковиком і лонжероном не

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

повинно бути виконано. На рисунку 2.11 показані всі можливі способи з'єднання кузовних деталей між собою:

- застосовувані зварні з'єднання (1 - внахлест, 2 - з накладкою, 3 і 4 - прилеглі);
- небажані зварні з'єднання (1 - встик, 2 - кутове, 3 - Т-подібне, 4 - хрестоподібне);
- дугове зварювання в газовому середовищі (CO<sub>2</sub>);
- двостороннє контактне зварювання (1 — точкове; 2 — шовне);
- Одностороннє контактне зварювання (1 — тонший верхній лист, 2 — значно тонший верхній лист, 3 — нерухомий допоміжний електрод).

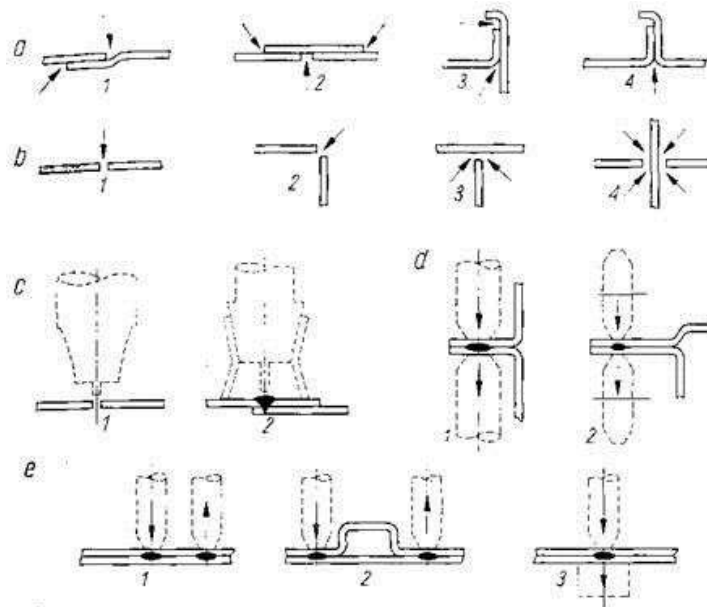


Рисунок 2.11 - Нероз'ємні з'єднання кузовних деталей, що виконуються зварювання.

Для досягнення максимальної міцності конструкції кузова було обрано спосіб двостороннього контактного зварювання. Можливість двостороннього контактного зварювання вимагає виконання низки умов:

1. Фланці лонжеронів повинні бути паралельні площинам

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

бризковика, щоб вони були з'єднані з ним.

2. Плоскі фланці забезпечують краще прилягання.
3. Оскільки поверхня лонжерону має криволінійну геометрію, радіус фланця повинен бути однаковим по всій довжині лонжерону.
4. Для спрощення процесу зварювання та виготовлення штампової оснастки радіуси обох фланців повинні бути однаковими по всій довжині контакту з бризковиком.

Рисунок 2.12 показує результати моделювання за дотримання наведених вище умов.

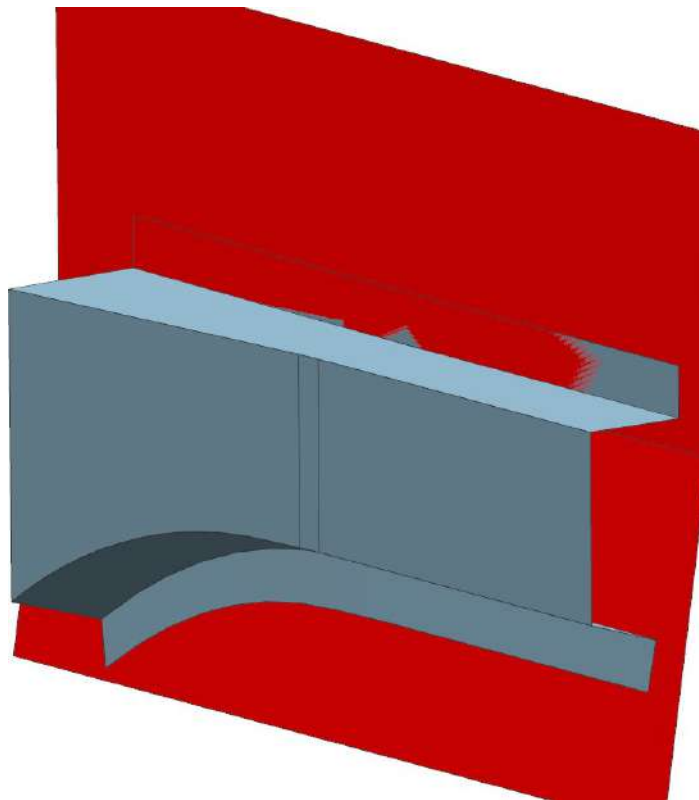


Рисунок 2.12 – Геометрія лонжерону

Наступний крок необхідно поєднати з профілем геометрії лонжерона, який уже існує, і з іншими деталями, які визначають положення лонжерону,

					КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

такими як моторний щит і панель рамки радіатора. Результат показано на рисунку 2.13.

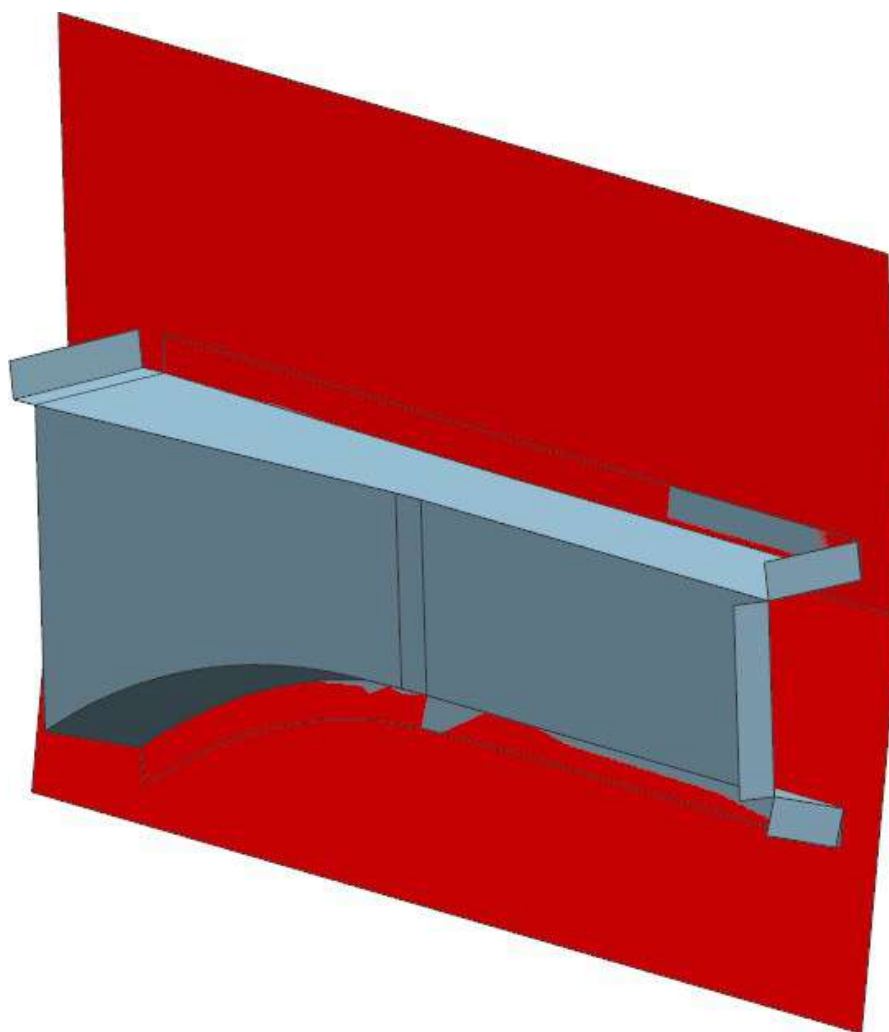


Рисунок 2.13 – Геометрія фланців для з'єднання з кузовом

Поверхня лонжерона повинна бути перетворена на тривимірне тіло з різною товщиною за допомогою наступного кроку. Рисунок 2.14 показує результат цієї операції.

					КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

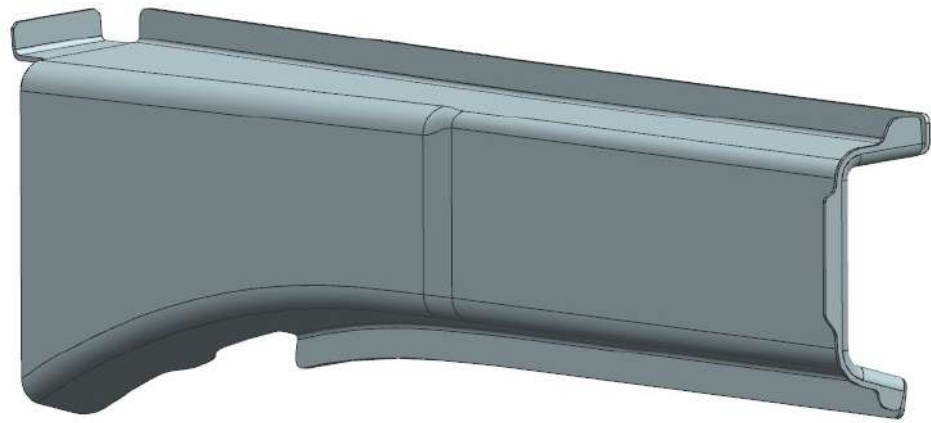


Рисунок 2.14 – Твердотільне подання лонжерону

Згідно зі схемою, наведеною на рис. 2.2, наступним кроком потрібно виконати отвори. Рисунок 2.15 показує результат.

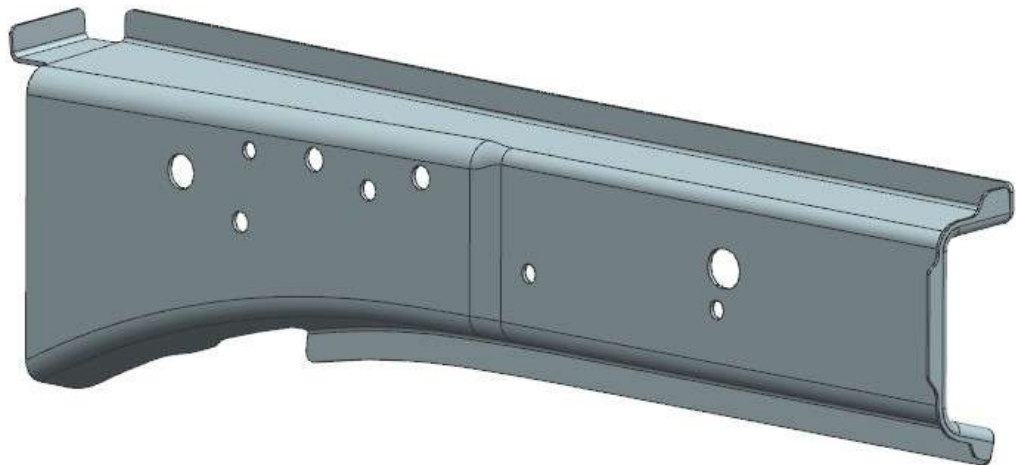


Рисунок 2.15 – Остаточна геометрія лонжерону.

## 2.2 Розробка технології виготовлення лонжеронів

Всі операції, які виконуються в будь-якому технологічному процесі

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

листового штампування, можна розділити на такі категорії:

1. Розділові операції
2. Формотворчі операції
3. Штампоскладальні операції

На рисунку 2.16 представлено схему, на якій продемонстровано всі операції:

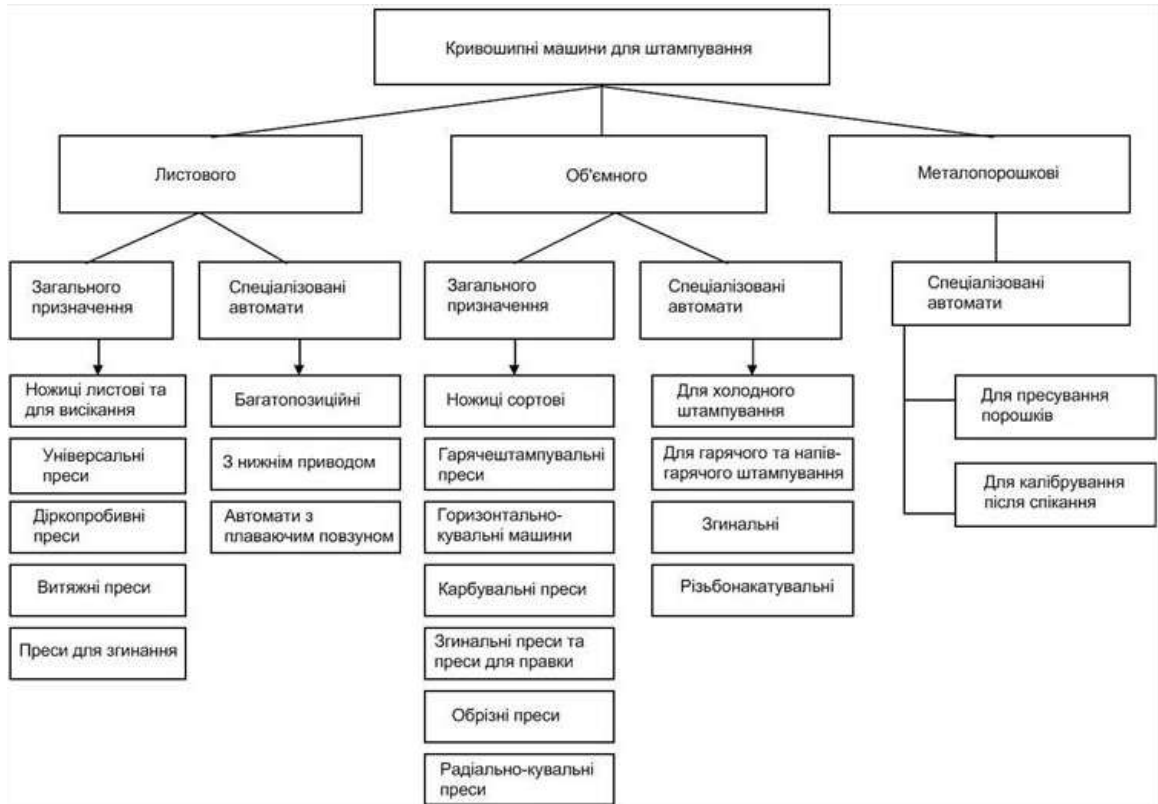


Рисунок 2.16 – Класифікація основних операцій штампування

У основному технологічному процесі виготовлення лонжеронів листового штампування основною формотворчою операцією є витяжка із застосуванням притискання. У цьому варіанті двокутове згинання використовується замість попередньої процедури, щоб змінити напружено-деформований стан металу. Це також змінює перебіг металу, що дозволяє контролювати явища пружинення як під час, так і після розвантаження.

Процес технологічного виготовлення лонжерону показано на рисунку 2.17.

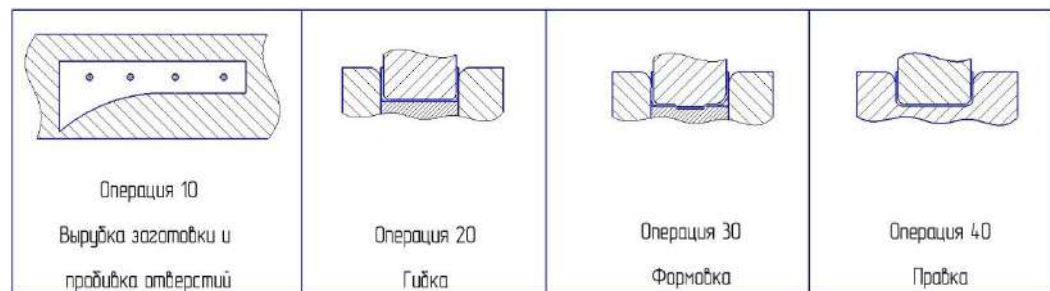


Рисунок 2.17 – Техпроцес виготовлення лонжерону

## 2.3 Методи підвищення точності виготовлення лонжеронів

### 2.3.1 Конструктивні засоби забезпечення жорсткості лонжеронів

Конструкцію лонжерону посилюють кількома конструктивними елементами, щоб забезпечити достатню жорсткість і можливість виконувати функцію демпфера під час експлуатації та при ДТП, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1 - Конструктивні елементи, що збільшують жорсткість конструкції

Назва	Візуалізація	Переваги	Недоліки
Рebro жорсткості		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Мінімізує геометричні дефекти</li> <li>- Надасть жорсткість конструкції у кутах</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ускладнює сполучення деталей з внутрішньої поверхні лонжерона</li> <li>- Сприяє жолобленню після штампування</li> </ul>

Продовження табл.. 1

<p>Підштамповка на нижній полиці</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Надає жорсткості нижній полиці</li> <li>- Зменшує жолоблення при штампування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Погіршує скручування при ДТП</li> <li>- ускладнює сполучення деталей</li> </ul>
<p>Підштамповка на бічних полицях</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Надає жорсткості бічній полиці</li> <li>- покращує демпфуючі властивості</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Необхідно потужніша обладнання</li> </ul>
<p>Отвори, отвори овальної форми</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- покращує демпфуючі властивості</li> <li>- покращує скручування при ДТП</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ускладнює технологічний процес штампування, додає роздільну операцію</li> <li>- Вимагає додаткового штамп для вирубки/пробивки</li> </ul>

### 2.3.2 Технологічні методи забезпечення зниження пружиніння

Технології штампування змінилися, що призвело до збільшення кількості переходів і зміни виду напружено деформованого стану (розтягування, карбування та ін.).

На практиці найчастіше використовується технологія компенсації пружинення, а також багато інших методів:

1. Усунення компенсаторів (рис. 2.18);

2. Зміна анізотропії матеріалу (рис. 2.19);
3. Більше штампувальних переходів (рис. 2.20);
4. Застосування калібрування (рис. 2.21).

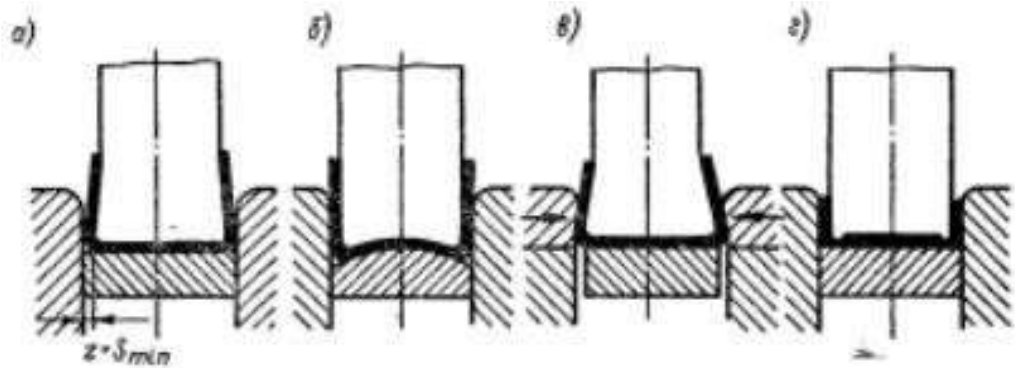


Рисунок 2.18 – Способи компенсації кута пружинення

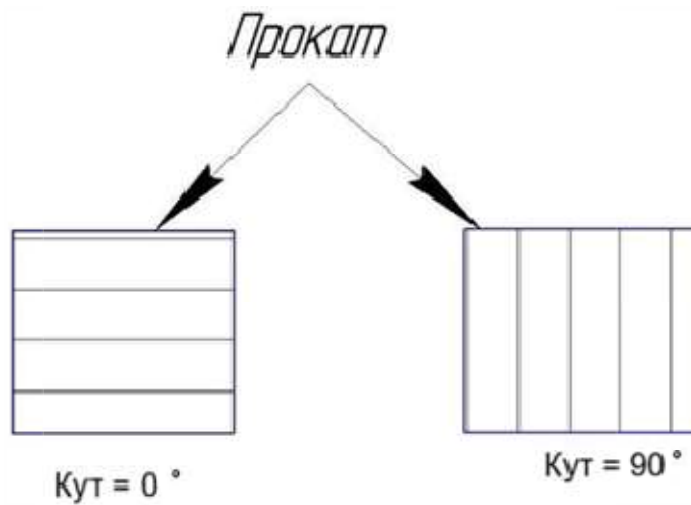


Рисунок 2.19 – Зміна кута прокату (анізотропія)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

43

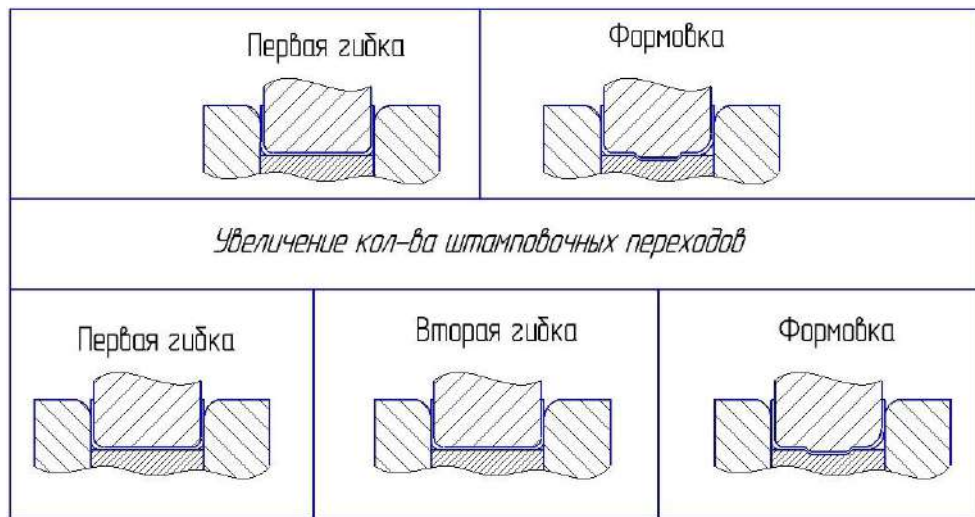


Рисунок 2.20 – Збільшення кількості штампувальних переходів.

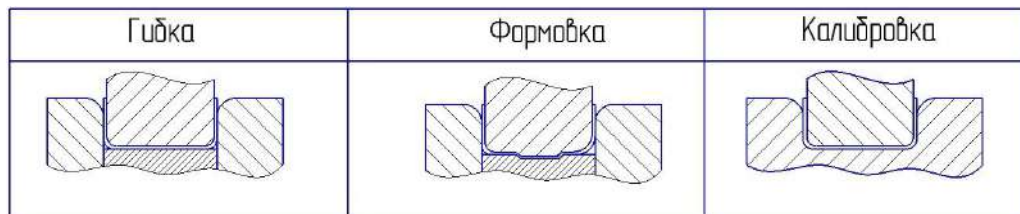


Рисунок 2.21 – Застосування операцій, що калібрують

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3 Аналіз напруженого деформованого стану заготовки при п-подібному згинанні

#### 3.1 Особливості аналізу процесу згинання

Отримання точної форми, кутових і лінійних розмірів при згинанні значною мірою залежить від того, як матеріал деформується. Конструкція деталей, що штамуються, повинна відповідати параметрам і можливостям процесу холодного листового штампування.

Такі елементи повинні бути враховані під час проектування деталі:

- 1) Можливість отримання спроектованої конструкції за допомогою пластичної деформації металу;
- 2) можливість виробляти інструмент із необхідним запасом міцності під час масового виробництва;
- 3) можливість уникати операцій, які потребують коригування форми, таких як калібрування або правка;
- 4) відсутність використання складних геометричних форм, що призведе до збільшення витрат на виготовлення та експлуатацію штампу та обладнання.

Згинання, яке супроводжується пружною та пластичною деформацією металу, є однією з поширених формозмінювальних процедур листового штампування. Зони пружної деформації розташовані навколо серединної поверхні заготовки. Величина пружної зони залежить від деформації при згинанні, тобто від радіуса та кута згинання.

Згинання здійснюється залежно від розмірів, форми та профілю деталі, вихідної заготівлі та способу виробництва:

Згинання-прокатка на валкових копіювально-згинальних верстатах;

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

згинання-прокатка на роликівих верстатах; згинання з розтягуванням на спеціальних обтяжних та профілезгинальних верстатах; метод вільного згинання в універсальних штампах на спеціальних згинальних пресах; кривошипні, ексцентриккові, фрикційні та гідравлічні преси; і універсальні згинальні автомати.

Процеси згинання класифікуються за способом застосування зовнішніх навантажень: згинання моментом; згинання поперечної силою; згинання з додатком торцевого зусилля (розтягування або стискування); згинання з радіальним стисненням; або згинання з аксіальним стисненням.

Мінімально допустимі радіуси згинання  $R$  застосовують лише тоді, коли це закладено конструкцією, технологічністю або «інструментом». У більшості випадків  $R_s$  використовується, особливо для важко деформованих товстолистових сталей.

Згинання П- або V-подібних деталей може призвести до отримання деталей, у яких висота полиць більша за  $2s$ . Рекомендується розташовувати поперек волокон прокату при згинанні на малий радіус або твердих, важко деформованих металів з  $R_{\min} = (2 \div 4) s$ . Несиметричне згинання може призвести до спотворення деталі, наприклад жолоблення або кручення, через неоднорідність розподілу напружено-деформованого стану. З цієї причини більш затребувана симетрична конструкція гнутих деталей у практиці. Ускладнення штампу, яке збільшує знос, запобігає цьому. Рисунок 3.1 показує основні обмеження під час згинання.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

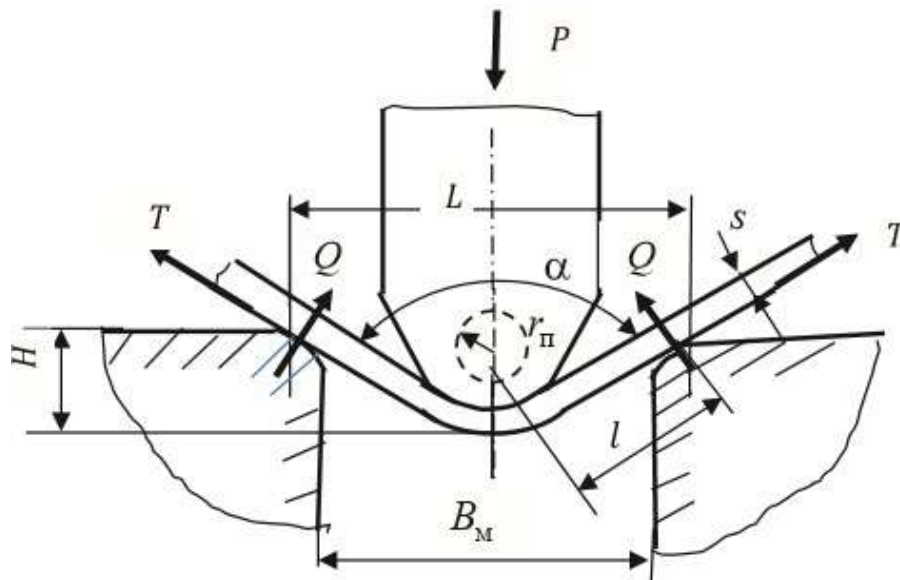


Рисунок 3.1 – Схема вільної U-подібної згинання

Основні показники технології згинання: Для згинальних операцій необхідно:

- а) Визначити розмір напівфабрикату (заготовки);
- б) Визначити кількість та послідовність операцій у технологічному процесі;
- в) розрахувати зусилля згинання та виштовхувача деталі;
- г) Вибрати мінімально-допустимі радіуси згинання відповідно до товщини виробу;
- е) Розрахувати зазор між інструментами.

Коли ви розробляєте технологію виготовлення деталі за допомогою листового штампування, вам потрібно вибрати найефективніший спосіб. Завдяки цьому методу можна створити продукт, який має найменші відхилення від запланованого вигляду та має найнижчу вартість виготовлення.

### 3.2. Методи чисельного аналізу напружено-деформованого стану.

Метод кінцевих елементів є основним методом чисельного аналізу напружено-деформованого стану (рисунок 3.2).

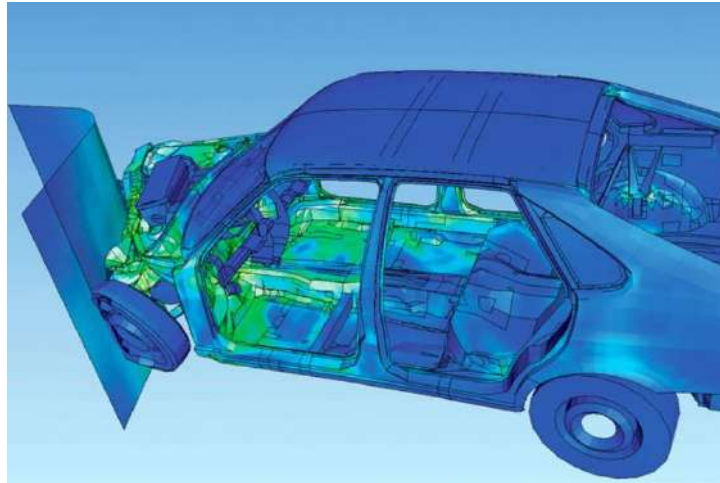


Рисунок 3.2 – Метод кінцевих елементів для crash тестів легкового автомобіля

Наступні основні етапи МКЕ:

#### 1. Процесор

Він дозволяє спростити геометрію, вибрати тип кінцевих елементів і побудувати сітку кінцевих елементів (рисунок 3.3), вибрати модель матеріалу та задати його властивості, визначити обмеження та задати навантаження.

#### 2 Виконувач

Він створює систему лінійних або нелінійних рівнянь алгебри залежно від типу кінцевих елементів і їх мережі. визначає спосіб їх вирішення та проводить обчислення відповідно до етапів процесу, зазначених у препроцесорі.

#### 3 Постпроцесор

Він дозволяє вирішувачам аналізувати результати. Постпроцесор має багато можливостей, включаючи аналіз механіки суцільних середовищ, структурної міцності, теплообміну, гідро- та аеромеханіки рідких і газоподібних об'єктів та багато іншого.

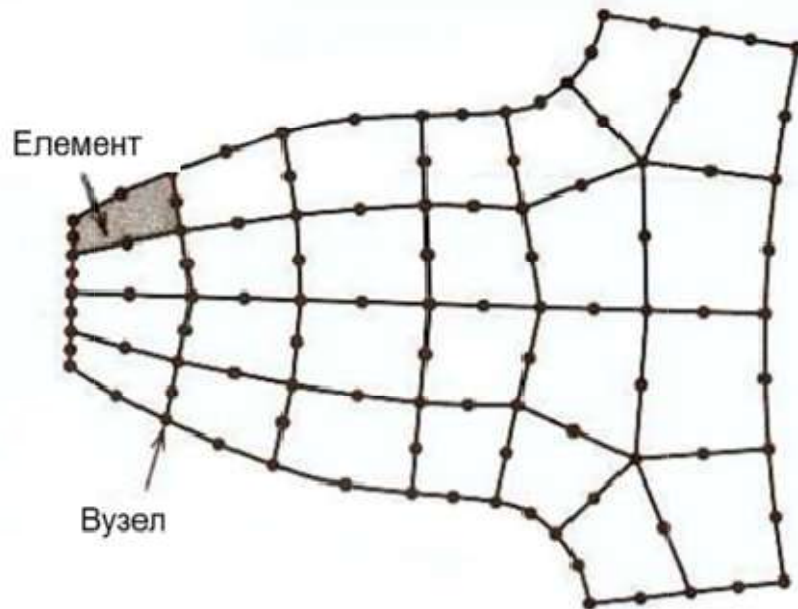


Рисунок 3.3 – Подання елементів та вузлів

Метод кінцевих елементів у листового штампування, який є поширеним інструментом у промисловій практиці з метою:

1. Визначити геометричні дефекти;
2. Визначити кількість штампувальних переходів;
3. Оптимізація отримання геометрії, яка була визначена;
4. Перевірка правильності геометрії інструмента;
5. Вибір і використання матеріалу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

49

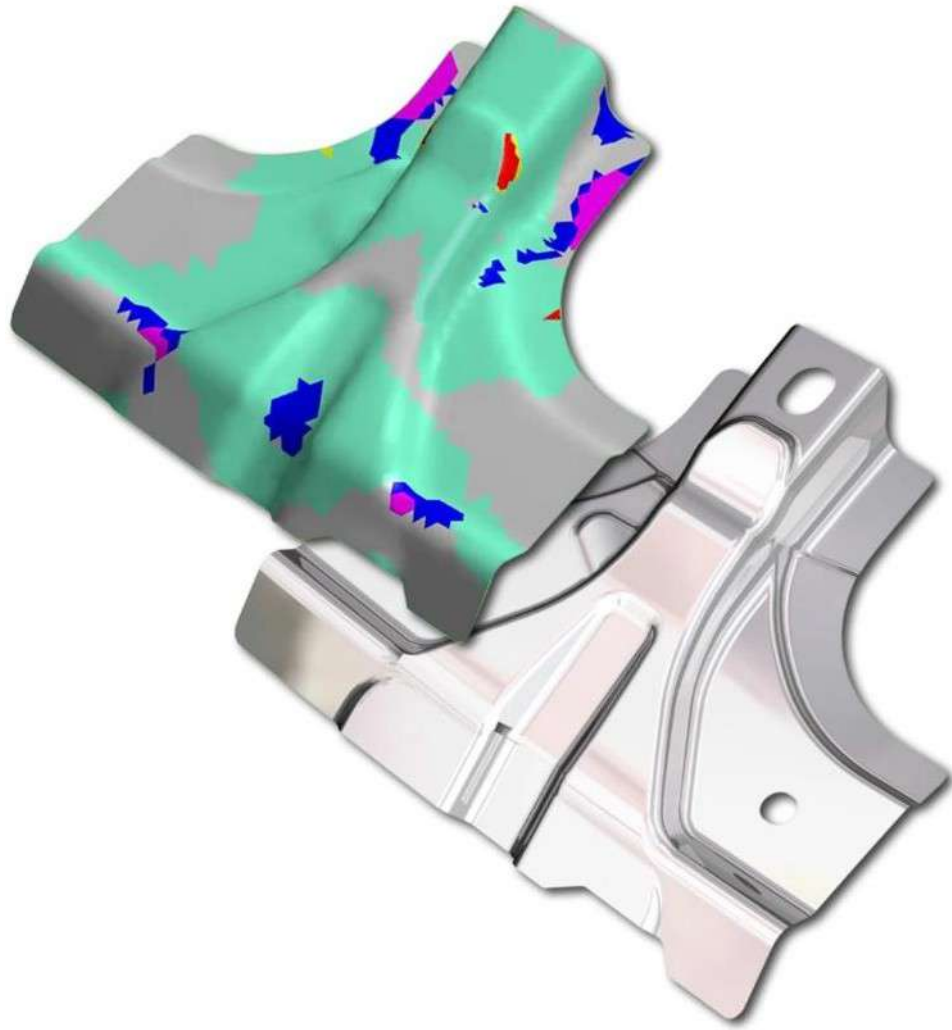


Рисунок 3.4 – Метод кінцевих елементів у листовому штампуванні

Рішення, отримані за допомогою кінцевих елементів, залежать від типу елементів, які використовуються в чисельній моделі, і кількості елементів, які використовуються.

Програмні продукти, призначені для моделювання та аналізу листового штампування, такі як Autoform, PamStamp і LS-Dyna, зазвичай використовують адаптивні сітки КЕ для виконання завдань заготовки. Напруги та деформації листового металу повинні бути визначені за

товщиною заготівлі, оскільки він деформується пружно-пластично. Це вимагає кінцевих оболонкових елементів інтегрування відповідно до товщини заготовки, що призводить до введення віртуальних шарів і збільшення вузлів для напруги та деформації.

### 3.3 Аналіз напруженого стану

Установка напружено-деформованого стану моделі є однією з основних причин проведення інженерного аналізу.

Тензор напруги описує напружений стан. Для листового штампування також потрібен цей аналіз, щоб визначити залишкові напруги після деформації та визначити необхідне навантаження. Залишкові напруги після завершення листового штампування викликають низку проблем, тому необхідно визначити їх значення та визначити, куди вони поширюються.

Для точного моделювання з використанням методу кінцевих елементів вибір типу елемента також дуже важливий. КЕ можуть бути використані для пластин, мембранних і оболонкових КЕ, залежно від проблеми та геометрії листової металевої деталі. Оболонкові елементи найчастіше використовуються для симуляції деформації листового металу через їхню обчислювальну ефективність. Вони базуються на різних теоріях вигину, які корисні для випадків, коли товщина матеріалу значно менша порівняно з іншими розмірами.

Теорії стверджують, що коли пластина згинається, вона отримує плоский напружений стан, і її геометрія відображається середньою площиною. Можна значно скоротити кількість незалежних ступенів свободи, оскільки елементи описують лише середню площину пластини.

У багатьох випадках повноцінна тривимірна симуляція може бути представлена за допомогою моделі, в якій використовуються плоскі (2D)

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

елементи плоскої деформації, щоб пришвидшити час аналізу.

Загалом, кожна симуляція феномена пружинення в деформації листового металу складається з двох основних етапів: навантаження, яке відбувається під час штампування продукту, і розвантаження, яке відбувається під час пружинення. Симуляція розвантаження може відбуватися двома різними способами. Для підвищення обчислювальної продуктивності промисловість зазвичай використовує миттєве звільнення інструменту. У процесі розвантаження також можна використовувати поступове відведення інструменту. Цей метод можна назвати зворотним формуванням, коли навантаження змінюється місцями, а інструменти поступово відводяться. Однак через високі витрати на обчислення він менш популярний. Через те, що контактні сили присутні на етапі розвантаження, цей метод є більш реалістичним, але він менш поширений через високі витрати на обчислення.

Для того, щоб зробити точне прогнозування феномена пружинення у штампуванні листового металу за допомогою аналізу кінцевих елементів, дуже важливо зменшити помилки моделювання. Це можна зробити, враховуючи наступне:

- Точність напруженого стану в кінці деформації може бути отримана за допомогою матеріалу моделі, який найбільш повно описує характеристики заготовлі. Якщо модель заснована на вихідних характеристиках плинності та міцності, отриманих протягом кількох випробувань, це важливо. Модель повинна пояснити, як матеріал реагує на необхідне розвантаження. Модель матеріалу також повинна описати нееластичні ефекти, які можуть виникнути під час розвантаження. Ці ефекти можуть вплинути на загальні значення пружинення та параметри, пов'язані з контактом заготовки та інструменту. Коефіцієнт тертя має значний вплив на точність вимірювання пружинення. Моделі краще описують потенційні

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

зміни під час деформації;

- Під час оцінювання результатів числового аналізу важливо пам'ятати, що в штампуванні листового металу є кілька типів пружинення. Використання високої притискної сили або коефіцієнта тертя зменшує згинальне пружинення, але збільшує неоднорідність деформації по товщині заготовки і може вплинути на результат пружинення, що може призвести до великих спотворень форми продукту під час розвантаження.

- Поступове розвантаження краще, ніж миттєве розвантаження. Деталь може зазнати додаткових пластичних деформацій під час розвантаження через контактуючі сили.

Для отримання більш точної картини напружено-деформованого стану матеріалу після штампування буде використана CAE-модель, в якій матеріал інтегруватиметься по 7 шарах по товщині, що дозволить отримати більш точне уявлення та детально побудовані епюри напруги.

За модель для проведення дослідження було взято п-подібний профіль, проведено симуляцію штампування (навантаження та розвантаження). Інженерний аналіз був проведений в CAE-програмі AutoForm. У цій програмі є можливість експортувати результати симуляції, рисунок 3.5. Для цього необхідно вибрати *Menu – Export*, тут можна вказати формат, в який буде переводиться модель з напружено деформованим станом з AutoForm. Було обрано формат *DYNA*. Кількість шарів 7. Також задано такі результати симуляції:

1. Товщина
2. Пластична деформація
3. Тензор напруг

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

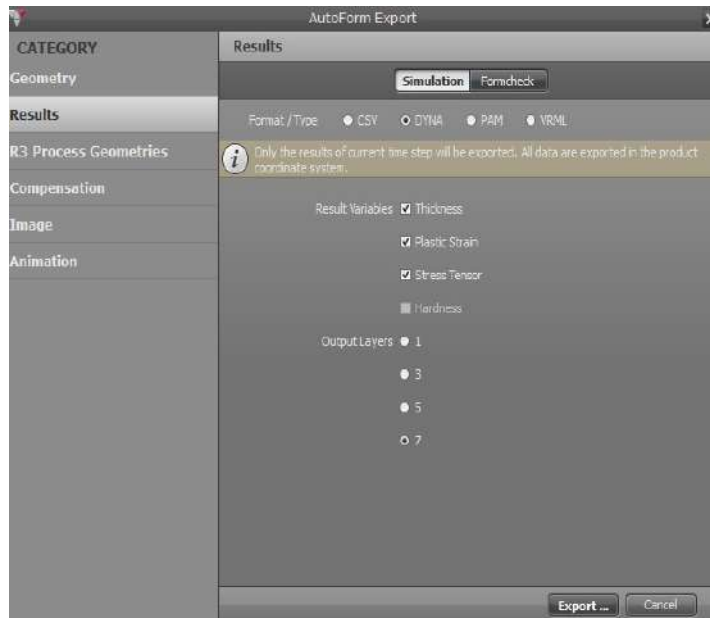


Рисунок 3.5 – Експорт результатів.

Отриманий файл DYNA був відкритий у LS-PrePost, у відкритому вікні можна побачити кількість шарів інтегрування за товщиною для завантаженої моделі, Рисунок 3.6.

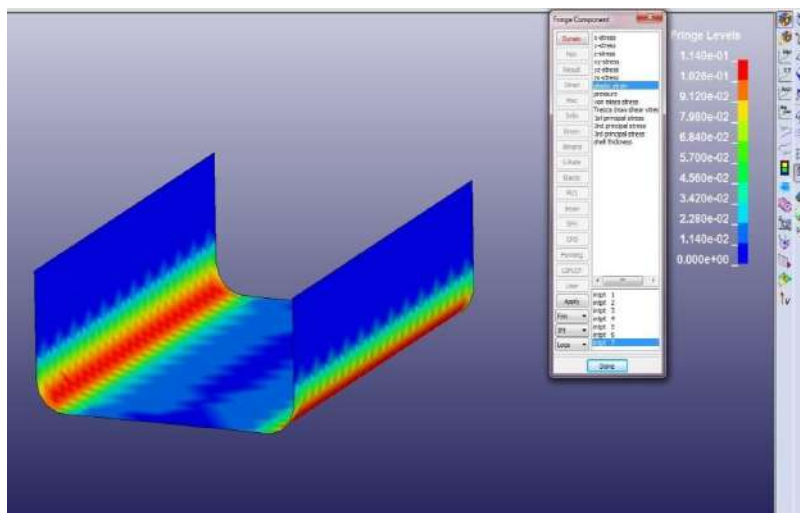


Рисунок 3.6 – Робоче вікно LS-PrePost'a.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

54

Розрахунки можна продовжувати з цим файлом. У цьому дослідженні були побудовані епюри напружено деформованого стану (НДС) вздовж перерізу за допомогою отриманого файлу. Для цього необхідно імпортувати dyna-файл у модуль Advanced Simulations, який використовується для проведення інженерного аналізу Siemens NX, як показано на рисунку 3.7. Дерево постпроцесора показує два кроки за часом. Таким чином, перший крок визначає крок до розвантаження, а другий крок визначає стан моделі після зняття всіх навантажень і розвантаження.

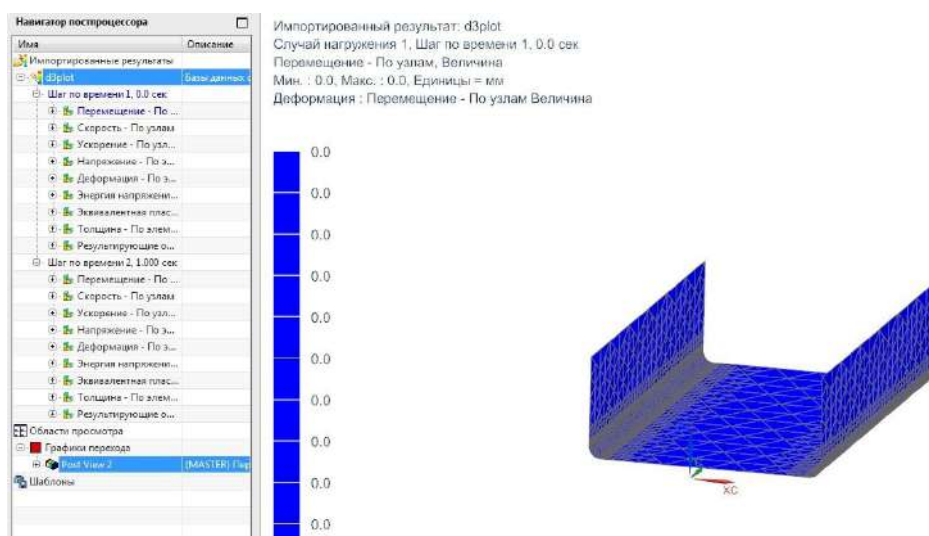


Рисунок 3.7 – Робоче вікно NX Advanced Simulation.

На рисунку 3.8 представлені шари інтегрування, а також які напруги можна проаналізувати.

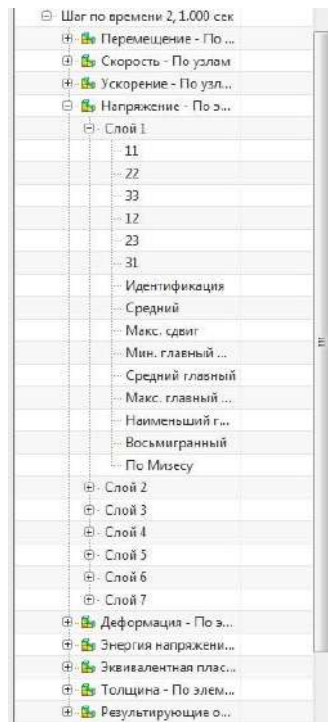


Рисунок 3.8 – Возможна напруга для відображення шарів.

Для побудови епюр ПДВ по семи шарах вздовж перерізу необхідно створити графіки для кожного шару та накласти їх один на одного. На рисунку 3.10 показано основне вікно для побудови графіків, а на рисунку 3.12 показано, як будується перетин і графік.

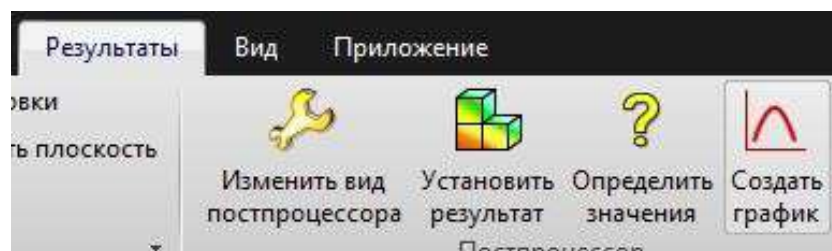


Рисунок 3.9 – Работа с результатами NX Advanced Simulation.

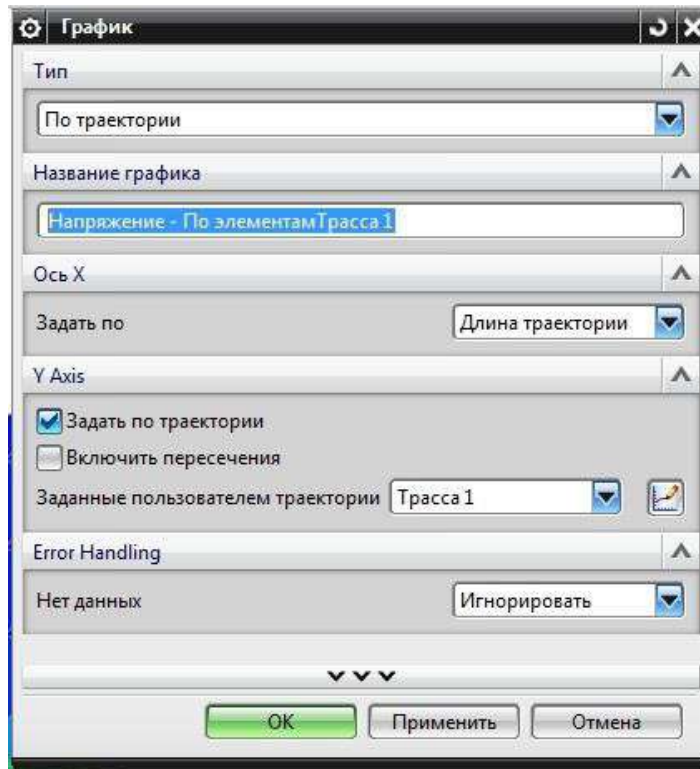


Рисунок 3.10 – Створення графіка

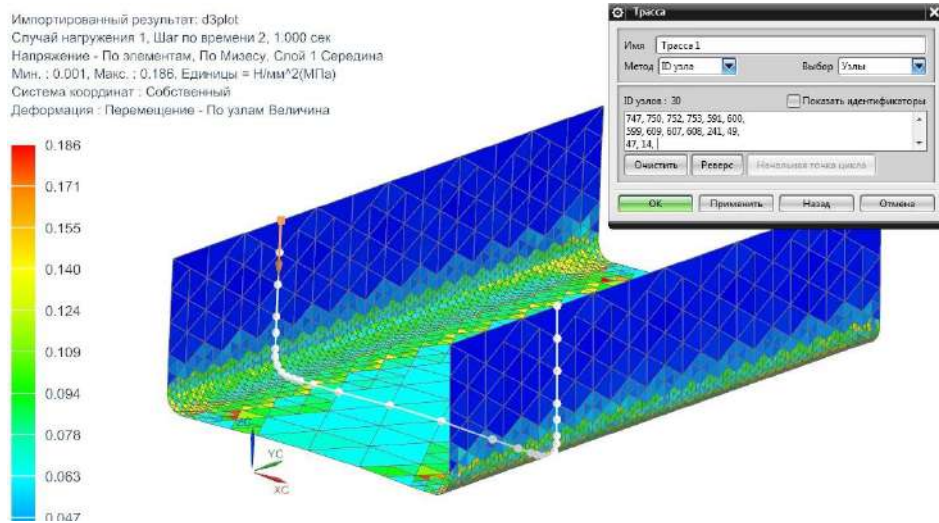


Рисунок 3.11 – Побудова перерізу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

57

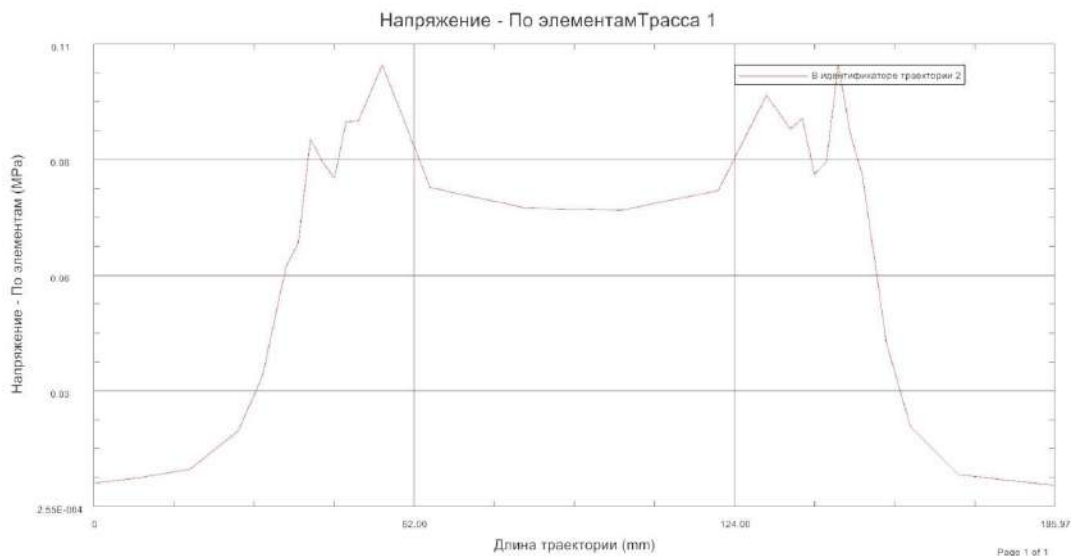


Рисунок 3.12 – Графік напруги по Мізесу вздовж перерізу.

Рисунок 3.13 показує, як графіки можна накласти один на одного, виконавши такі ж процедури для кожного шару. Рисунок 3.14 показує результат накладення.

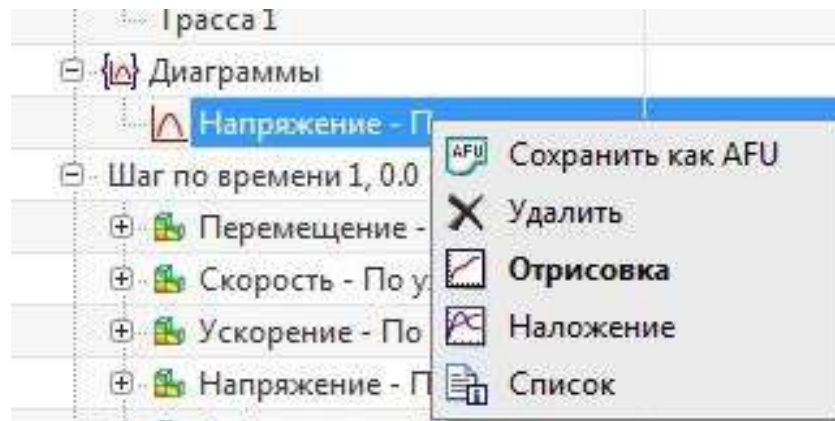


Рисунок 3.13 – Накладення

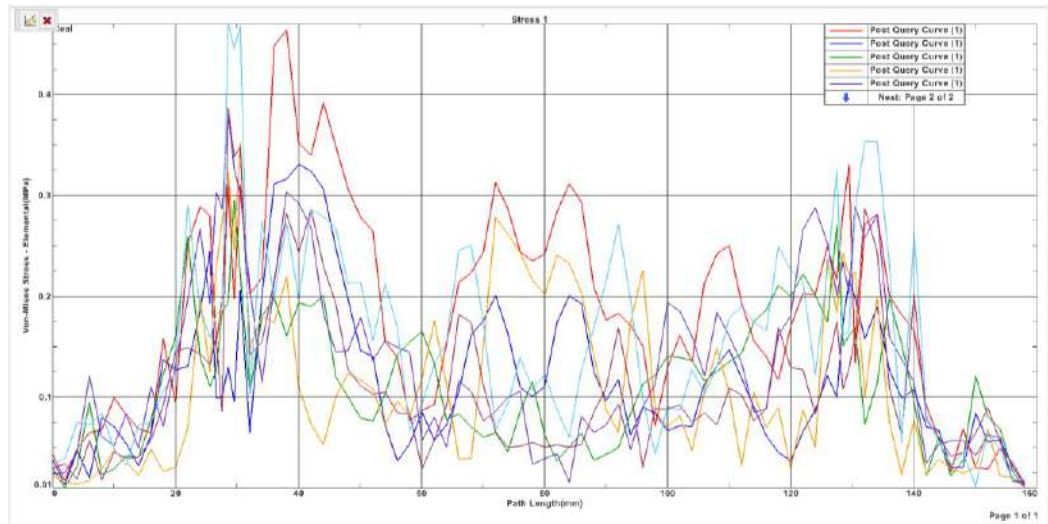


Рисунок 3.14 – Епюра напруженого стану

### 3.4 Аналіз деформованого стану

Під час аналізу даних зазвичай не враховується вплив пружної деформації на геометрію, властивості та структуру тіла під час процесу деформування.

Переміщення атомів усередині тіла, що деформується, викликає залишкові зміни форми та структури. Це відбувається після зняття зовнішніх сил.

Після завершення симуляції програма AutoForm автоматично створює діаграму граничних форм змін (FLD), як показано на рисунку 3.15. Це метод, який дозволяє передбачити руйнування листового матеріалу під час штампування.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

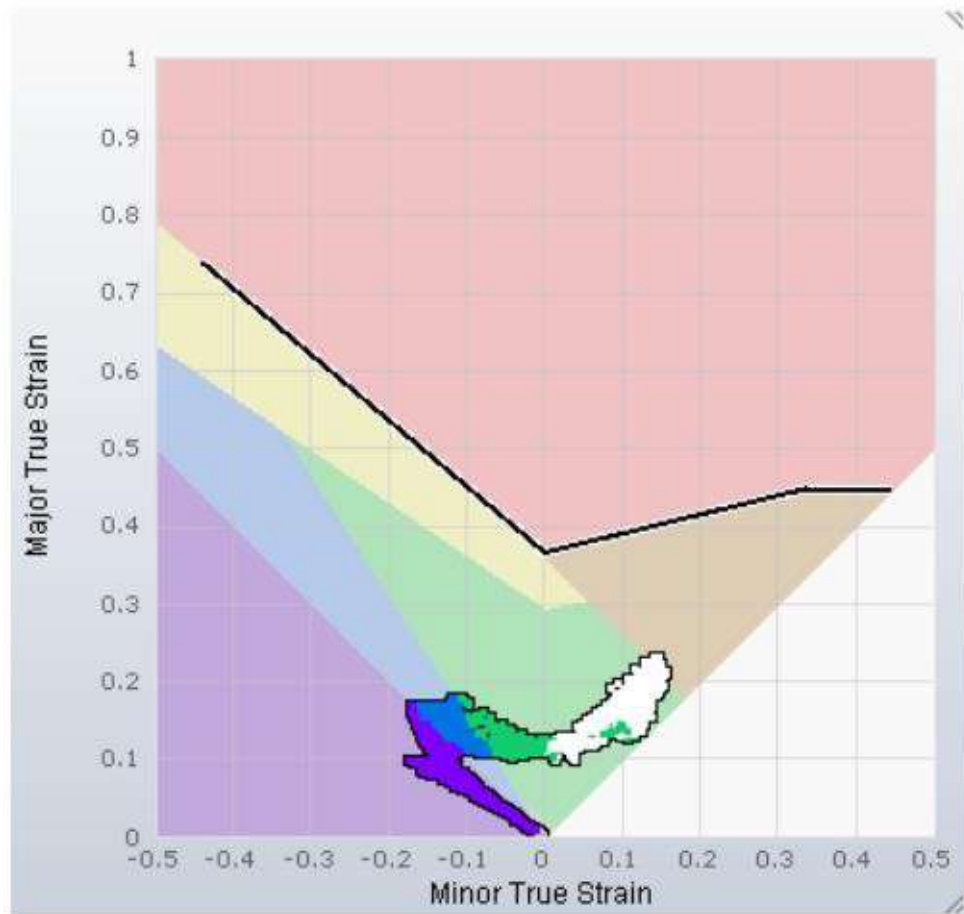


Рисунок 3.15 – FLD-діаграма.

Діаграма FLD має різний вигляд для кожного матеріалу, як показано на рисунку 3.16, де показано опис колірних зон діаграми. Діаграма поділяється на зони, які містять поєднання основних деформацій, які використовуються для прогнозування дефекту. Найбільші основні деформації відкладаються на вертикальній осі, а найменші основні деформації відкладаються на горизонтальній осі. Термін «крива граничної формозміни» використовується для опису отриманої кривої.

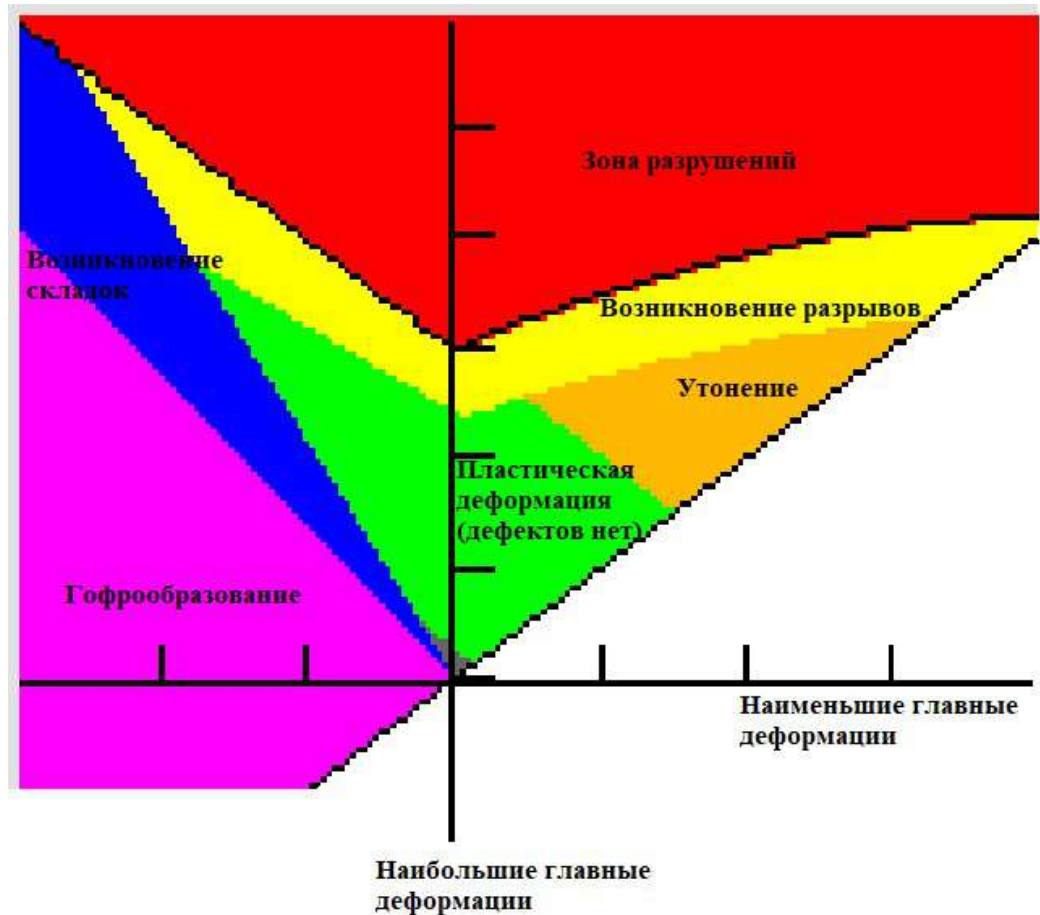


Рисунок 3.16 – Опис зон FLD-діаграми

Логарифмічні основні деформації найвищі для найбільших основних деформацій.

Основні логарифмічні деформації з найменшими значеннями показують найменші основні деформації.

Негативні значення деформації вказують на ймовірність утворення складок, тоді як позитивні значення вказують на можливість розтягування матеріалу. Невелика напруга повинна бути корисною для стійкої пластичної деформації без утворення гофроутворення.

Накопичена пластична деформація матеріалу є інтенсивністю пластичної деформації.

Дослідження:

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

1. Розроблено спосіб визначити напружено-деформований стан відповідно до товщини виробу.
2. Побудовано епюру ПДВ відповідно до товщини.
3. Вивчено структуру FLD-діаграми.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>62</i>

#### 4 Моделювання в САПР технології згинання лонжеронів та аналіз точності їх виготовлення

##### 4.1 Моделювання штампування та аналіз точності лонжерону при вільному згинанні

Розробка моделі лонжерона є першим кроком до моделювання штампування в САЕ-системі. Модель – це набір характеристик, які використовуються для опису реального продукту, враховуючи його основні характеристики. Щоб знайти механізми пружинення, спростимо модель лонжерону до П-подібного профілю, зберігаючи лише розміри та габарити. П-подібний профіль буде спостерігатися в будь-якому перерізі змодельованого раніше лонжерону, за винятком деяких частин. Для демонстрації діючих формозмінювальних сил на виріб під час штампування використовується штамп без притиску. Таблиця 2 містить основні параметри моделювання.

Таблиця 2 – Геометричні розміри моделі

Параметр	Значення (критерій)
Габарити (Д×Ш×В)	150×100×45 мм
Радіус	8 мм
Типу штампування	Вільна, без застосування притиску
Товщина матеріалу	2 мм
Матеріал	DP590 (HCT450X)

Оскільки він має відповідну базу матеріалів і є популярним програмним продуктом в автомобілебудуванні, ми будемо використовувати його для моделювання. Рисунок 4.1 демонструє вигляд стартового вікна AutoForm.

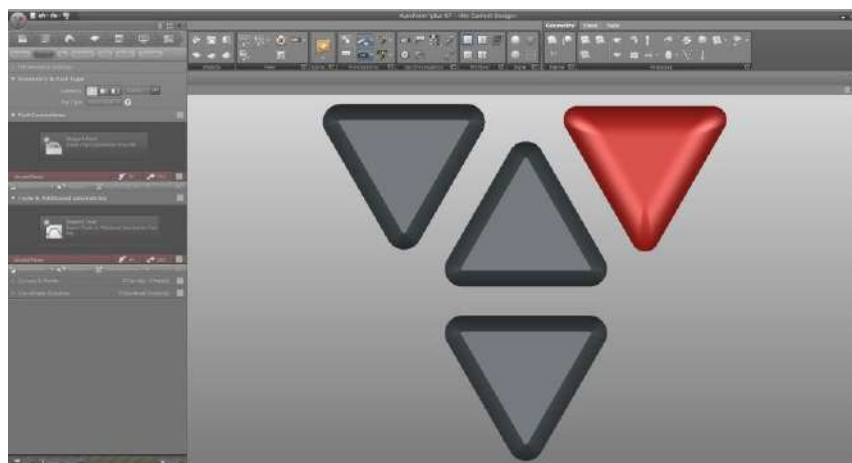


Рисунок 4.1 – AutoForm

Нагорі в панелі інструментів і в лівій частині вікна (рис. 4.2) знаходиться меню препроцесора, вирішувача та постпроцесора, що беруть участь у симуляції, а також допоміжні криві та точки для завдань міжопераційної обрізки та фіксаторів і уловлювачів за координатами.

Завантажте спочатку модель деталі та геометрію інструментів..

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

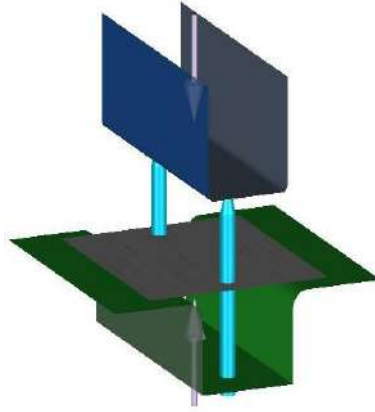


Рисунок 4.2 – Завантажена геометрія інструментів

Наступним кроком буде виконання завдання щодо орієнтації інструментів у просторі та їх геометрії. Це передбачає виконання завдання бази координат симуляції. Уникаючи піднурень, які можуть зруйнувати матеріал у цьому місці, важливо, щоб рух інструментів і деформація були спрямовані за нормальною траєкторією.

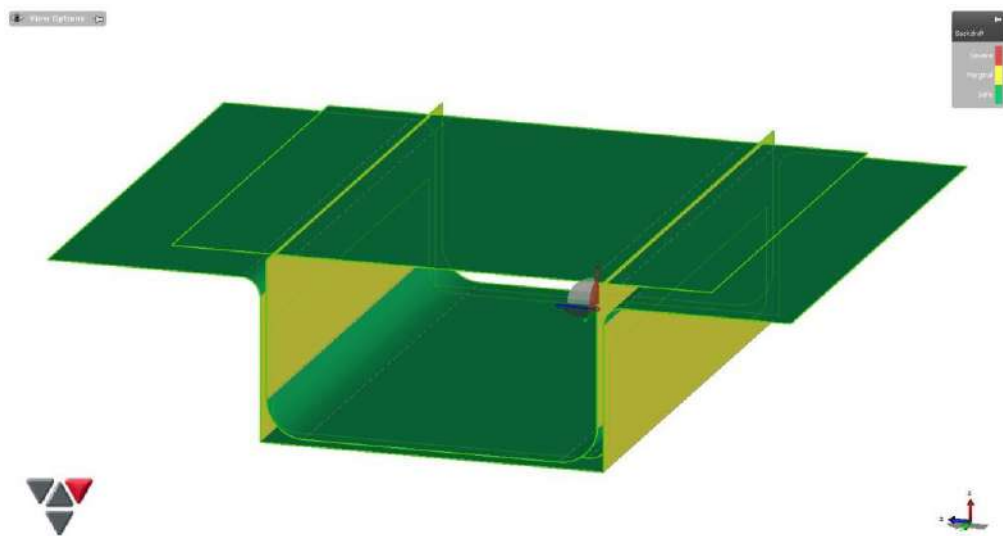


Рисунок 4.3 – Орієнтування моделі у просторі

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Завдання щодо матеріалу та його товщини виконуються. Матеріал НСТ450Х був обраний, оскільки він подібний до сталі DP450, має межу плинності 260–340 МПа, тимчасовий опір розриву 450 МПа та відносне подовження понад 27%.

На цьому етапі також визначається товщина використовуваного матеріалу.

Таблиця 2 містить значення геометричних розмірів моделі.

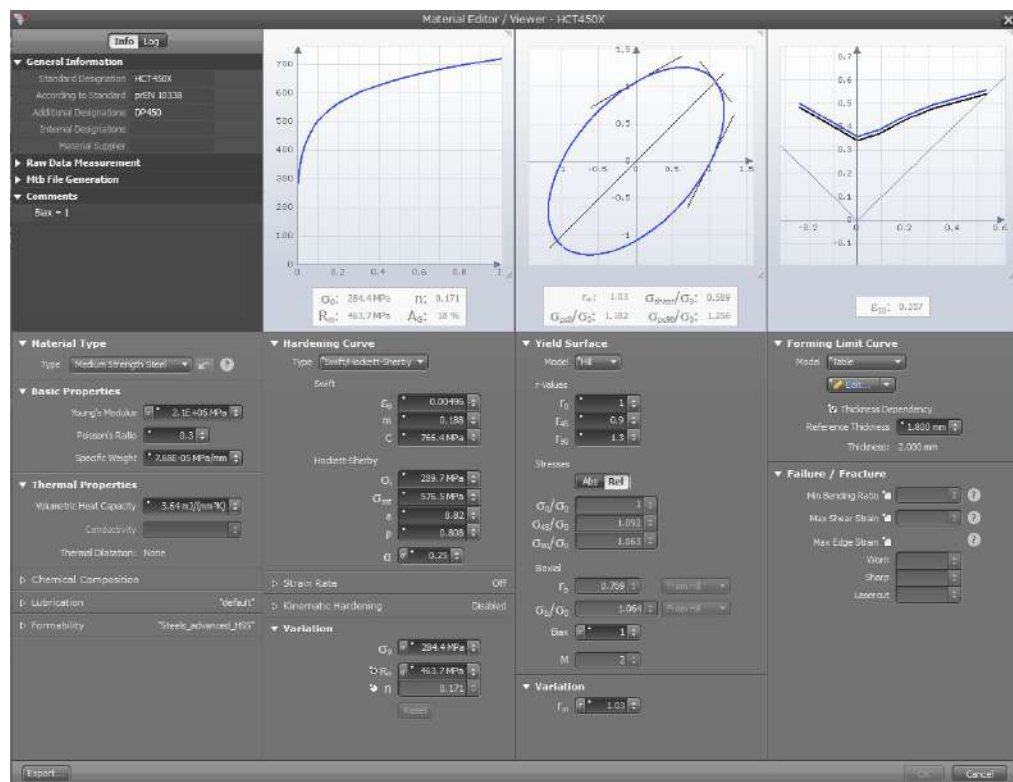


Рисунок 4.4 – Матеріал НСТ450Х

- Наступний крок — розробка стратегії. План — це технологічний процес, який буде використано в симуляції. Виберемо іконку вільного формування, оскільки процес П-подібного згинання здійснюється без притиску. Для отримання необхідних результатів необхідно додати функцію «Обладнання для вимірювань» у план симуляції. Ця функція дозволяє

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

спостерігати зміни сил і напруги в моделі, а також зміни геометрії, коли зовнішні навантаження зняті. План симуляції показано на рисунку 4.5, де:

- C-20 Формотворча операція, вільне формування
- M-30 інструмент, призначений для вимірювання деформованого напівфабрикату.

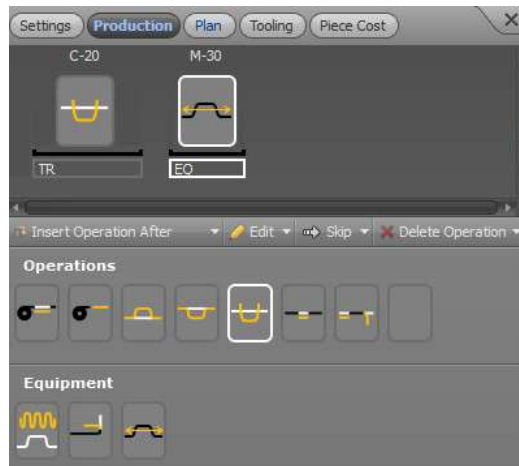


Рисунок 4.5 – План симуляції.

Після того, як план операцій був розроблений, необхідно повідомити про заготовку. У AutoForm можна задавати симетричну заготовку, вибравши геометрію з моделей поверхонь інструментів, деталі або геометрії заготовки, яку вже завантажили. Якщо потрібно редагувати заготовку, також є можливість змінити орієнтацію заготовки у просторі, налаштувати будь-який кут прокату та внести зміни геометрії, наприклад, після отримання перших результатів симуляції, рисунок 4.6.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

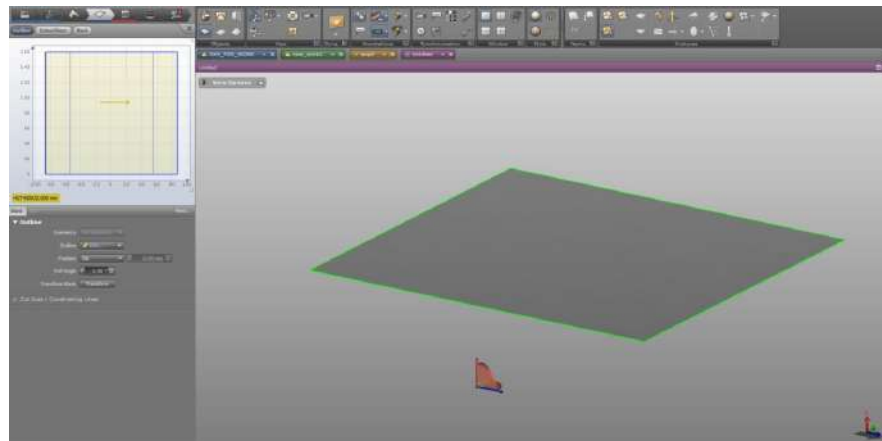


Рисунок 4.6 – Завдання геометрії та властивостей заготовки.

Після того, як геометрія та положення заготовки визначені, ми переходимо до завдання робочих інструментів, пуансону та матриці, як показано на рисунку 4.7, у вкладці «Процес». У цьому місці задаються всі параметри операцій, які були створені раніше. Для точного орієнтування заготівлі в штампі також можна визначити положення уловлювачів у вкладці Pilots/Spacers (Ловителі/фіксатори), див. рисунок 4.8.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

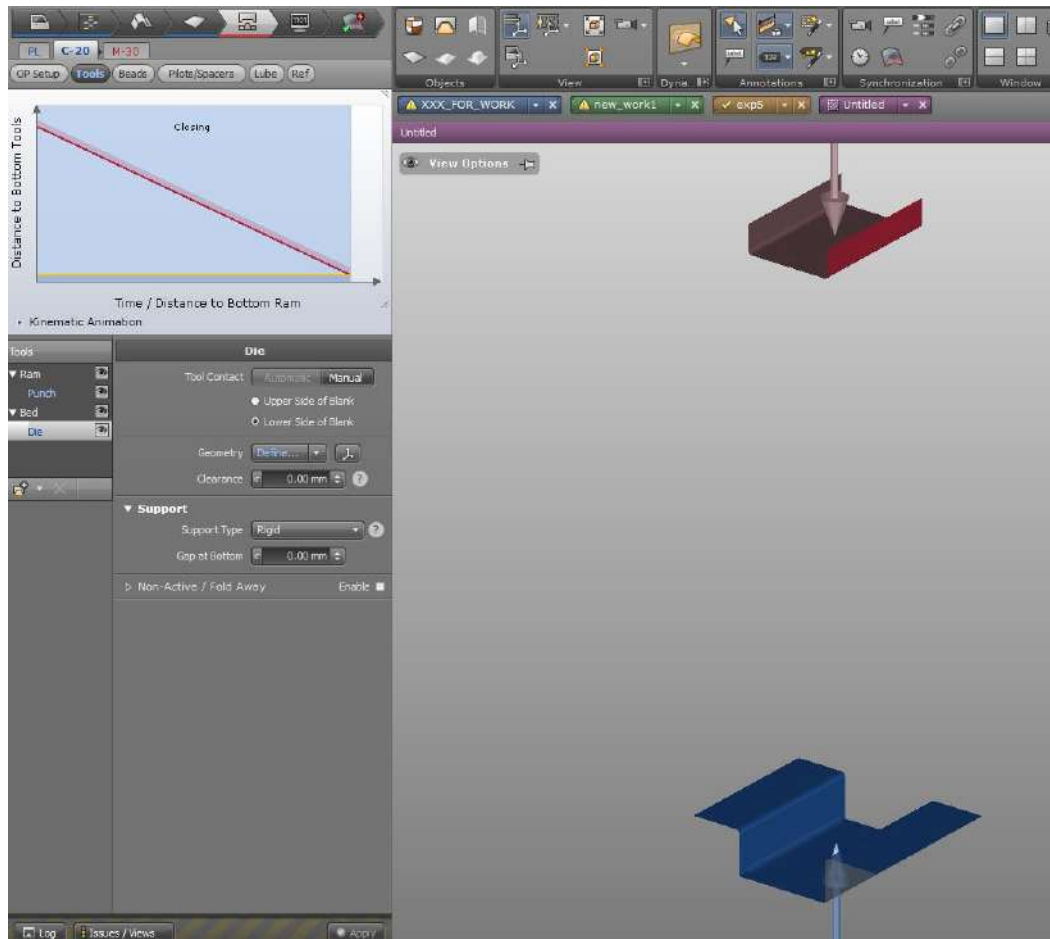


Рисунок 4.7 – Робочі інструменти симуляції



Рисунок 4.8 – Створення уловлювачів

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

69

Після введення всіх параметрів форматворчої операції (рисунок 4.9) вибір параметрів операції M-30 завершується. У цій вкладці вам потрібно буде вибрати один із чотирьох існуючих вимірів, які вам потрібні. В цьому випадку після розвантаження необхідно визначити геометрію виробу для вільного згинання. Для цього ми вибираємо вільне пружиніння.



Рисунок 4.9 – Вільне пружинення.

Після внесення всіх необхідних параметрів розрахунку ми переходимо до етапу вибору параметрів розрахунку та вибору необхідних результатів, як показано на рис. 4.10. На першому зображенні необхідно вибрати інженерний етап. У цьому випадку є вибір між двома етапами SE оцінки концепції FV і фінальної валідації.

Інтеграція по шарах є однією з основних відмінностей. Відповідно до ідеї, необхідно визначити потенціал конкретної форматворчої операції, тому інтегрування проводиться по трьох шарах. Раніше виявлення помилки залежить від швидкості розрахунку та кількості шарів. На останній стадії валідації потрібно детально вивчити процеси згинання та розвантаження, які відбуваються під час симуляції. У цьому випадку інтеграція відбувається за щонайменше сімома шарами.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Вибір результатів розрахунку показано на рисунку 4.11; тут важливо змінити кількість результативних шарів.

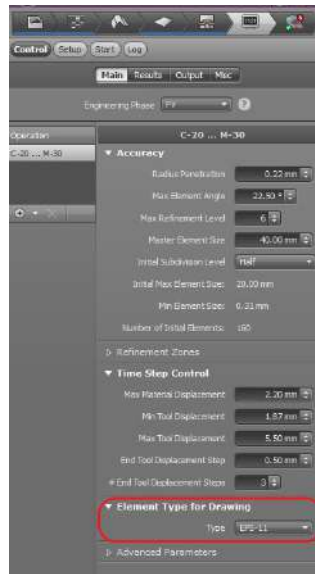


Рисунок 4.10 – Налаштування типу елемента, точності розрахунку та контролю за часу

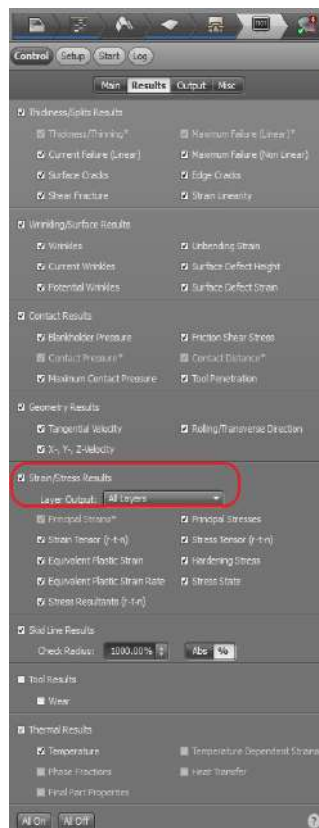


Рисунок 4.11 – Вікно вибору результатів розрахунку.

					<b>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

На цьому етапі всі налаштування симуляції завершено, і ми переходимо до етапу початку розрахунку, як показано на малюнку 4.12. Як показано на цьому рисунку, всі вкладки сині, що свідчить про те, що дані введені правильно.

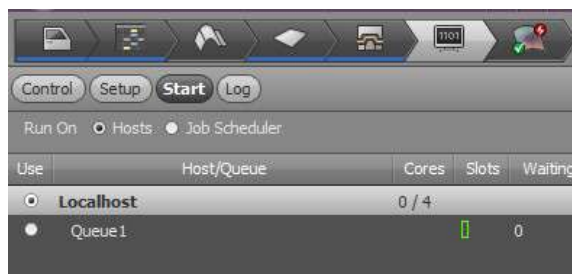


Рисунок 4.12 – Початок розрахунку

Такі висновки можна зробити за результатами моделювання вільного згинання:

1. На рисунку 4.13 показано, що внутрішній шар має найбільшу головну напругу з негативним значенням, тоді як зовнішній шар має позитивне значення, як показано на рисунку 4.14.

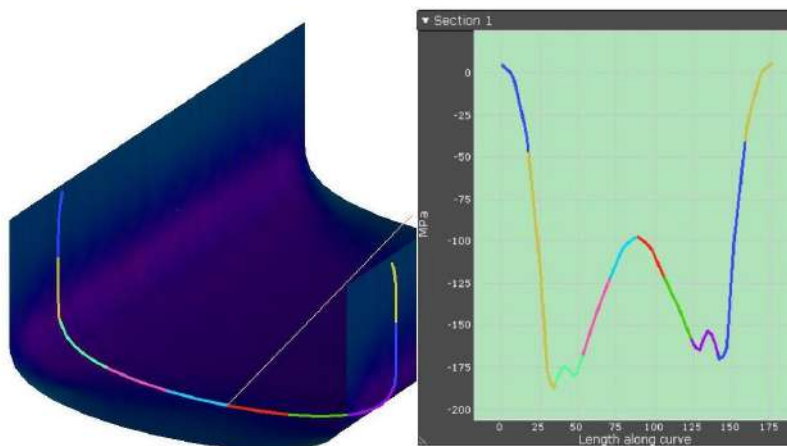
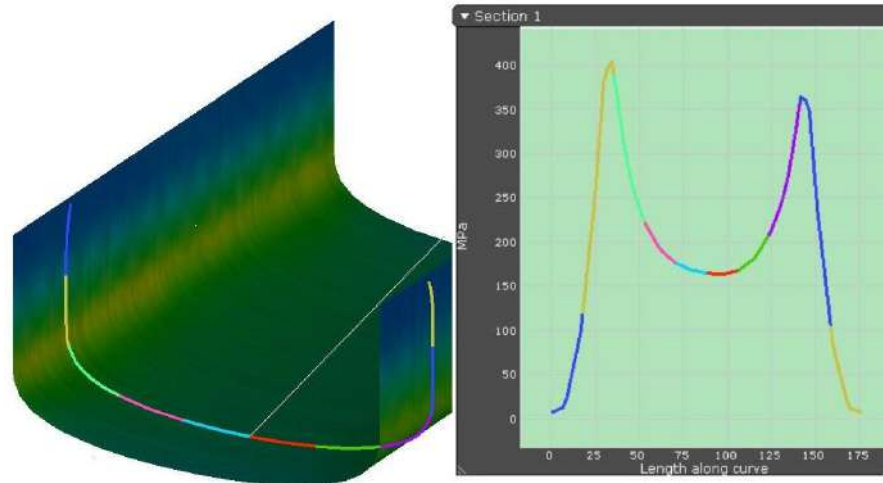


Рисунок 4.13 – Найбільша основна напруга на внутрішньому шарі в час деформації



Рішення 4.14: Найбільша основна напруга, яка виникає під час деформації, знаходиться на зовнішньому шарі.

На зображенні 4.15 показано, що внутрішній шар закритого штампа має найбільшу основну напругу, яка змінює знак на протилежний, за винятком радіусних зон. На зображенні 4.16 показано, що зовнішній шар штампа також змінює знак на протилежний, за винятком радіусних зон.

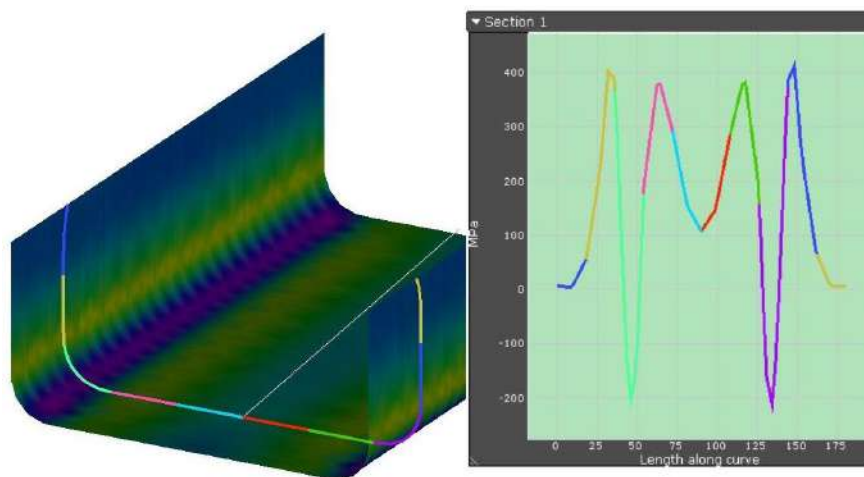


Рисунок 4.15 – Найбільша головна напруга на внутрішньому шарі закритому штампі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

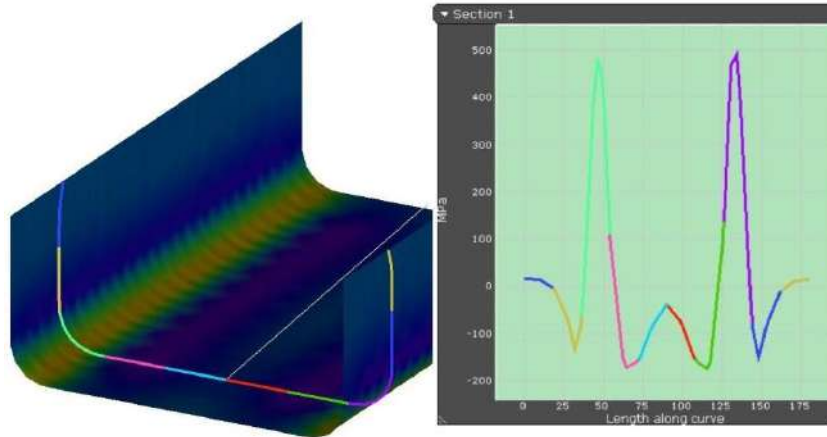


Рисунок 4.16 – Найбільша основна напруга на зовнішньому шарі в закритий штамп.

2. На внутрішньому шарі (рис. 4.17), зовнішньому шарі (рис. 4.18) і середній площині (рис. 4.19) показані найвищі головні напруги після розвантаження. На малюнках видно, що епюра залишкових напруг по всьому шару неоднакова. Це вплине на кінцеву геометрію виробу. Після розвантаження метал жолобиться, як показано на епюрі пружинення, якщо є надлишкова напруження на нижній полиці.

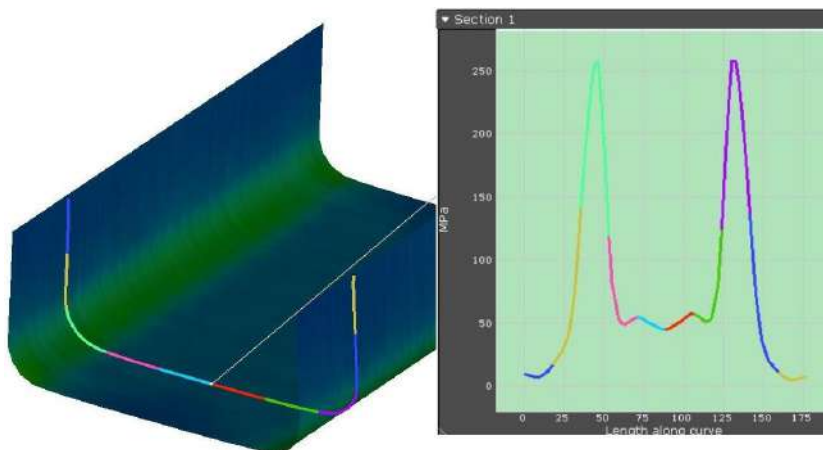


Рисунок 4.17 – Найбільша головна напруга на внутрішньому шарі після розвантаження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

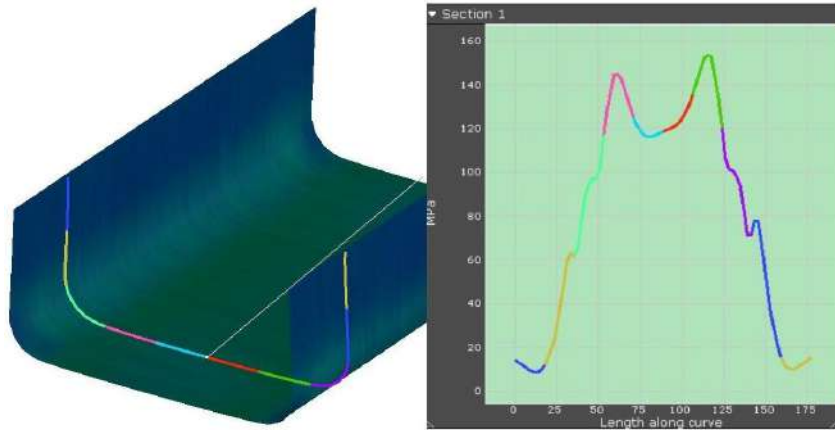


Рисунок 4.18 – Найбільша основна напруга на зовнішньому шарі після розвантаження

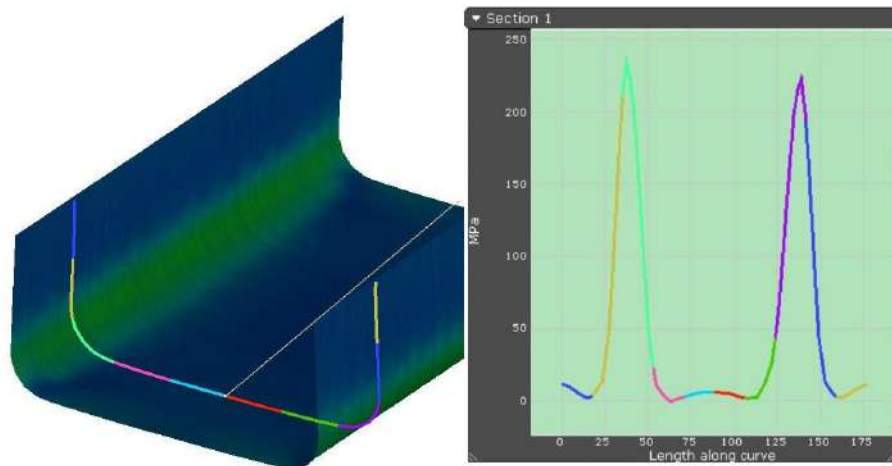


Рисунок 4.19 – Найбільша основна напруга по середній площині після розвантаження

3. Як наслідок цих трьох попередніх результатів отримуємо наступні значення:

1. Рисунок 4.20 показує значення пружинення. Значення пружинення на нижній полиці біля радіусів мають критичні значення, як

показано на рис..

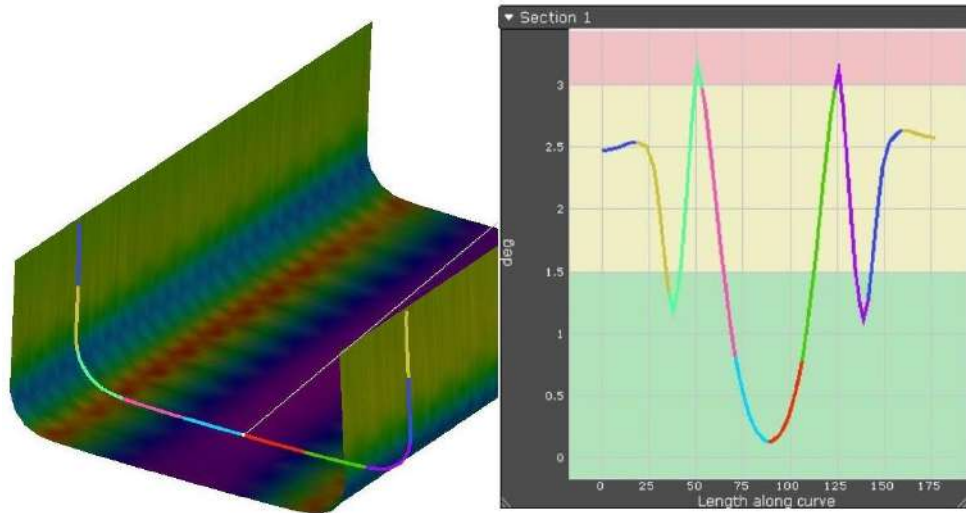


Рисунок 4.20 – Пружинення

2. Поперечний згинальний момент — це показник того, як кривизна, яка залишилася на нижній полиці після зняття навантаження, впливає на поперечний згинальний момент. Це призведе до спотворення плоскої поверхні нижньої полиці, що призведе до того, що форма полиці відрізнятиметься від того, що було заплановано під час проектування.

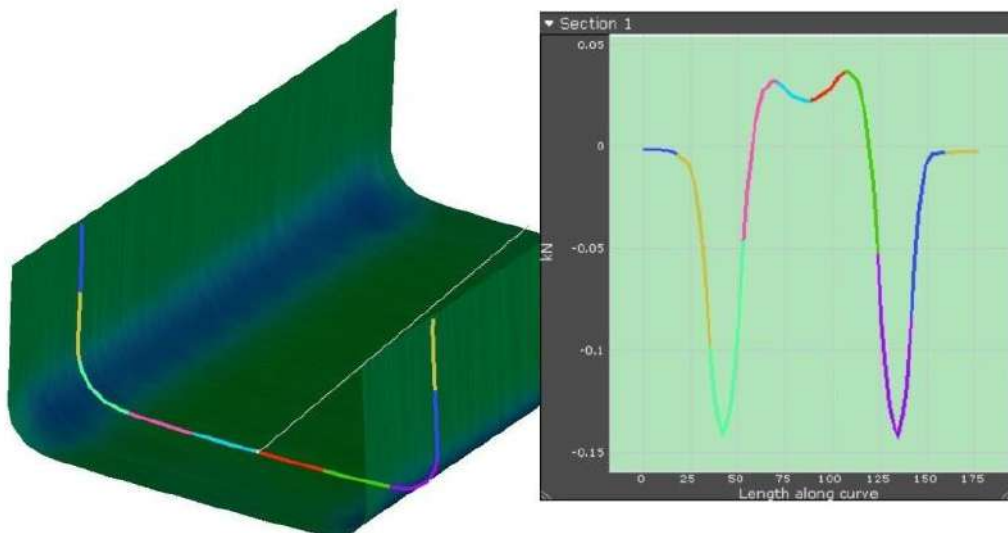


Рисунок 4.21 – Поперечний згинальний момент після розвантаження.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

76

Результати моделювання вказують на те, що штампи повинні використовувати схему із застосуванням виштовхувача, щоб зменшити залишкову напругу на нижній полиці.

#### 4.2 Моделювання штампування та аналіз точності лонжерону при згинанні з виштовхувачем

У цьому розділі єдиною зміною параметрів симуляції є включення в модель симуляції виштовхувача. Це показано на Рисунку 4.23, де матриця прихована, а рух виштовхувача показано жовтою стрілкою. Нижня полиця притискається до плити виштовхувача, як показано на малюнку. Це запобігає вигину нижньої полиці під час пластичної деформації убік, зворотний до основного руху інструменту.

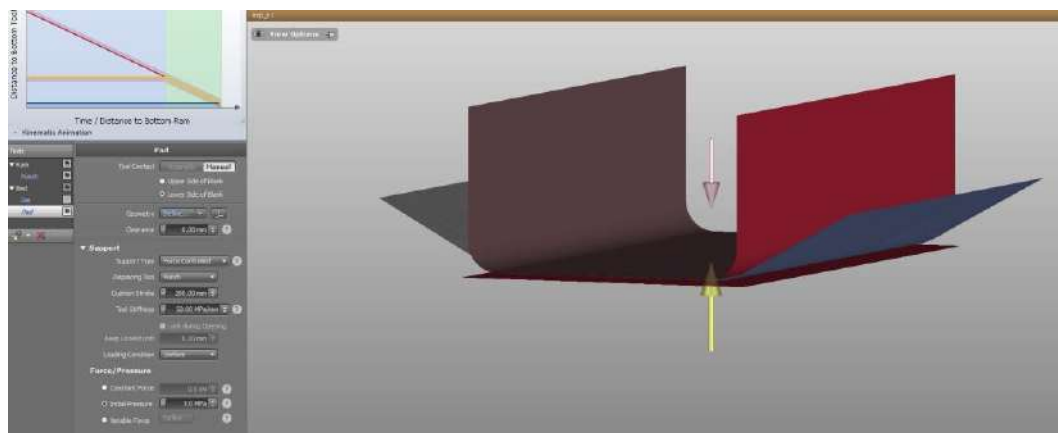


Рисунок 4.23 - Виштовхувач

Після внесення змін були отримані наступні результати:

1. На рисунку 4.24 показано значення найбільшої основної напруги на внутрішньому шарі та по середній площині. Як видно на малюнку,

значення залишкової напруги по всіх шарах однакові та приблизно рівні.

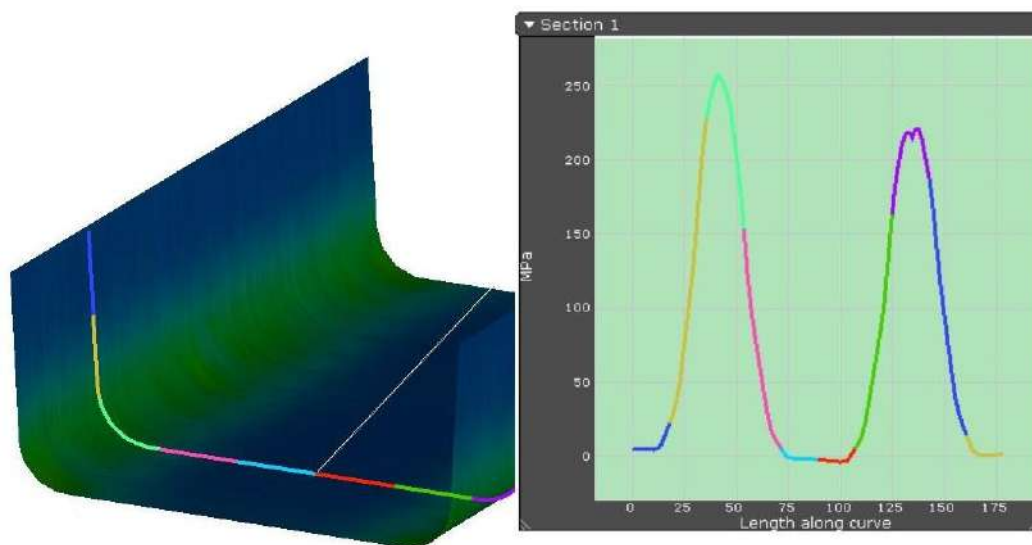


Рисунок 4.24 – Найбільша основна напруга на внутрішньому шарі після розвантаження

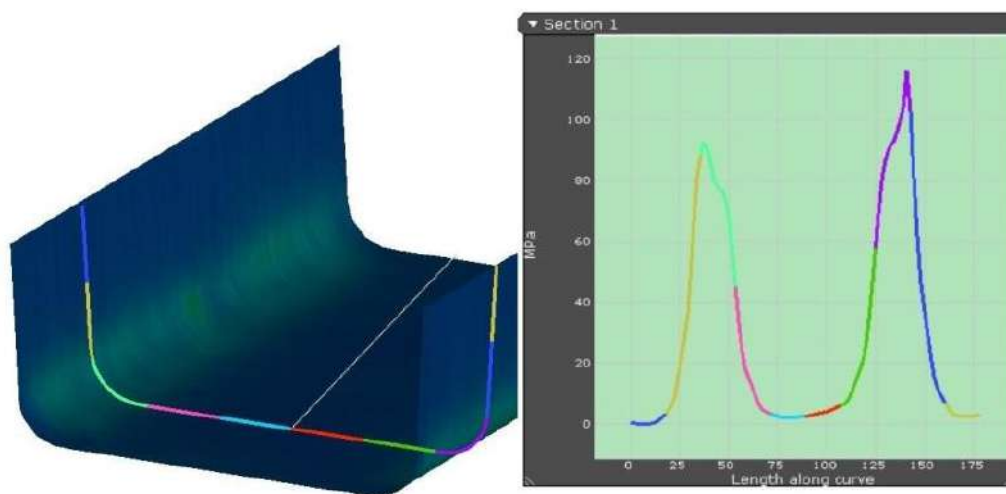


Рисунок 4.25 – Найбільша основна напруга на зовнішньому шарі після розвантаження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

78

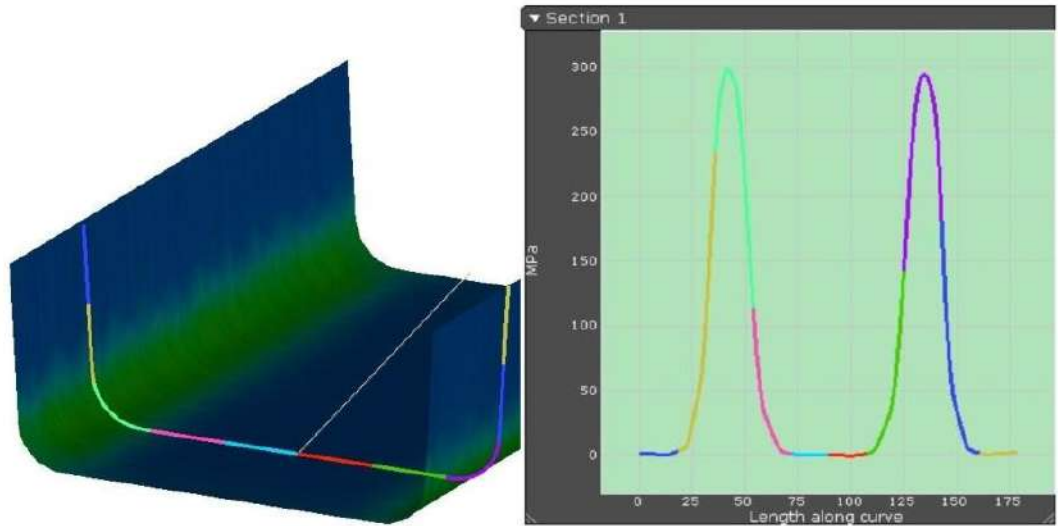


Рисунок 4.26 – Найбільша основна напруга по середній площині після розвантаження

2. Площинність у цьому місці буде близька до форми, заданої конструктором, оскільки значення згинального моменту на нижній полиці наближаються до нуля (рисунок 4.27).

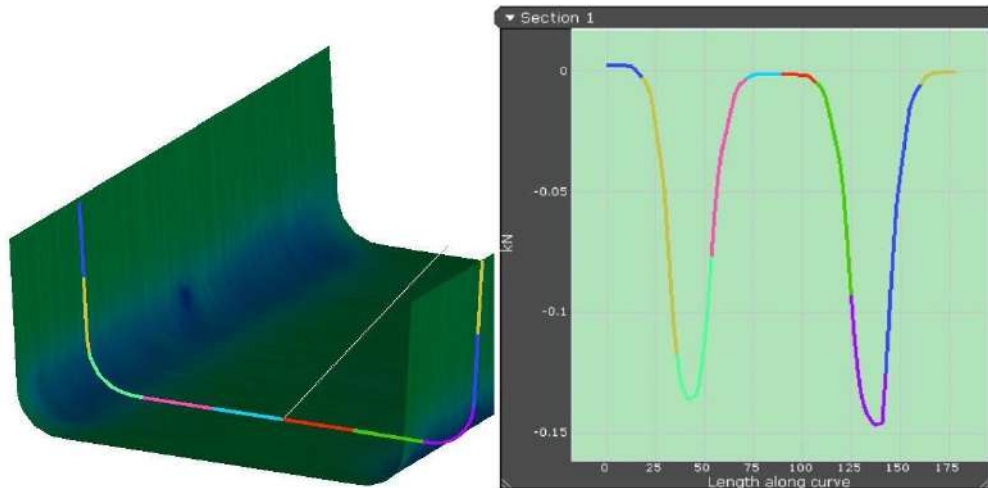


Рисунок 4.27 – Значення поперечно згинального моменту після розвантаження.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

79

3. Значення кутового пружинення на нижній полиці дорівнюють нулю, зменшилося кутове пружинення на бічних полицях.

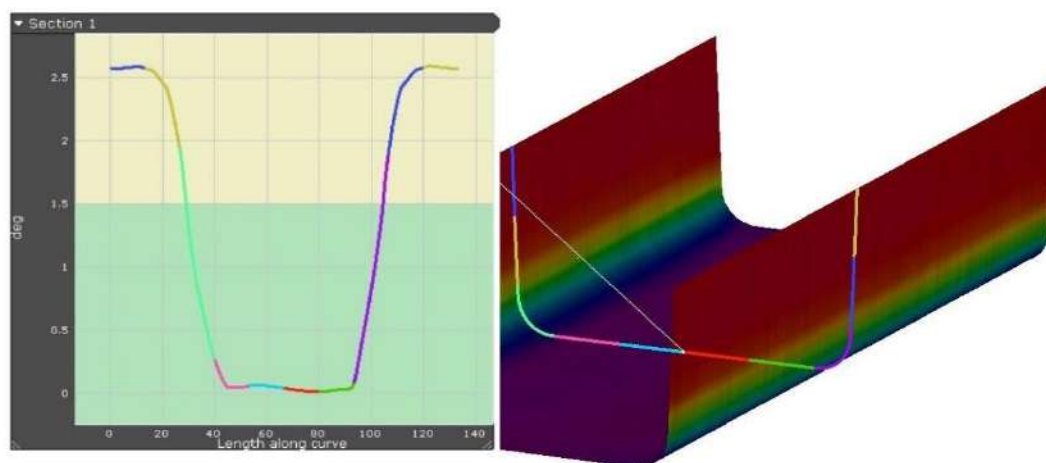


Рисунок 4.28 – Показання кутового пружинення із застосуванням виштовхувача.

Технологічний процес, який використовує виштовхувач нижньої полиці, вимагає оптимізації технологічних параметрів. Наразі можна зробити наступний висновок: аналіз полів напруг показав, що відхилення геометрії лонжерону пов'язане з проявом негативних і позитивних напруг на внутрішніх і зовнішніх шарах. Це призводить до згинального моменту та непередбачуваної форми виробу.

4.3 Моделювання процесу згинання та аналіз точності штампування методом планованого експерименту

4.3.1 Побудова матриці запланованого експерименту для “поліпшеної схеми”

Інженеру доводиться неодноразово вимірювати різні параметри та

навіть вивчати залежність певної величини (функції відгуку) від параметра або фактора. Таким чином, робота інженера включає планування експерименту, вибір методики, приладів і обробка результатів вимірювань.

Завдання детального аналізу складних ситуацій у процесах машинобудування та апаратів складне. Дослідники спрощують моделювання шляхом формалізації своїх уявлень про об'єкт. Моделювання — це метод вивчення систем і об'єктів, при якому експеримент проводиться на моделі, а результати кількісно переносяться на оригінал. Модель допомагає у поясненні, розумінні та вдосконаленні систем і об'єктів. Модель може відображати деякі абстрактні характеристики об'єкта або представляти точну копію об'єкта, навіть якщо вона зроблена з іншого матеріалу та в іншому масштабі.

Модель можна уточнити, вона приблизна та ескізна. Цей процес моделювання має дві основні вимоги:

1. Модель має бути простішою, швидшою, економічнішою та безпечнішою.
2. Досліднику потрібно знати правило розрахунку параметрів оригіналу з урахуванням випробування моделі. Без цього навіть найефективніше дослідження буде марним.

Розробка математичної моделі, яка адекватно описує процес і дозволяє, зрештою, здійснювати його управління, є основною метою проведення сучасного експерименту з позицій виробника продукції. При плануванні експерименту дослідник повинен:

- 1) Гарантувати, що результати дослідження є надійними та зрозумілими;
- 2) Створити чітку та послідовну логічну схему, яка описує, що, коли і як потрібно робити;
- 3) Максимально формалізувати процес розробки моделі та зіставлення

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

експериментальних даних різних досліджень, що стосуються одного і того ж об'єкта дослідження, щоб забезпечити широке використання ЕОМ.

Статистичні методи планування експерименту відповідають всім перерахованим вимогам. При використанні статистичних методів планування експерименту математичний опис подається у формі полінома, де  $Y$  – функція відгуку, а  $1, 2, 3, \dots, xxx$  – фактори (аргументи) досліджуваного процесу. У разі плану експерименту визначає, де знаходяться точки експерименту в  $k$ -мерному факторному просторі. У більшості випадків план розглядається як матриця планування, у якій кожен рядок містить умови досвіду, а кожен стовпець містить значення керованих і контрольованих параметрів досліджуваного процесу, тобто значення факторів, які відповідають умовам досвіду. У більшості сучасних процесів є велика кількість різних факторів, які впливають на процес. Все різноманіття параметрів (факторів), що діють на вході процесу, можна розділити на групи, представивши процес у вигляді «чорної скриньки» (рис. 1.1).

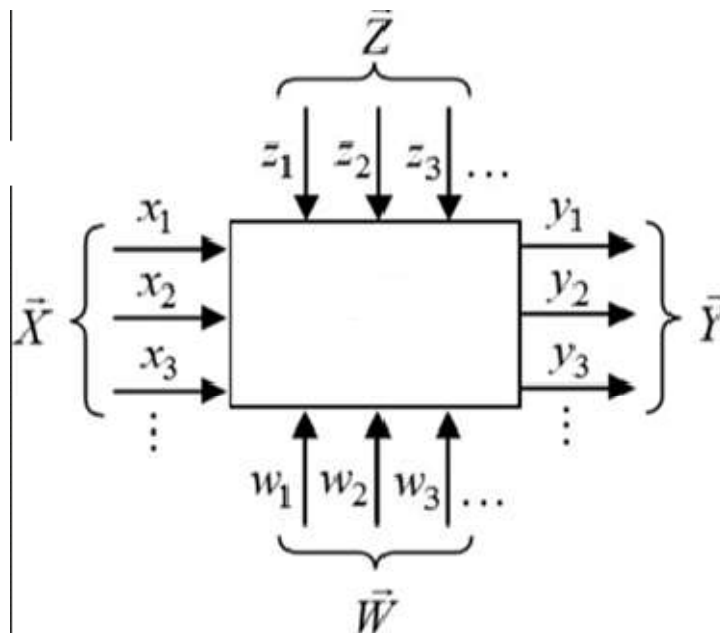


Рисунок 4.29 – Схема складного процесу

Функція вхідних параметрів є вектором відгуку  $Y$ . р Перша група складається з  $k$ -мірного вектора  $X$  керованих параметрів, тобто параметрів, які можна виміряти та змінювати.

Вектор  $W$  контрольованих, але некерованих параметрів утворюється другою групою. Ці параметри відображають стан функцій відгуку на операції, які передують досліджуваному процесу, наприклад, чистоту вихідного кремнію та алюмінію, які використовуються під час виготовлення ІВ.

Вектор  $Z$  містить некеровані та неконтрольовані вхідні параметри, що становить третю групу вхідних параметрів. Сюди входять параметри, які можуть випадково впливати на обурювальний процес.

Процес планування експерименту починається з вибору центру плану, тобто місця, де всі фактори, які використовуються в експерименті, мають своє початкове значення. Далі серія планованих дослідів відбувається навколо цього центру. Очевидно, що початкове значення функції відгуку  $Y_0$  відповідатиме початковим значенням факторів. Центр плану зазвичай вибирається на основі попередніх даних процесу. Якщо їх немає, то яким чином визначається центр досліджуваної області як центр плану?

Значення кожного фактора відрізняються від свого початкового значення на величину інтервалу  $\Delta X$ . Вибір оптимальної величини  $\Delta X$  є однією з найважливіших попередніх умов успішного експерименту з метою розробки математичної моделі.

На основі інформації, наведеної в попередньому розділі, були вжиті наступні дії:

1. Вибрано основні параметри, шляхом аналізу епюр напружено-деформованого стану (НДС)
  1. Поданий процес у вигляді “чорної скриньки”
  2. Складання повно факторного експерименту:

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

- o Складання матриці планованого експерименту
- o Визначено центр плану
- o Визначено оптимальні значення  $\Delta X$

При підготовці лабораторних і промислових експериментів вибір параметрів оптимізації та факторів є дуже важливим етапом. Якщо питання про цілі чи призначення дослідження добре опрацьовано, це завдання майже очевидне. Складно визначити, які фактори викликають спостерігаються ефекти та які з них необхідно маніпулювати, щоб досягти бажаних результатів. Дослідники стикаються з такою протилежністю: хтось прагне отримати якомога точнішу модель, а хтось прагне зробити модель якомога простішою, щоб зробити формулювання простішим і підвищити ефективність моделювання. Таким чином, реальні системи та об'єкти можна спрощувати, але лише тоді, коли це призводить до значної втрати точності. Знайти правильний баланс є важливим. Тут слід покладатися на розум, досвід і здоровий глузд тих, хто добре знайомий із системою. На початкових етапах дослідження багато дослідників схильні брати до уваги надто багато факторів і параметрів оптимізації. Багато авторів стверджують, що в цьому випадку ступінь розуміння явища обернено пропорційний кількості змінних, описаних у описі. Однак без чіткого обґрунтування дослідники не повинні передбачати, що вони не розглядають жодну змінну. Перш ніж визначити, які фактори та параметри оптимізації включити до досліджуваної моделі, необхідно визначити їхні функціональні зв'язки та значення параметрів.

На основі інженерного аналізу, проведеного раніше, були отримані епюри ПДВ. Крім того, дослідження літератури виявило різні способи компенсації пружинення, включаючи зміни конструкції та зміни технологічного процесу. Такі висновки були зроблені через це:

- При двохкутному згинанні, як у нашому випадку, радіус, також

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

відомий як радіус пуансону, є основним конструктивним елементом, який піддається деформації. Основною зоною пластичної деформації є радіусна частина, як показано на моделі ПДВ.

- Характер поведінки виробу після розвантаження також залежить від ширини матриці, а також від ширини нижньої полиці деталі.

- Радіус матриці також впливає на протяг металу під час штампування. Саме в цьому місці метал починає деформуватися.

- Оскільки висота полиці та довжина деталі мають значний розкид, керувати такими параметрами недоцільно.

Враховуйте також вплив мастила та зазору. Вони були обрані для збереження:

- Зазор склав  $(1-1,1) S$  від товщини металу, оскільки при цих початкових умовах він оптимальний.

- Мастило визначено значенням коефіцієнта тертя 0.15.

Цьому коефіцієнту тертя відповідає консерваційне мастило.

Для факторів впливу необхідно виконати наступні вимоги:

1. Керівник Це означає, що дослідник може контролювати фактор, підтримуючи його протягом процесу.

2. Точність вимірювання факторів має збільшитися.

3. Схожість. Керувати фактором, який залежить від інших факторів, важко.

4. Вони повинні бути незалежними та спільними за наявності багатьох факторів. Поєднання цих факторів можливо і безпечно. Незалежність дозволяє встановити фактор на будь-якому рівні, незалежно від рівнів інших факторів.

Ураховуючи створену раніше «чорну скриньку», можна визначити такі параметри: радіус пуансону, радіус матриці та ширину матриці.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

Контрольовані, але некеровані параметри:

- Висота стінок
- Змащення До неконтрольованих і некерованих параметрів:
- Зазор

№ опыта	В-ширина матрицы		Rm-радиус матрицы		Rp-радиус пуансона		Hp-рабочий ход		Y	
	80	110	10	14	6	12	H	H/2	стенки	дно
1	1		1		1		1		1,60	1,8
2		1	1		1		1		4	0,3
3		1		1	1		1		4,5	0,3
4		1		1		1	1		2	3,7
5		1		1	1		1		3,8	2,6
6	1		1			1	1		1,7	2,4
7	1			1		1	1		1,4	2
8	1			1	1		1		2	1,5
9	1			1	1			1	0,3	2,70
10	1		1		1			1	1,7	1
11	1			1		1		1	1,4	2
12	1		1			1		1	1,5	2
13		1	1		1			1	2,5	3
14		1		1	1			1	3,4	3,4
15		1	1			1		1	3	2,7
16		1		1	1			1	2	2

Рисунок 4.30 – Матриця експерименту, що планується.

Microsoft Excel може аналізувати дані таблиці, щоб отримати функцію відгуку для цього експерименту.

Багатофакторний аналіз дозволяє оцінити вплив багатьох факторів на залежну змінну. Проведення багатофакторного аналізу вимагає виконання наступних кроків:

1. Зробіть висновки дослідження в Microsoft Excel.
2. Перейдіть до вкладки Дані та виберіть «Аналіз даних» і виберіть «Двофакторний дисперсійний аналіз».
3. Виберіть вхідний інтервал, як показано на малюнку 4.31.

№ опыта	В-ширина матрицы		Rm-радиус матрицы		Rp-радиус пуансона		Hr-рабочий ход		У	
	80	110	10	14	6	12	47	23,5	стенки	дно
1	1		1		1		1		1,6	1,8
2		1	1		1		1		4	0,3
3		1		1	1		1		4,5	0,3
4		1		1		1	1		2	3,7
5		1		1	1		1		3,8	2,6
6	1		1			1	1		1,7	2,4
7	1			1		1	1		1,4	2
8	1			1	1		1		1,9	1,5
9	1			1	1			1	0,3	2,2
10	1		1		1			1	1,7	1
11	1			1		1		1	1,4	2
12	1		1			1		1	1,5	2
13		1	1		1			1	2,5	3
14		1		1	1			1	3,4	3,4
15		1	1			1		1	3	2,7
16		1		1	1			1	2	2
17										
18										
19										

Рисунок 4.31 – Вхідний інтервал для аналізу

1. У створеному аркуші ми побачимо результати аналізу.

Двухфакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	4	87	21,75	1048,25		
Строка 2	4	111	27,75	1964,25		
Строка 3	4	115	28,75	1920,92		
Строка 4	4	121	30,25	1838,92		
Строка 5	4	115	28,75	1920,92		
Строка 6	4	93	23,25	994,25		
Строка 7	4	97	24,25	962,917		
Строка 8	4	91	22,75	1020,92		
Строка 9	4	90,5	22,625	1028,23		
Строка 10	4	86,5	21,625	1055,23		
Строка 11	4	96,5	24,125	970,729		
Строка 12	4	92,5	23,125	1001,73		
Строка 13	4	110,5	27,625	1973,23		
Строка 14	4	114,5	28,625	1930,23		
Строка 15	4	116,5	29,125	1895,73		
Строка 16	4	114,5	28,625	1930,23		
Столбец 1	16	1312	82	153,6		
Столбец 2	16	196	12,25	4,2		
Столбец 3	16	132	8,25	9		
Столбец 4	16	564	35,25	45,3		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Строки	573,75	15	38,25	0,89219	0,577209371	1,894874695
Столбцы	68440,8	3	22813,6	532,13	3,84525E-35	2,811543506
Погрешность	1929,25	45	42,8722			
Итого	70943,8	63				

Рисунок 4.32 – Двофакторний дисперсійний аналіз.

## Висновки:

1. Хоча параметр ширини матриці є конструктивним параметром і не може бути змінений під час аналізу, можна зробити висновок, що на нього найбільше впливає рівняння фіксації відгуку.
2. Результати дослідження показують, що величина робочого ходу має значний вплив на пружинення; це параметр технологічний і може змінюватися під час виробництва.
3. Коли глибина робочого ходу зменшується, кутове пружинення на стінках П-подібного профілю зменшується.
4. Для компенсації кутового пружинення після розвантаження на дні виробу необхідно використовувати схему з виштовхувачем нижньої полиці.

### 4.3.2 Побудова матриці запланованого експерименту для “поліпшеної схеми”

Необхідно створити однофакторну матрицю планованого експерименту, щоб дослідити вплив зміни величини робочого ходу пуансону на прояв кутового пружинення стін П-подібного профілю. Це буде зроблено, щоб знайти ідеальне значення величини робочого ходу інструменту.

Рисунок 4.31 показує матрицю планованого експерименту. У цьому експерименті були встановлені наступні умови:

1. Було обрано модель номер два.
2. Висота стін П-подібного профілю  $z$  є показником зміни величини робочого ходу.
3. Схема з плитою виштовхувача використовується в симуляції, щоб зменшити вплив величини залишкових напруг нижньої полиці на поведінку стінок П-образного профілю після розвантаження.
4. Матеріали та інші параметри процесу залишилися такими ж, як у

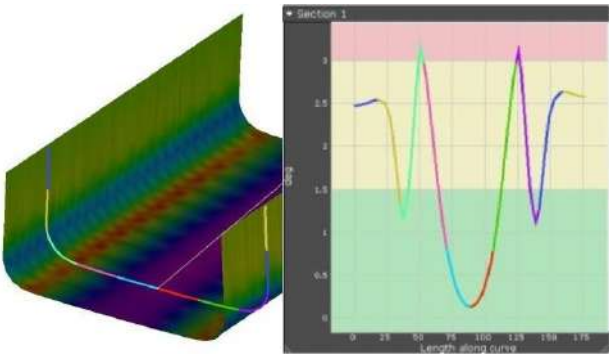
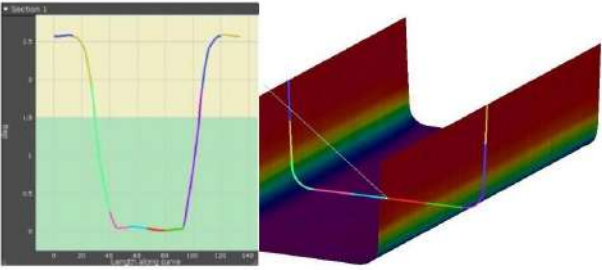
					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

експерименті, описаному в підрозділі 4.1.

Величина робочого ходу относительно высоты полки, %	Значения пружинения стенок, градусы
40	2,50
50	1,60
60	1,80
70	1,80
80	2,00
90	2,00
100	2,20

Рисунок 4.31 – Матриця для однофакторного експерименту

Таблиця 3 – Порівняння кутового пружинення вільної згинання із запропонованими поліпшеними схемами.

Назва схеми	Результати	Показники пружинення
Вільне згинання		2,5°
Згинання з виштовхувачем		2,5°

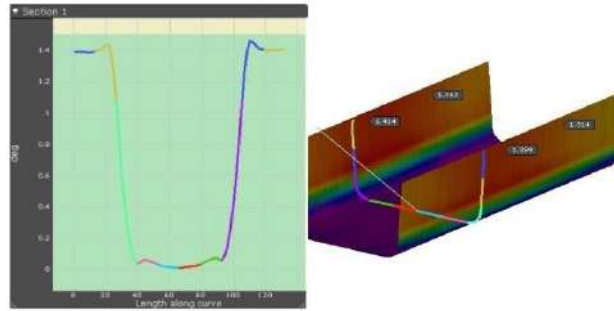
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ

Арк.

89

“Оптимізувати  
нове” згинання



1,6

#### Висновки:

1. Величина робочого ходу пуансона повинна становити від 40 до 50 відсотків від висоти полиць П-образного профілю.
2. Схема «оптимізованого» згинання зменшила кутове пружинення на нижній полиці після розвантаження та зменшила пружинення на стінку П-подібного профілю.

Проведений експеримент продемонстрував основні елементи, які впливають на кут пружинення стінок образного профілю. До них належать: згинальний момент нижньої полиці під час деформації, глибина робочого ходу інструменту, радіус і ширина матриці.

Знайшли найкращі значення факторів п-подібної згинання, які гарантують найменший кутовий пружинець стін п-профільних стін.

Чисельні експерименти показали, що однорідність напруг і деформацій у нижній полиці забезпечується зміною напружено-деформованого стану плити виштовхувача на напружено-деформований стан вільної п-подібної згинання. Як наслідок, кут пружинення вертикальних стінок зменшується.

Оптимальний захід пуансона при п-подібному згинанні становить 40–50% висоти вертикальних стінок на основі мінімізації кута пружинення.

Методи чисельного моделювання та проектування процесів п-подібного згинання лонжеронів легкових автомобілів із важкодеформованих матеріалів.

## Висновок

1. Аналіз літературних джерел дозволив визначити конструкцію, фізико-механічні властивості, технології виробництва та зовнішній вигляд, якість, економічність і безпеку пасажирів лонжеронів легкових автомобілів.

2. Точність виготовлення лонжеронів за допомогою листового штампування була визначена процесом пружинення після розвантаження.

3. У процесі чисельних експериментів було виявлено, що використання плити виштовхувача для зміни напружено-деформованого стану порівняно з напружено-деформованим станом вільної п-подібної згинання дозволяє забезпечити однорідність напруг і деформацій у нижній полиці. Як наслідок, після зняття зовнішніх навантажень кут пружинення вертикальних стінок зменшується.

4. Оптимальний захід пуансона при п-подібному згинанні становить 40–50% висоти вертикальних стінок на основі мінімізації кута пружинення.

5. На основі двофакторного планованого експерименту розроблено метод проектування процесу п-подібного згинання лонжеронів із важкодеформованих матеріалів у САПР.

6. Існує метод, який може аналізувати напружено-деформований стан за семи шарами та створювати епюри напруг.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

## Список використаних джерел

1. Дж. Лайкер. Дао Toyota: 14 принципів менеджменту провідної компанії світу/Джеффри Лайкер; Пров. з англ. - К.: Видавництво. гурт «Точка», 2019 — 400 с.
2. В. Г. Бурдуковський. Технологія листового штампування: навчальний посібник / В. Г. Бурдуковський. - Харків, 2019. - 224 с.
3. Burchitz IA Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming [Text] / IA Burchitz. - Rotterdam Institute for Metal Research, 2008 - 156p.
4. П.С. Гончарів. NX Advanced Simulation. Інженерний аналіз/ Гончаров П.С., Артамонов І.А., Халітов Т.Ф., Денисіхін С.В., Сотников Д.Є.; ДМК Прес, 2012. — 504с.
5. Keeler S. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0 [Text] / Keeler SMKimchi, J. Mconey P. - WorldAutoSteel 2017. - 300 p.
6. Balon P., Springback Compensation в Cold Forming Process for High Strength Steel [Text] / P. Balon. A. Swlatoniowski // Archives of Metallurgy and materials.- 2016. PP2471-2478.
7. Ю.А. Аверкієв. Технологія холодного штампування / Аверкієв Ю.А., Аверкієв А.Ю. - Л.: Машинобудування, 1989. - 304 с.
8. О.М. Малов, Технологія холодного штампування. / Малов О.М. - Л.: Машинобудування, 1969, 568 с.
9. Біргер І. А., Мавлютов Р. Р. Опір матеріалів: Навчальний посібник. - К.: Наука. Гол. ред. фіз.-мат. літ., 1986. - 560 с.
10. Охріменко Я.М. Технологія ковальсько-штампувального виробництва. - К.: Машинобудування, 1976. - 560 с.
11. Аміров Ю. Д. Технологічність конструкції виробу: Довідник / Ю.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

Д. Аміров, Т. К. Алфьорова, П. Н. Волков та ін; - Київ, машинобудування, 1990 - 768с. ISBN 5-217-01121-1

12. Косілова А. Г. Довідник технолога-машинобудівника. У двох томах. Том 1. / А. Г. Косілова, Р. К. Мещеряков. - Київ: Машинобудування, 1972 - 694 с.

13. Данилов Ю.В., Артамонов В.А. Практичне використання NX. К.: ДМК Прес, 2011. - 332 с.

14. Єршов В.І., Удосконалення формозмінювальних операцій листового штампування / В.І. Єршов, В.Ш. Глазков, М.Ф. Каширін.: К: Машинобудування; .1990 — 312'с.

15. Єршов В.І, Листове штампування. Розрахунок технологічних параметрів/ В.І. Єршов, А.С. Чумадін. Довідник - К.: Видавництво МАІ, 1999. 516 с.

16. Попов Є.А., Технологія та автоматизація листового штампування / Є.А. Попов, В.Г. Ковальов, І.М. Шубін. Підручник для вишів. К.: Видавництво ІДТУ ім. н.е. Баумана, 2003. — 480 с.

17. Попов Є.А. Основи теорії листового штампування. К., "Машинобудування", 1977.-278 с.

					<i>КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ</i>	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

					КвРМТВА 26 22148. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94