

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ

Технологія виготовлення деталей із листової сталі є важливою галуззю промисловості, яка забезпечує виробництво різноманітних виробів починаючи від скриньок і закінчуючи автомобілями та будівельною технікою. Але перед початком виготовлення деталей передує процес розробки або моделювання окремих деталей та вузлів в цілому. Для забезпечення випуску якісної продукції із листової сталі необхідно ще на етапі розробки в модель закладати технологічні аспекти виготовлення. Тому викладання та вивчення даної теми має бути комбінованим з розкриттям можливостей САД-систем та технологій виготовлення.

У роботі представлені технологія виготовлення деталей із листової сталі, яка базується на найбільш розповсюдженому устаткуванні, а саме на станках лазерного різання і координатно-пробивних пресах за допомогою яких отримують розгортку деталі із листа металу. Вертикально-згинальні преси і сегментні згинальні станки, які виконують згинання заготовки (розгортки) і надають фінальну форму деталі.

Вказано про необхідний параметр налаштування файлу листового металу, який можна виразити коефіцієнтом К-фактор, і у навчальних цілях його рекомендовано прийняти рівним $K=0,44$.

Дано рекомендації про використання найбільш відповідного обладнання і інструменту для реалізації конкретної задачі. Наведена таблиця з найбільш використовуваним інструментом для станків КПП. Зазначені мінімально-можливі технологічно обґрунтовані елементи листової деталі, які необхідно забезпечити для реалізації процесу згинання на етапі розробки.

Наведені переваги і недоліки кожного із методів обробки листового металу у проекціюванні на відповідне обладнання, а також випадки у яких раціонально використовувати це обладнання. Згадані найбільш розповсюджені формати листової сталі, на які слід орієнтуватись при проектуванні деталей із розрахунку розміщення на них розгортки деталі.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, виробництво, координатно-пробивний прес, лазер, згинання, листовий метал, матриця, пуансон, технологія виготовлення

Постановка проблеми. У процесі вивчення такого інструменту, як Листовий метал у програмах Autodesk Inventor, SolidWorks і т. д. слід акцентувати увагу не тільки на можливості програми реалізувати конструкторську задачу, а і на технологію виготовлення, за якою буде дана деталь із листової сталі втілюватись у життя. Це пов'язано з тим, що можливості програми є розлогими, які необхідно адаптувати під певні технологічні умови. Тобто проектувати деталь таким чином, щоб її можна було виготовити в заданих виробничих можливостях. Таким чином викладання даної теми студентам повинно супроводжуватись виключно з інформацією про технологію виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деталі зокрема і вузли в цілому із листової сталі здебільшого зустрічаються у електротехнічних, телекомунікаційних виробках (у вигляді шаф, щитів і т. д.) у автомобілебудуванні (штамповані корпуси автомобілів), у будівництві та різній будівельній техніці [1] у ролі, як основних деталей і вузлів, так і у ролі допоміжних елементів. Окрім галузей, де застосовуються вироби із листової сталі з певними вимогами до їх якості, особливостей конструювання і т. д, також слід враховувати ряд параметрів очевидних, напівочевидних і неочевидних, які взагалі впливають на саму можливість процесу виготовлення [2 – 4].

Неврахування цілого ряду факторів і параметрів технологічного процесу при конструюванні деталей породжує ситуацію, коли у програмному продукті вдається реалізувати певну геометрію деталі, а у виробничих умовах ні, що призводить до цілого ланцюга невідповідності. Починаючи від неможливості виготовлення окремої деталі і, відповідно, складання вузла та закінчуючи переглядом технічного рішення виробу на етапі виготовлення, що в цілому викликає додаткові витрати на усунення браку окремої деталі.

Формування цілей статті. На основі вищевикладеного матеріалу виникає потреба у процесі навчання студентів технічного напрямку, а саме інженерів-конструкторів, подавати інформацію про інструмент «Листовий метал» у комплексі з технологією виготовлення. Для освітлення цієї теми слід передбачити більше аудиторного часу і самостійного вивчення студентами даного матеріалу.

Основна частина. Найпершим кроком у проектуванні деталей з листової сталі слід розуміти на якому форматі листа вона буде виготовлятися. Найбільш розповсюдженими форматами листової сталі є такі 1000*2000 мм; 1250*2500 мм і 1500 на 3000 мм, що відповідає ДСТУ 8540 і ДСТУ 8971. Тобто розгортка деталі має вміщуватись у розміри відповідного

листа за умови технологічного зазору у 10-15 мм по периметру листа сталі. Під дані формати листа орієнтовані робочі площини більшості станків.

Здебільшого для різання листового металу при виготовленні різноманітних конструкцій використовують верстати з лазерного різання чи координатно-пробивні преси (КПП), або комбіновані верстати де поєднані ці два принципи обробки. Наявність на підприємстві по обробці листового металу такого комбінованого комплексу є скоріш виняток а ніж закономірність у зв'язку з його суттєвою вартістю. Тому обробку листового металу на лазерному станку і на КПП розглянемо окремо, а у випадку використання комбінованих станків ці принципи екстраполюються на відповідний верстат.

Слід зазначити, що існують станки плазменного різання, які виконують різання кромки металу з нижчою якістю і здебільшого застосовуються для різання заготовок які у подальшому підлягають більш точній обробці. Станки плазменного різання працюють за таким самим принципом як і станки лазерного різання.

Суть технології *лазерного різання* полягає у тепловому впливі вимушеного випромінювання вузької спрямованості, тобто лазерного променя, на матеріал обробки. Процес схожий на механічне різання, але замість ріжучого інструменту застосовують лазер в результаті чого майже немає відходів. Технологія енерговитратна, тому використовується переважно для розкрою тонких листів металу. Обробка листової сталі більшої товщини супроводжується розігріванням до температури плавлення, для полегшення різання в зону обробки подають газ. Найчастіше – кисень, також використовують аргон, азот, гелій, повітря. Газ необхідний для підтримки горіння, видалення продуктів згорання і охолодження зони різання.

Переваги лазерного різання:

- Обробка листів сталі різної товщини від 0,2 до 30 мм.
- Високошвидкісна обробка з точністю до $\pm 0,05$ мм.
- Створення виробів зі складними контурами (фігурне або художнє різання рис. 1).
- Щільна розкладка та різання з чистими кромками без відходів – економія матеріалу.
- Мінімальна механічна обробка деталей або її повна відсутність завдяки акуратному різі.
- Простота налаштування лазерного верстата: достатньо створити зображення деталі та завантажити в керуючу програму на ПК.
- Висока ефективність при використанні у виробництві малих партій, коли недоцільно створювати форми для пресування чи лиття.

Недоліки:

- Неможливість виконання рельєфного формування «пуклівки» рис 2а.

- Неєфективність виконання перфорації рис 2б за рахунок тривалого процесу врізу лазерного променя в метал.



Декоративна панель



Журнальний столик



Довільні форми заготовок

Рис. 1 Приклади художнього різання на лазерних станках

Суть обробки листового металу на *координатно-пробивному пресі (КПП)* полягає у холодному штампуванні який реалізується на відповідних станках. Координатне пробивання металу при спозиційованому листі відбувається наступним чином. Спочатку спеціальне притискне кільце на верхній частині пробивного інструменту притискає лист до матриці (нижньої частини пробивного інструменту). Далі пуансон із певним зусиллям (до 50 тон) б'є по листу (товщиною до 6 мм), пробиваючи його. Потім пуансон під впливом потужних зворотних пружин повертається у вихідне положення, притискне кільце відпускає лист, який відразу змінює своє розташування для реалізації наступної операції.

Переваги КПП:

- Під час серійного випуску забезпечується висока швидкість обробки деталей. Устаткування точно слідує встановленому оператором алгоритму і визначає координати, якими пробиватимуться отвори.

- На продуктивність верстата не впливають форма чи габарити отворів. У даному разі довжина різку не зменшує ефективність операції. Удар пуансона забезпечує одномоментну пробивку всього контуру отвору.

- У процесі обробки на метал не виконується термічного впливу, що забезпечує економію електроенергії та виключає можливість деформації металу, яка виникає внаслідок перегріву.

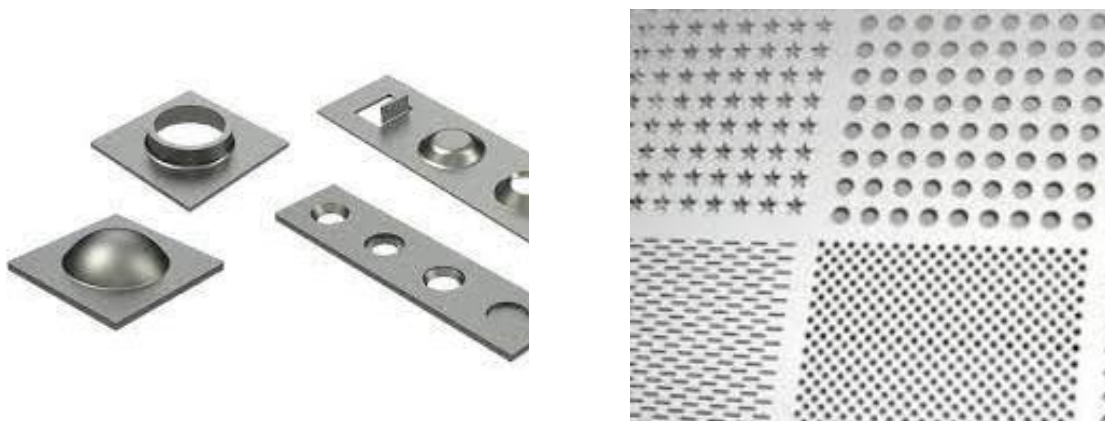
- Координатне пробивання металу дозволяє здійснювати обробку з високою точністю та продуктивністю. Точність може досягати $\pm 0,05$ мм. У порівнянні з лазерним різанням на деталях певної складності пробивні машини здатні досягати більш ніж десятикратної продуктивності.

- Створення перфорованих виробів, або виробів з рельєфним формуванням «пуклівка» рис. 2.

Недоліки:

- Під кожен форму отвору або товщину металу необхідний відповідний інструмент.

- Неможливість виконувати вироби зі складними контурами (фігурне або художнє різання рис. 1).



а) пуклівка

б) перфорація

Рис. 2 Приклади виконання пуклівки та перфорації на КПП

Особливими відмінностями застосування обладнання, які треба враховувати при конструюванні деталей, між лазерними і КПП верстатами є неможливість створення рельєфного формування «пукльовок» на лазерному обладнанні. В той час суттєвим обмеження для КПП є різання листового матеріалу по складній траєкторії у вигляді сплайну, або з переходом одних спряжень певного радіусу у інші. Тобто виконання художнього вирізання з листа металу на верстатах КПП неможливе.

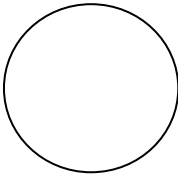



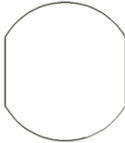

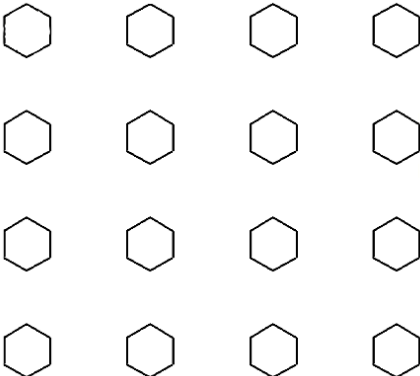
Слід зазначити, що обладнання КПП використовує інструмент для створення отворів у листі у вигляді кола, квадрата, прямокутника, пазоподібної форми і т. д, або спеціальних пукльовочних форм. Приклади деяких інструментів наведені у табл. 1.

Фінальним етапом створення деталі з листової сталі є **згинання** заготовки – розгортки до проектних розмірів. Для цієї операції використовують здебільшого два типи станків сегментний згинальний станок або вертикально-згинальний прес.

Сегментний згинальний станок використовується здебільшого для виготовлення простих форм схожих на профіль профнастила. Також по такому принципу побудовані більшість ручних станків, які найчастіше використовуються у обробці оцинкованої листової сталі для створення різного роду елементів вентиляційної системи, елементів дахового покриття тощо.

Основним робочим органом сегментного згинального станка виступає поворотна балка, або фартух. Допоміжну, але від цього не менш важливу роль відіграє механізм фіксації листа в верстаті: притискна плита та притиск. В даному випадку одне крило згину нерухомо фіксується в притискному механізмі, а друге крило згину під впливом повороту балки загинається в потрібному напрямку.

Інструмент для КПП

Форма	Позначення	Рисунок
Круг	RD 2,5	
	RD 4,5	
	RD 6,2	
	RD 16	
	RD 38	
	...	
Квадрат	SQ 5	
	SQ 7	
	SQ 9,5	
	SQ 22	
	...	
Прямокутник	RE 5x2,5	
	RE 10x5	
	RE 12x2,5	
	RE 50x5	
	RE 80x5	
	...	
Овал	OB 10x5	
	OB 10,3x6,8	
	...	
Отвір під установку замка	DD 19,5x17	
	...	
Замкова щілина	FT 25x5	
	...	
Кластер	CLUSTER	
	...	

Здебільшого на виробництві з обробки листової сталі використовують вертикально-згинальні преси, які є більш універсальними і дозволяють

виконувати згинання деталей складної форми. На даному типі станків зупинимось більш детально.

На таких верстатах процес згинання здійснюється натисканням робочого органу пуансона на лист металу з вдавненням в розташовану нижче матрицю рис 3.

Існують два основних методи згинання:

Вільне згинання – це коли між листом металу і стінками V-подібної матриці існує повітряний зазор рис. 4. На сьогодні це найпоширеніший метод.

Калібрування – це коли лист металу повністю притиснутий до стінок V-подібної матриці рис. 5.

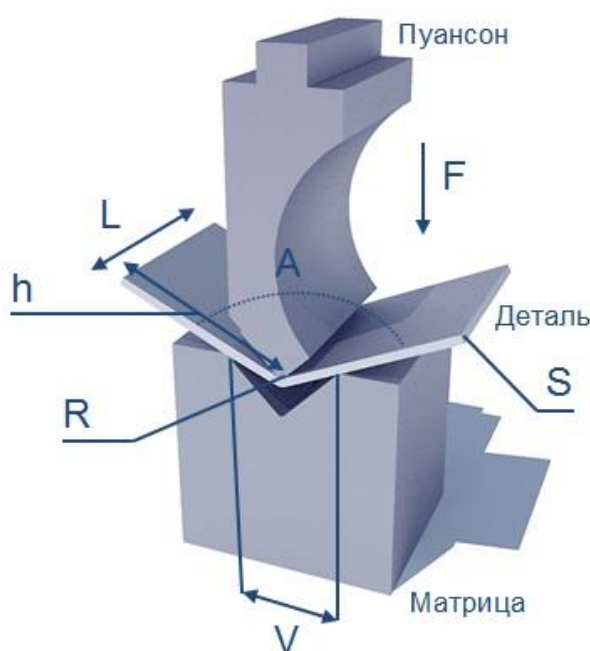


Рис. 3 Ілюстрація процесу згинання деталі

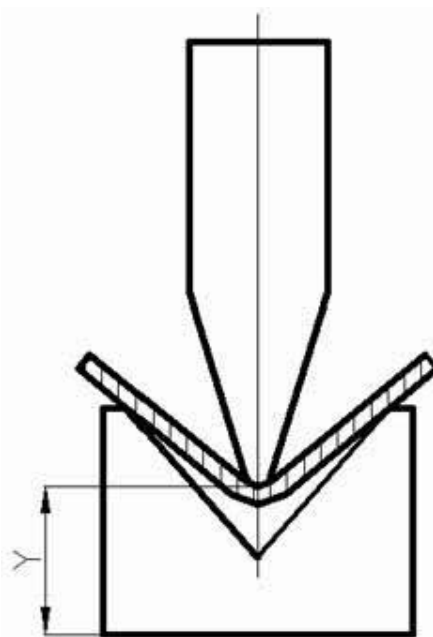


Рис. 4 Метод вільного згинання

Процес вільного згинання відбувається за допомогою вдавлювання пуансоном листа металу на вибрану глибину по осі Y в канавку матриці. Лист залишається "в повітрі" і не контактує зі стінками матриці. Це означає, що кут згинання визначається положенням осі Y, а не геометрією інструменту згинання.

До переваг методу вільного згинання можна віднести:

- Висока гнучкість: без зміни згинальних інструментів можна отримати будь-який кут згинання, що знаходиться в проміжку між кутом розкриття V-подібної матриці. Наприклад, при використанні пуансона 30° і матриці 30° можна отримати кут згину на деталі 135° , 90° , 60° , 45° та ін.

- Менші витрати на інструмент, можна використати один комплект для багатьох завдань.

- Менше необхідне зусилля згинання в порівнянні з іншими методами згинання.

Недоліки:

- Менш точні кути. У зв'язку з тим, що інструмент контактує з металом тільки в трьох точках, то заготовка може повести себе непередбачено і кут згинання по всій довжині буде нерівномірний, особливо якщо в заготівлі є залишкова напруга після розкрою, і практично може досягати декількох градусів.

- Менша точність повторень, на яку суттєво впливають фізико-механічні властивості матеріалу заготовки.

- Більший ефект зворотного пружинення за рахунок більшої пружної деформації.

- Менша універсальність та якість згинання. Розкриття матриці при вільному згинанні 10-15 товщин листа, це є причиною збільшення мінімального відгину. Відсутність контакту зі стінками матриці є причиною деформації отворів («виворіт») розташованих близько до лінії згинання.

У яких випадках раціонально застосовувати даний метод:

- Велика номенклатура виробів, дрібносерійне виробництво.
- Різні кути згинів (у тому числі гострі).
- Мінімальні вимоги до точності та якості згинів.
- Геометрія кінцевих деталей не містить незначних мінімальних відгинів і допустимі внутрішні радіуси згинів рівні двох товщин листа і більше.

- Для подальшого створення склепок або облямівок (каемок).

Метод калібрування. При цьому методі кут згину визначений зусиллям згинання та згинальним інструментом: матеріал затиснутий повністю між пуансоном і стінками V-подібної матриці. Пружна деформація майже відсутня та фізико-механічні властивості матеріалу практично не впливають на кут згинання.

При цьому зусилля калібрування в 3 – 10 разів вище за зусилля вільного згинання. Розкриття матриці вибирається з діапазону 6-10 товщин металу.

Переваги методу калібрування:

- Точніший кут згину в порівнянні з методом вільного згинання.
- Менший ефект зворотного пружинення і більша повторюваність за рахунок більшого впливу на метал та зменшення пружних деформацій. Незважаючи на це пружинення у певній мірі залишається, тому якщо необхідно отримувати на готовій деталі кут 90°, то інструмент слід вибрати з кутом 88° – 85°.

- Найкраща якість згинання: «виворіт» отвору зменшується при досягненні пуансоном нижнього положення, відносно невеликі розкриття матриць дозволяють робити невеликі мінімальні відгини і досить точні внутрішні радіуси, рівні від 1 до 2 товщин металу.

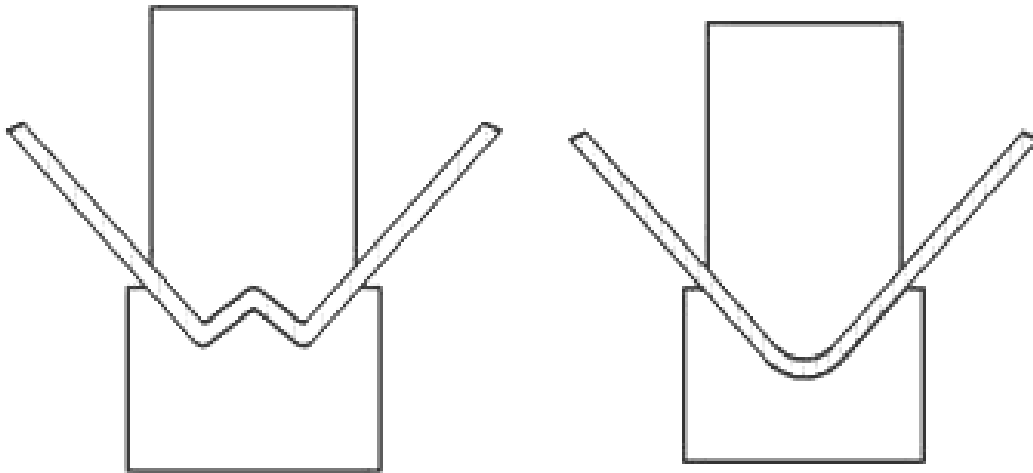


Рис. 5 Метод калібрування

Недоліки:

- Необхідно прикладати більше зусилля згинання в порівнянні із вільним згинанням, не застосовується для листів металу з великою товщиною.

- Обмежений діапазон застосування у порівнянні з вільним згинанням, щоб досягти всіх переваг даного методу на іншому профілі чи куті згинання необхідно використовувати інший інструмент.

У яких випадках раціонально застосовувати даний метод:

- Обмежена номенклатура виробів, дрібносерійне та серійне виробництво.

- Підвищені вимоги до точності та якості згинів.

- Внутрішні радіуси згинів повинні бути від 1 до 2 товщин металу.

- Найчастіше використовується один кут згину, наприклад 90° і дещо менше тупі кути в діапазоні $90^\circ - 180^\circ$.

- Оптимальні мінімальні відгини.

На кожному вертикально-згинальному пресі є таблиця з рекомендованими параметрами по підбору інструмента та відповідними технологічними можливостями з вказанням зусиль, які необхідно прикласти для згинання заготовки. Фото даної таблиці представлено на рис. 6. Наприклад якщо необхідно зігнути лист товщиною 2 мм з радіусом 2 мм на матриці V12, то при цьому зусилля яке має розвинути станок буде складати 23 тони на один погонний метр деталі.

З вищевказаного рисунку можна зробити таблицю з рекомендованими параметрами, яких необхідно дотримуватись при проектуванні згинів на деталі табл. 2.

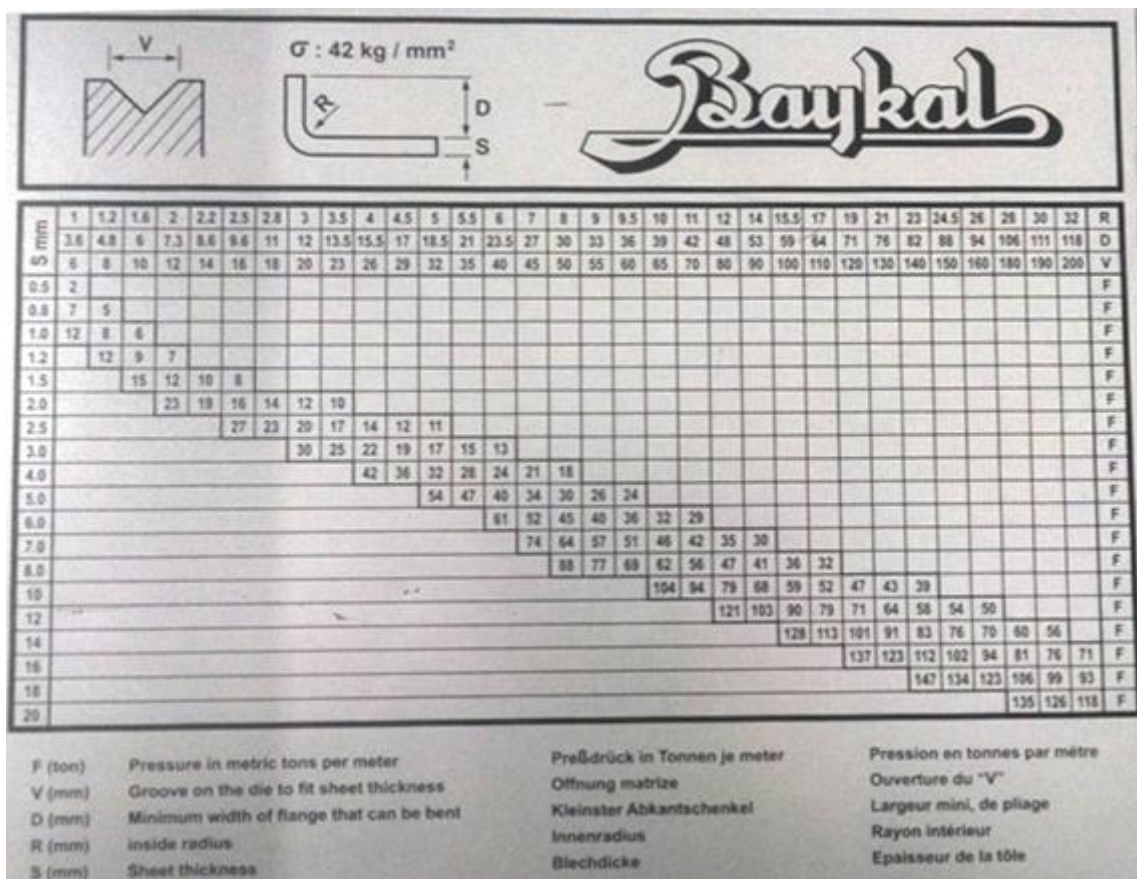


Рис. 6 Дані для розрахунку навантаження при згинанні

Таблиця 2

Мінімальні технологічні значення профілю, які необхідно забезпечити для реалізації процесу згинання

Товщина листа, мм	Радіус згинання, мм	Мінімальний розмір одинарного відгину, мм	Мінімальна висота Z-подібного профілю, мм
≤1	1	6	9
1,5	1,5	8	10
2	2	9	11
2,5	3	14	17
3	3	15	18
4	4	25	29
5	5	26	31

Наступним параметром, що враховує фізико-механічні властивості матеріалу, які виражаються при згинанні металу та визначають розмір розгортки, є **K-фактор** – коефіцієнт, який визначає положення нейтрального шару при згині рис. 7, [5] його значення коливається у межах 0,35-0,5.

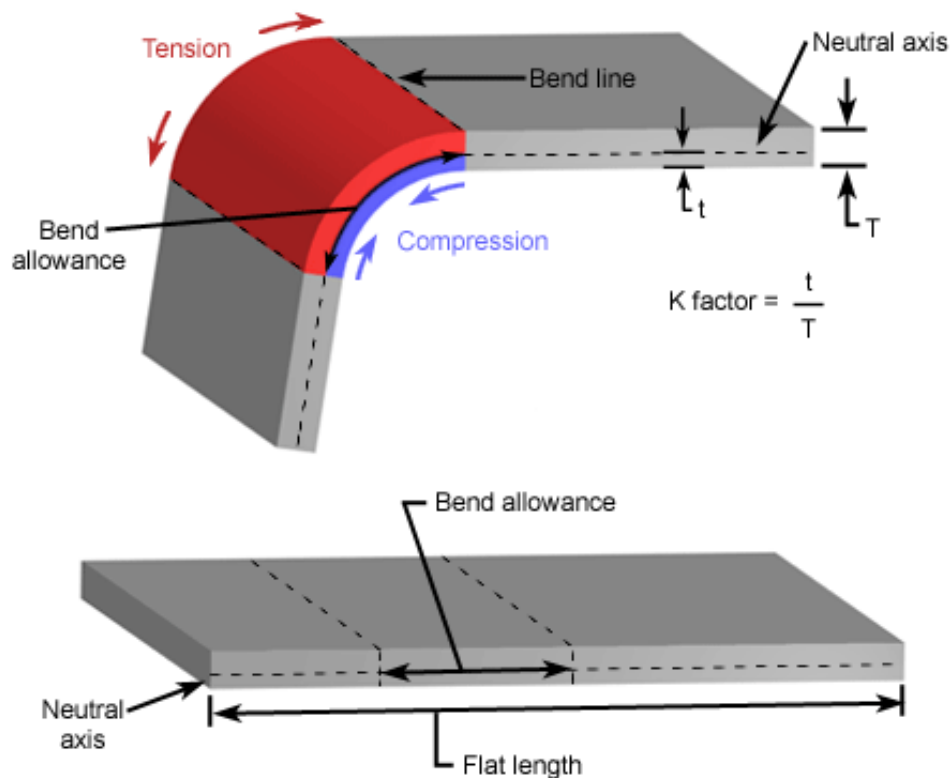


Рис. 7 Положення нейтрального шару при згині

Здебільшого цей коефіцієнт визначається на підприємстві експериментальним шляхом для даного типу обладнання і партії листового прокату, та даються рекомендації по його застосуванню для певного діапазону товщин матеріалу і кута згину. Наприклад у програмі Autodesk Inventor коефіцієнт К-фактор за замовчуванням встановлений $K=0,44$ [3], що повністю задовольняє вимогам в навчальному процесі по побудові простих деталей. Чим точніше буде значення цього коефіцієнту тим точнішими будуть розміри розгортки, і відповідно, розміри деталі у згорнутому стані.

Висновки та перспективи. На підставі викладеного матеріалу можна зробити наступні висновки. Кожна деталь яка буде виготовлятися із листової сталі має бути максимально адаптована під задану технологію виробництва. В налаштуванні файлу деталі, у програмі розробки наприклад Autodesk Inventor, обов'язково необхідно вказувати компенсаційний фактор на згин деталі, такий як К-фактор (наприклад $K=0,44$), або інший компенсаційний параметр.

Для деталей, які складаються зі складної траєкторії різі необхідно використовувати різання за допомогою лазера. Якщо деталь має велику кількість перфорації, або рельєфне формування «пуклівка» для отримання розгортки деталі необхідно використовувати координатно-пробивні преси (КПП) з необхідним обладнанням. При розробці такої деталі необхідно використовувати інструмент який наведений у табл. 1.

При проектуванні згину рекомендується використовувати метод калібрування і мінімальні значення відгину (полиць) в залежності від товщини деталі та радіуса згину, які наведені у табл. 2.

При вивченні студентами даної теми з урахуванням комбінованого підходу, коли розкриваються можливості САД-системи для реалізації задуманого конструктиву з урахуванням технології виготовлення, підвищується обізнаність здобувачів у темі «Листовий метал» і рівень майстерності.

Література

1. *Penchuk V.A.* Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells / V.A. Penchuk, V.K. Rudnev, N.V. Saenko, V.N. Suponev, V.I. Oleksyn, S.P. Balesniy, S.M. Vivchar / *Magazine of Civil Engineering*. 2015. №2. С. 100 – 107.
2. *Олексин В.І., Рагулін В.М.* Правила проектування деталей із листового металу / «Розбудова і відновлення машинобудівного комплексу України» – 2023: збірник тез міжнародної конференції. ХНАДУ. Харків: ХНАДУ, 2023 р. С. 182-183.
3. <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-check-a-K-factor-of-sheet-metal-part-in-Inventor.html>.
4. https://polygonal.com.ua/gnuttya_listovogo_metalu.php
5. <https://www.adhmt.com/k-factor-bend-allowance-and-bend-deduction>

References

1. *Penchuk V.A.* Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells / V.A. Penchuk, V.K. Rudnev, N.V. Saenko, V.N. Suponev, V.I. Oleksyn, S.P. Balesniy, S.M. Vivchar / *Magazine of Civil Engineering*. 2015. №2. С. 100 – 107.
2. *Oleksyn V.I., Rahulin V.M.* Pravyla proektuvannia detalei iz lystovoho metalu «Rozbudova i vidnovlennia mashynobudivnoho kompleksu Ukrainy» – 2023: zbirnyk tez mizhnarodnoi konferentsii. KhNADU. Kharkiv: KhNADU, 2023 r. S. 182-183. {in Ukrainian}
3. <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-check-a-K-factor-of-sheet-metal-part-in-Inventor.html>.
4. https://polygonal.com.ua/gnuttya_listovogo_metalu.php
5. <https://www.adhmt.com/k-factor-bend-allowance-and-bend-deduction>

Ph. D. **Volodymyr Oleksyn**
oleksyn.volodymyr1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3223-8561
Ph. D., assoc. prof **Vitaliy Ragulin**,
ragulinrvn@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2083-4937
Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU)

MODELING OF SHEET STEEL PARTS, TAKING INTO ACCOUNT THE MANUFACTURING TECHNOLOGY

The technology of manufacturing parts from sheet steel is an important industry that provides the production of various products ranging from boxes to cars and construction equipment. However, the process of developing or modeling individual parts and assemblies as a whole precedes the manufacture of parts. To ensure the production of quality sheet steel products, it is necessary to include manufacturing technological aspects in the model at the development stage. Therefore, teaching and studying this topic should be combined with revealing the possibilities of CAD systems and manufacturing technologies.

The work presents the technology of manufacturing parts from sheet steel, which is based on the most common equipment, namely laser cutting machines and coordinate-punch presses, which are used to obtain a layout of a part from a metal sheet. Vertical-bending presses and segmental bending machines, which bend the workpiece (layout) and give the final shape of the part.

The necessary parameter for setting the sheet metal file is indicated, which can be expressed by the K-factor coefficient, and for educational purposes, it is recommended to accept it equal to $K=0.44$.

Recommendations are given on the use of the most appropriate equipment and tool to implement a specific task. A table is provided with the most commonly used tool for gear cutting machines. The minimum possible technologically justified elements of the sheet metal part, which must be provided to implement the bending process at the design stage, are indicated.

The advantages and disadvantages of each of the sheet metal processing methods are mentioned in projection onto the corresponding equipment, as well as cases in which it is rational to use this equipment.

The most common formats of sheet steel are mentioned, which should be oriented when designing parts with the calculation of placing the layout of the part on them.

Key words: computer modeling, manufacturing, coordinate-punching press, laser, bending, sheet metal, die, punch, manufacturing technology