

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Дослідження точності виготовлення деталей під час згинання на
листоштампувальних молотах»

КРМ.133ГМмд_21_10.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти магістр
групи 133ГМмд_2024[3](о.н)
СИМОНОВ Михайло
Керівник: канд. техн. наук, доцент
ЛЕВЧЕНКО Юлія

Полтава – 2026 року

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах сучасного виробництва для виготовлення різних деталей з різних матеріалів (вуглецеві та корозійностійкі сталі, алюмінієві, магнієві та титанові сплави та ін.) товщиною від 0,25 до 3,5 мм широко застосовують процеси листового штампування заготовок на листоштампувальних молотах, оснащених свинцево-цинковими штампами. Простота конструкції та невисока вартість, а також універсальність листоштампувальних молотів, що дозволяє випускати велику номенклатуру деталей, знижує витрати на обладнання та інструмент при одиничному та дрібносерійному виробництві [10].

Однією з поширених операцій листового штампування на молотах є згинання. Основними недоліками згинання на листоштампувальних молотах є низька розмірна точність деталей, що виготовляються, і невідповідність геометричних розмірів деталей заданим на кресленні внаслідок пружного пружинення деталі, а також високі трудомісткість і витрати на виробництво, пов'язані з великою кількістю довідкових операцій. При цьому необхідні розміри деталі забезпечують додатковою правкою (калібруванням) в окремому штампі та з силами, що значно перевищують силу штампування деталі або ручним доведенням, що погіршує якість поверхні деталі та збільшує трудомісткість і витрати на виготовлення деталей. На підставі результатів експериментально-теоретичних досліджень процесів кування та гарячого об'ємного штампування на молотах [15], які показали можливість підвищення ККД ударного деформування заготовок при збільшенні тривалості удару при використанні баби молота з наповнювачем у вигляді сталевих куль, було зроблено припущення про можливість підвищення розмірної точності деталей та зниження пружного пружинення при згинанні на листоштампувальних молотах шляхом збільшення тривалості ударної взаємодії інструменту наповнювачем, що забезпечує утримання падаючих частин молота в нижній точці при ударі. В результаті може бути забезпечене виготовлення деталей із заданими розмірами та точністю, а також виключені трудомісткі операції ручного доведення та додаткового виправлення (калібрування) деталей.

У зв'язку з цим розробка науково-обґрунтованих технічних рішень, спрямованих на підвищення точності деталей та зниження трудомісткості при згинанні на листоштампувальних молотах є актуальною. Експериментальні та теоретичні дослідження процесів ударного деформування при згинанні на молотах

дозволять провести їх математичний опис та розробити практичні рекомендації та пропозиції щодо вдосконалення технологічних процесів згинання на листоштампувальних молотах, що забезпечують отримання деталей необхідної якості та зниження витрат на виробництво.

Мета роботи: підвищення точності деталей та зниження трудомісткості при згинанні заготовок на листоштампувальних молотах за рахунок збільшення тривалості ударної взаємодії інструменту із заготовкою при використанні баби молота з наповнювачем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Проведення аналізу сучасного стану процесів згинання на листоштампувальних молотах.
2. Проведення експериментальних досліджень процесу згинання на листоштампувальному молоті в умовах збільшення тривалості взаємодії інструменту із заготовкою.
3. Розробка математичних моделей процесу згинання заготовок на листоштампувальних молотах.
4. Розробка технологічного процесу виготовлення деталі «Зашивка» на листоштампувальному молоті.
5. Рекомендації по модернізації листоштампувального молоту.

Об'єкт дослідження: процес згинання листових заготовок на листоштампувальних молотах.

Предмет дослідження: геометрична точність деталей, силові параметри при згинанні листових заготовок на листоштампувальних молотах в умовах збільшення тривалості взаємодії інструменту із заготовкою.

Методи дослідження: методи математичної статистики, багатofакторного планування експерименту, аналізу, порівняння, узагальнення.

Публікації:

1. Сімонов М.В. Процес згинання листових заготівок: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування*: (Полтава, 4 грудня 2025 р.). Полтава: ПДАУ, 2025. С. 131-134.

2. Сімонов М.В. Ударні методи згинання в листовому штампуванні: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції *Сільськогосподарське будівництво: відновлення, інновації та розвиток* (Полтава, 17-18 грудня 2025 р.). Полтава: ПДАУ, 2025. С.26-28.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз процесів згинання листових заготовок

Згинання – утворення кута між частинами заготівлі або надання заготівлі криволінійної форми (рис.1.1). При згинанні змінюється кривизна серединної поверхні при майже незмінних лінійних розмірах, що супроводжується нерівномірним розподілом деформації по товщині. При згинанні зазвичай змінюється кривизна серединної поверхні в одній площині, а кривизна заготівлі в площинах, перпендикулярних до площини вигину, повинна залишатися незмінною, що дорівнює нулю. Пластично деформується лише ділянка заготівлі у зоні контакту з пуансоном. Деформація розтягування зовнішніх шарів і внутрішніх стисків збільшується зі зменшенням радіуса заокруглення робочого торця пуансона, при цьому зростає ймовірність утворення тріщин. Тому мінімальний радіус пуансона обмежується величиною в межах 0,1–2,0 від товщини заготовки, залежно від механічних властивостей матеріалу [3, 7].

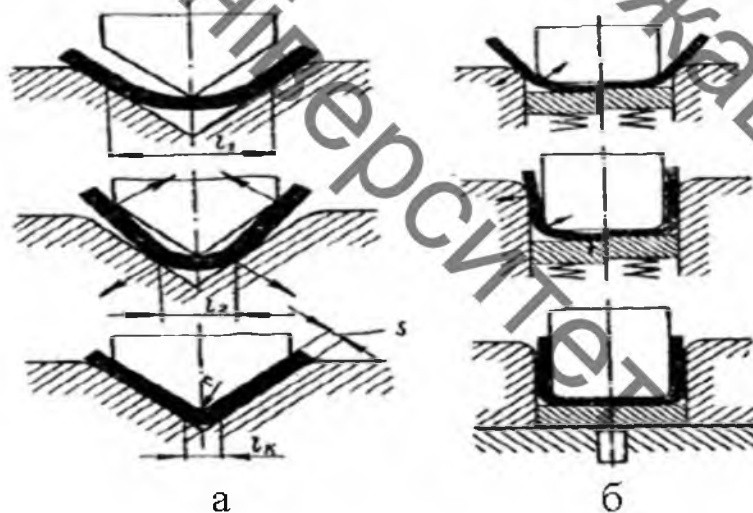


Рисунок 1.1 – Послідовність процесу згинання:

а – однокутове згинання; б – двокутове згинання

Протягом всього процесу згинання заготівля має внутрішнє закруглення, яке більше радіусу пуансона, причому при згинанні відбувається поступове зменшення

радіуса кривизни та плеча згину. Заготовка закругленням, що поступово зменшується, прилягає в двох точках до стінок матриці і з деякого моменту виявляється притисненою до пуансона в трьох точках. Тільки в кінці ходу, при глухому ударі, що калібрує, заготівля прилягає до пуансона.

При знятті навантаження розтягнуті шари заготовки пружно стискаються, а стислі – розтягуються, що призводить до зміни кута згинання α , тобто до пружинення деталі. Це слід враховувати при зменшенні кута інструменту на величину пружинення або застосуванням в кінці робочого ходу додаткового зусилля.

На рисунку 1.2 показані технологічні схеми згинання. Згинання можна робити в згинальних штампах (рис. 1.2, а, б), на спеціалізованих згинальних машинах (рис. 1.2, в), на роликівих або валкових верстатах. Основним обладнанням для згинання в штампах є універсальні механічні та гідравлічні преси, спеціалізовані згинальні преси з подовженою станиною та повзуном (як у гільйотинних ножиць). Прес вибирають за величиною необхідної сили, розміром столу, величиною ходу повзуна, розміром відкритої та закритої висоти преса. Всі ці розміри визначають, виходячи з розмірів та властивостей матеріалу деталей. Для згинання великогабаритних листових деталей, пресованих профілів і труб застосовують тривалкові машини, три- та чотирироликіві верстати, обтяжні преси, трубозгинальні верстати та ін. [3, 7].

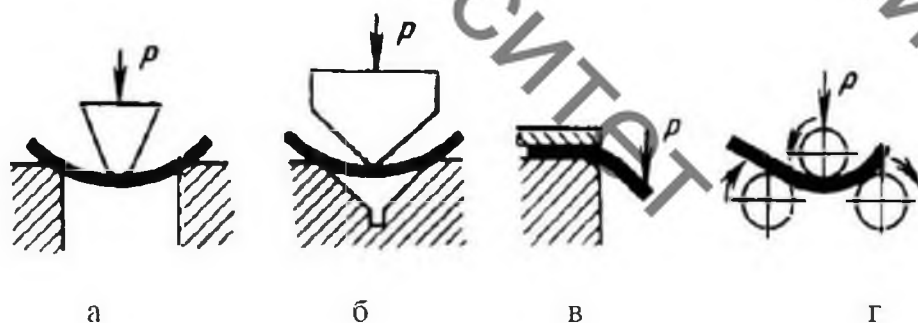


Рисунок 1.2 – Технологічні схеми згинання: а – вільного; б – з чеканкою;
в – консольного; г – на роликівому або валовому верстаті

Дослідження особливостей формозміни, напруженого та деформованого стану, а також енергосилових параметрів при згинанні проводилися науковцями провідних технічних університетів України (НТУ, ХПІ, ДНУ, ДПТ, КП ім.Ігоря Сікорського), серед авторів та співавторів можна назвати Кулика О.В., Убизького М.М., Фесенка А.Г., Шевчука Д.І. та ін. [16, 19].

У процесі згинання в згинальній частині заготівлі відбувається послідовна пружна, пружнопластична та пластична деформації, що протікають по-різному з кожної зі сторін заготовки, що згинається. Між розтягнутими і укороченими шарами знаходиться нейтральний шар, довжина якого дорівнює довжині заготовки до згинання, що є умовною криволінійною поверхнею, яка розділяє деформовані шари металу [6, 15].

Загалом вигин заготівлі здійснюється одночасною дією зовнішніх згинальних моментів, а також поздовжніх і поперечних сил. При розгляді вигину широкої смуги під дією згинальних моментів, прикладених до двох протилежних країв прямокутної заготовки, радіус серединної поверхні зменшується. Зі збільшенням кривизни серединної поверхні відбувається осередок пластичної деформації, який з поверхні проникає в глиб заготовки, що призводить до зменшення шару пружної деформації. Зі зростанням радіусу кривизни в поверхневих шарах заготовки, збільшується товщина зони пластичної деформації.

В результаті стоншення матеріалу та зміни форми поперечного перерізу нейтральний шар у місці вигину не проходить посередині перерізу, а зміщується у бік малого радіусу. При згинанні широких смуг і листів також відбувається стоншення матеріалу, але майже без зміни поперечного перерізу, оскільки деформація в поперечному напрямку протидіє опору більшої ширини матеріалу. Лише з обох боків широких смуг відбувається деформація, аналогічна поперечної деформації вузьких смуг [3, 15].

В основному згинання проходить при великому ступені деформацій, і в металі крім поздовжніх розтягуючих і стискаючих напруг, виникають радіальні напруги стиснення, що виникають внаслідок тиску крайніх шарів металу на внутрішні і досягають найбільшої величини у нейтрального шара.

Слід відрізняти згинання з малим радіусом закруглення при великому ступені пластичної деформації від згинання з великим радіусом закруглення при невеликому ступені пластичної деформації. При згинанні з малими радіусами закруглень напруга та деформація не зосереджуються під ребром пуансону, а поширюються на значну довжину заготовки між опорами. В результаті цього заготовка отримує вигин по параболічній кривій, з кривизною, що поступово збільшується, і зменшенням плеча вигину [3,15].

На рисунку 1.3 наведено схеми напруженого та деформованого станів при згинанні широких (рис. 1.3, а) та вузьких заготовок (рис. 1.3, б). Із збільшенням ширини згинальної заготовки поперечна деформація поступово зменшується і стає дуже малою в результаті значного опору, що створюється великою шириною заготовки.

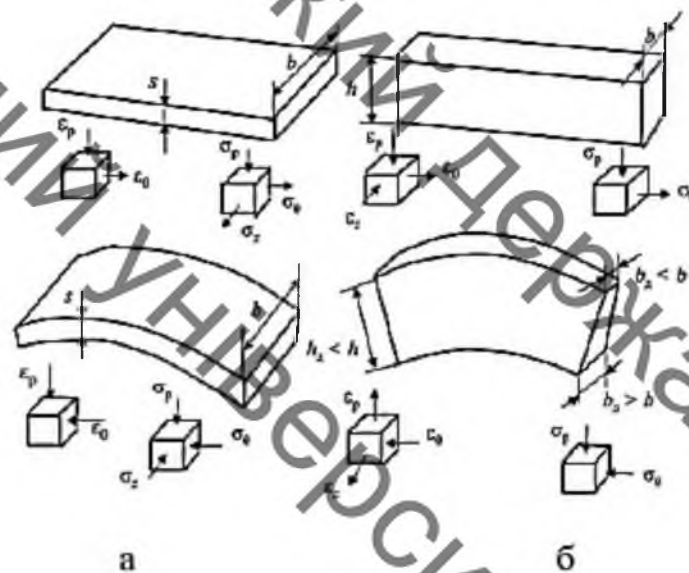


Рисунок 1.3 – Схеми напруженого та деформованого станів при згинанні широких (а) та вузьких заготовок (б)

Різні пружні деформації в зонах розтягування та стиснення викликають поворот поперечних перерізів заготовки на кут, який називається кутом пружинення $\Delta\alpha$, який є різницею між залишковим кутом деталі α_D та кутом вигину α (рис. 1.4).

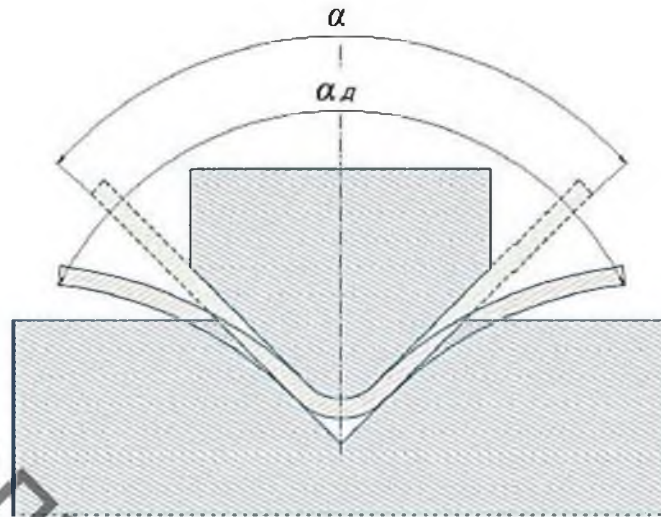


Рисунок 1.4 – Зміни кута при згинанні внаслідок пружного пружинення

Величину залишкової деформації, що залишається після зняття зовнішніх навантажень та обумовлює точність розмірів відштампованих деталей, можна визначити на основі використання теореми А.А. Іллюшина про розвантаження. Згідно з теоремою, розвантаження відбувається за законом Гука, і якщо тіло при навантаженні зазнавало неоднорідної деформації, то при розвантаженні в ньому виникнуть залишкові напруження, які визначаються різницею між напруженнями, що діють у навантаженому тілі, і фіктивними напруженнями, які виникли б у тілі при пружному деформуванні тієї ж кривизни [3, 10]

$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{R} - \frac{M}{EI} \quad (1.1)$$

де R_d – радіус згинання деталі після зняття навантаження, м;

R – радіус згинання деталі під навантаженням, м;

M – згинаючий момент, який діє в перерізі, що розглядається, при пластичній деформації;

E – модуль пружності, МПа;

I – момент інерції заготовки ($I = \frac{bs^2}{12}$ для прямокутного перерізу шириною b та товщиною s , м; $I = \frac{\pi d^4}{64}$ для заготовки круглого перерізу діаметром d , м).

Рівняння дозволяє визначити радіус кривизни ρ_d деталі після зняття навантаження і виходячи з умови, що при розвантаженні довжина волокна на нейтральній поверхні заготівлі не змінюється, тобто

$$\rho_n \alpha = \rho_d \alpha_d \quad (1.2)$$

можна знайти кут вигину α_d деталі після зняття навантаження. Знаючи кут вигину α_d , можна знайти кут пружинення $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = 2 \arcsin \sin \left(E \xi_n^{1-n} \sin \sin \frac{\alpha}{2} \right), \quad (1.3)$$

де E – коефіцієнт, що враховує зміцнення матеріалу заготовки, яка залежить від властивостей матеріалу, що деформується, $E = \frac{3(1+n)K_n}{2^n (2+n)nE}$.

n – коефіцієнт деформаційного зміцнення; K_n – приведений модуль, що залежить від компонент напруженого стану. ξ_n – відносний радіус кривизни нейтрального перерізу, $\xi_n = \frac{\rho_n}{S}$; \angle кут згинання.

Формули дають можливість вирішувати пряме технологічне завдання — знаходити кут пружинення $\Delta\alpha$ за відомими значеннями кута вигину та радіуса кривизни нейтральної лінії, створених у процесі згинання.

У відомих літературних джерелах є й інші формули, а також діаграми для визначення величини пружинення при вільному згинанні різних металів та сплавів. Аналіз формул показує, що кут пружинення при вільному згинанні залежить від пластичності металу, товщини заготовки, кута вигину та радіуса кривизни, на які зроблена деформація. Чим менший коефіцієнт деформаційного зміцнення n та відносний радіус ξ_n кривизни, тим менший кут пружинення. Чим пластичніше матеріал заготовки, тим менший кут пружинення. Зміцнення підвищує межу плинності матеріалу та знижує пластичність, тому наклепаний метал пружинить більше, ніж відпалений.

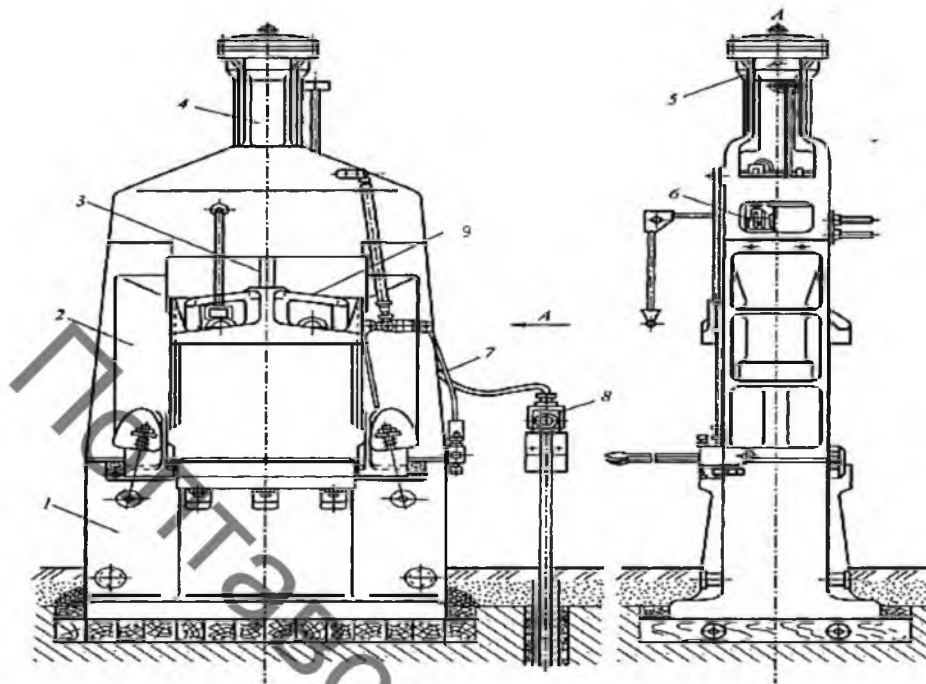
1.2 Ударні методи згинання в листовому штампуванні

Процеси згинання на листоштампувальних молотах відіграють важливу роль у технології листового штампування, забезпечуючи ефективне формоутворення деталей у масовому великосерійному виробництві. Згинання як вид пластичної деформації полягає у наданні заготовці певного просторового профілю шляхом зміни її кривизни під дією зовнішнього навантаження. На листоштампувальних молотах ця дія здійснюється у вигляді удару, який відрізняється високою

швидкістю, короткочасністю та значною концентрацією енергії. Ударний характер навантаження накладає суттєвий відбиток на процес деформування, структуру металу, точність сформованих кутів і форму готових деталей [6].

Порівняно з пресами, де навантаження збільшується плавно, молоти забезпечують деформацію переважно за рахунок імпульсу, що призводить до швидкого локального перевищення межі плинності матеріалу. Внаслідок цього метал у зоні згину переходить у пластичний стан за значно менший проміжок часу, ніж при статичному навантаженні. Це зменшує ймовірність пружного повернення та дає змогу формувати згни з малим радіусом, що є особливо важливим для жорстких профілів і конструкційних елементів. Під час ударного згинання верхні волокна листа піддаються розтягуванню, нижні стискаються, а між ними проходить нейтральна лінія, яка майже не зазнає деформації. Ударна дія сприяє також локальному наклепу – зміцненню металу в зоні максимальних деформацій, що підвищує жорсткість елемента, але можна знизити його пластичність у наступних операціях [6].

Конструкція листоштампувальних молотів (рис. 1.5) передбачає наявність рухомої баби, яка здійснює удар по пуансону, та стійкої основи або ковадла, на якій закріплена матриця. Швидкість і точність роботи молота значною мірою залежить від маси баби, механізму її підйому та системи амортизації. Часто застосовують молоти подвійної дії або молоти з пружною системою підвіски, що забезпечують плавніше гальмування та зменшення ударних навантажень на опорні конструкції. Робочі штампи для згинання, що складаються з пуансона, матриці та притискних елементів, мають підвищені вимоги до міцності й зносостійкості, оскільки під час роботи зазнають значних імпульсних навантажень.



- 1 – стіл; 2 – напрямні; 3 – шток; 4 – робочий циліндр; 5 – запобіжний пристрій;
 6 – паророзподільний механізм; 7 – механізм керування; 8 – система змащування;
 9 – баба молота

Рисунок 1.5 – Загальний вид листоштампувального молота

У технологічному процесі важливе місце займає правильне позиціонування та фіксація заготовки. Оскільки удар виконується швидко, будь-який зсув листа призводить до викривлення кута, появи перекосу або деформацій, не передбачених технологічною схемою. Тому застосовують притискачі різних конструкцій – від простих пружинних елементів до механізмів з пневматичним або гідравлічним приводом. Якість згинання залежить від геометрії пунсона матриці: для тонких матеріалів використовують штампи з малим радіусом заокруглення, а при роботі з твердими сплавами – зі збільшеним радіусом для запобігання тріщинам [3, 10].

Процеси згинання на листоштампувальних молотах можуть бути прямолінійними або криволінійними. Прямолінійне згинання є найпоширенішим і застосовується для виготовлення корпусних деталей, кронштейнів, крил профільних конструкцій тощо. Криволінійне згинання використовується у випадках, коли необхідно сформувати дуги, кільця, овальні або змінні профілі. В окремих технологічних схемах передбачається згинання з витяжкою, при якому зовнішні

волокна заготовки деформуються не лише шляхом згинання, а й шляхом часткового розтягнення, що дозволяє отримувати трапецієподібні або складні перехідні профілі. Калібрування після згинання виконується для підвищення точності та усунення наслідків ударного характеру деформації; воно забезпечує стабільність кута, радіуса та геометричну правильність деталей [6,10].

Точність згинання на молотах нижча ніж на пресах, але може бути підвищена завдяки застосуванню спеціальних технологічних прийомів: попередньому прогріву заготовки (для важкодеформованих металів), використанню багатокрокових ударів з поступовим збільшенням енергії, а також застосуванню самофіксувальних або пружних матриць, що зменшують ризик зминання країв. Важливим фактором є також напрямок волокон у прокатному листі: згинання поперек напрямку прокатки зазвичай дає кращу пластичність і менш виражене пружне повернення.

Матеріали, що найкраще піддаються згинанню на молотах, це низьковуглецеві конструкційні сталі, середньопружні сплави, алюмінієві та мідні листи. Високоміцні сталі потребують більших ударних зусиль і точного контролю за величиною імпульсу, оскільки вони чутливі до появи мікротріщин на зовнішньому боці згину. Особливості ударного згинання проявляються також у роботі з пружними матеріалами, наприклад, нержавіючими сталями, де необхідно враховувати значне пружне повернення і потребу у збільшенні кута згину за технологічним припуском [6, 10].

Серед переваг згинання на листоштампувальних молотах виділяються простота обладнання, висока швидкість циклу, низькі експлуатаційні витрати та можливість роботи з жорсткими або малопластичними матеріалами. Низька собівартість простих штампів дозволяє швидко переналагоджувати виробництво на інші вироби.

До недоліків належать обмежена точність, неможливість формувати складні профілі без додаткових операцій, підвищений рівень шуму та вібрації, а також вимоги до підвищеної зносостійкості інструмента. Незважаючи на це, листоштампувальні молоти залишаються ефективним інструментом у галузях, де важливі швидкість, продуктивність та простота технологічного оснащення [6].

Завдяки поєднанню високої продуктивності та значної ударної енергії, листоштампувальні молоти й надалі відіграватимуть важливу роль у виробництві деталей з листового металу, особливо там, де потрібно створювати велику кількість однотипних згинів за короткий проміжок часу. Подальше вдосконалення конструкції молотів і штампів, розвиток матеріалів з підвищеною зносостійкістю, а також автоматизація процесів подачі та фіксації заготовок сприятимуть підвищенню точності та розширенню можливостей ударного згинання в сучасній промисловості.

Висновки.

Аналіз існуючих досліджень показав, що основними недоліками згинання на листоштампувальних молотах є низька розмірна точність деталей, що виготовляються, і невідповідність геометричних розмірів деталей заданим на кресленні внаслідок пружного пружинення деталі, а також висока трудомісткість і витрати на виробництво, що пов'язані з великою кількістю довідних операцій. При цьому необхідні розміри деталі забезпечують додатковою правкою (калібруванням) в окремому штампі та з силами, що значно перевищують силу штампування деталі або ручним доведенням, що погіршує якість поверхні деталі та збільшує трудомісткість та витрати на виготовлення деталей.

Встановлено, що одним з можливих напрямів підвищення геометричної точності деталей та зниження пружного пружинення при згинанні на листоштампувальних молотах, є збільшення тривалості ударної взаємодії інструменту та заготівлі при використанні спеціального пристрою (наприклад, баби молота з наповнювачем), що забезпечує утримання надаючих частин молота в нижній точці при ударі. В результаті може бути забезпечене виготовлення деталей із заданими розмірами та точністю, а також виключені трудомісткі операції ручного доведення та додаткового виправлення (калібрування) деталей.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

За допомогою методу багатофакторного планування експерименту були побудовані математичні моделі процесу згинання стандартною бабою молота та бабою молота з наповнювачем у вигляді рівнянь регресії, що показують залежність кута пружинення від кута та радіусу згинання, а також від параметрів баби молота з наповнювачем [9].

2.1 Побудова регресійного рівняння процесу згинання листових заготовок з використанням стандартної баби молота

Для побудови регресійного рівняння, що описує процес згинання на листоштампувальному молоті з використанням стандартної баби молота у вигляді $y_i = \Delta\alpha = f\left(\frac{R}{S}, \alpha\right)$ за допомогою метода багатофакторного планування та статистичних методів була проведена обробка результатів експериментів.

Значення факторів матриці плану в натуральному масштабі X_i експерименту були переведені в кодований масштаб x_i . При цьому модель мала вигляд [9]:

$$y_1 = b'_0 + \sum_{i=1}^3 b'_i x_i + \sum_{i=1}^3 b'_{ii} z_i, \quad (2.1)$$

де x_i – лінійна функція від X_i ; z_i – квадратична функція від X_i .

b'_i – коефіцієнт моделі.

При цьому лінійну функцію визначають залежністю:

$$x_i = k_i(X_i + A_i), \quad (2.2)$$

де $A_i = \frac{-1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}$ та k_i – коефіцієнти: $i = 1, 2, 3$ – номер фактору; $u = 1 \dots N$ – номер дослідів; $N = 9$ – кількість дослідів.

Таким чином, з урахуванням симетричності та ортогональності плану $A_1 = -1,50$; $A_2 = -90,00$ та $k_1 = 1$; $k_2 = 0,03$.

Квадратична функція визначається залежністю:

$$z_i = k'_i(x_i^2 + a_i x_i + c_i), \quad (2.3)$$

де k'_i , a_i , c_i – коефіцієнти.

З урахуванням симетричності та ортогональності плану $a_1=0$; $a_2=0$ та $k'_1=2$; $k'_2=2$.

Після проведених перетворень формули переходу від натурального масштабу факторів плану експерименту до кодованого мають вигляд:

$$x_1 = (X_1 - 1,5); \quad x_2 = 0,0333333(X_2 - 90);$$

$$z_1 = 2(X_1^2 - 0X_1 - 0,67); \quad z_2 = 2(X_2^2 - 0X_2 - 0,67).$$

Розрахунок коефіцієнтів моделі b'_i проводили за формулою [9]:

$$b'_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (2.4)$$

Далі побудоване рівняння переводили з кодованого масштабу до натурального. В результаті було отримано рівняння регресії, що описує процес ударного деформування заготовки при згинанні заготовок стандартною бабою і показує залежність кута пружинення від кута і радіусу згинання.

В результаті було побудовано 2 рівняння регресії в залежності від напрямку прокатки заготовки у вигляді:

- згинання вздовж напрямку прокатки:

$$\Delta\alpha = 0,106 \left(\frac{R}{S}\right)^2 + 0,00215\alpha^2 - 0,0109 \left(\frac{R}{S}\right) \cdot \alpha + 0,965 \left(\frac{R}{S}\right) - 0,41032\alpha + 20,0933; \quad (2.5)$$

- згинання впоперек напрямку прокатки:

$$\Delta\alpha = 0,15 \left(\frac{R}{S}\right)^2 + 0,00152\alpha^2 - 0,00973 \left(\frac{R}{S}\right) \cdot \alpha + 0,679 \left(\frac{R}{S}\right) - 0,293\alpha + 14,96028 \quad (2.6)$$

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії по t -критерію Стьюдента проводили виходячи з рівномірного дублювання дослідів. При цьому визначали дисперсію коефіцієнтів побудованої математичної регресійної моделі:

$$S_{b'_0}^2 = 8,7 \cdot 10^{-5}, \quad S_{b'_1}^2 = 4,3 \cdot 10^{-6}, \quad S_{b'_2}^2 = 2,5 \cdot 10^{-4},$$

$$S_{b'_{11}}^2 = 3,8 \cdot 10^{-8}, \quad S_{b'_{22}}^2 = 11,2 \cdot 10^{-8}, \quad S_{b'_{222}}^2 = 2,8 \cdot 10^{-9}.$$

Число ступенів свободи $f_1 = N \cdot (g-1) = 9 \cdot (5-1) = 36$. При рівні значущості $\alpha = 0,01$ (1% рівень значущості) та $f_1 = 36$ табличне значення t -критерію Стьюдента $t_{0,05; \infty} = 1,96$.

Довірчі інтервали коефіцієнтів регресійної моделі y_2 визначали за формулою:

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i}^2. \quad (2.7)$$

При цьому:

$$\Delta b'_0 = 17,1 \cdot 10^{-5}; \Delta b'_1 = 84 \cdot 10^{-6}; \Delta b'_2 = 4,9 \cdot 10^{-4}; \Delta b'_{11} = 7,5 \cdot 10^{-8}; \\ \Delta b'_{22} = 21,9 \cdot 10^{-8}; \Delta b'_{222} = 5,8 \cdot 10^{-9}.$$

Оскільки абсолютна величина коефіцієнтів виявилася більшою за величину довірчого інтервалу, всі коефіцієнти слід визнати статистично значущими.

Далі проводили перевірку адекватності математичної моделі по F -критерію (критерію Фішера) при прийнятому рівні значущості 5%, для чого за допомогою побудованого рівняння регресії визначали розрахункові значення відгуку $y_{2\text{розр}}$ і порівнювали їх з експериментальними значеннями $y_{2\text{експер}}$.

Далі проводили розрахунок дисперсії адекватності математичної моделі

$$S_{\text{адекв}}^2 = \sum_{u=1}^N \quad (2.8)$$

де $f_2 = N - k' = 9 - 6 = 3$ – число ступеней свободи,

$k'=6$ – число значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Звідси визначили дисперсію адекватності побудованого рівняння регресії і отримали $S_{\text{адекв}}^2 = 0,18$.

Розрахункове значення F -критерію визначали за формулою:

$$F_{f_2, f_1}^{\text{розрах}} = \frac{S_{\text{адекв}}^2}{S_y^2}. \quad (2.9)$$

Отже, $F_{3;36}^{\text{розрах}} = 4,23$. При рівні значимості $\alpha = 0,01$ (1% рівень значущості) і при $f_1 = 36$ табличне значення F -критерію дорівнює $F_{0,01;3;36}^{\text{табл}} = 4,51$, оскільки $F_{3;36}^{\text{розрах}} < F_{0,01;3;36}^{\text{табл}}$, гіпотеза про адекватність моделі на 1% рівня значимості не відкидається.

прокатки вище значень кута пружинення при згинанні вздовж напрямку прокатки приблизно в 1,15 ÷ 1,2 рази.

2.2 Побудова регресійного рівняння процесу згинання листових заготовок з використанням баби молота з наповнювачем

Для побудови регресійного рівняння, що описує процес згинання на листоштампувальному молоті з використанням баби молота з наповнювачем у вигляді $y_i = \Delta\alpha = f\left(\frac{R}{S}, \alpha, K_M, K_{1M}\right)$ за допомогою метода багатофакторного планування та статистичних методів була проведена обробка результатів експериментів.

Значення факторів матриці плану в натуральному масштабі експерименту X_i були переведені в кодовий масштаб x_i за формулою:

$$x_i = k_i(X_i + A_i), \quad (2.10)$$

де $A_i = \frac{-1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}$ та k_i – коефіцієнти: $i = 1, 2, 3$ – номер фактору; $u = 1 \dots N$ – номер дослідів; $N = 9$ – кількість дослідів.

З урахуванням симетричності та ортогональності плану отримуємо, що $A_1 = -1,5$; $A_2 = -90$; $A_3 = -0,21$; $A_4 = -0,0001138$; $k_1 = 1$; $k_2 = 0,03$; $k_3 = 10$; $k_4 = 6700,17$.

Перші перетворення формули переходу від натурального масштабу факторів плану експерименту до кодованого:

$$x_1 = (X_i - 1,5); \quad x_2 = 0,0333333(X_i - 90); \quad x_3 = 10(X_i - 0,21);$$

$$x_4 = 6700,17(X_i - 0,0001138)$$

Далі був проведений розрахунок коефіцієнтів моделі b'_i :

$$b'_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}. \quad (2.11)$$

Далі побудоване рівняння переводили з кодованого масштабу до натурального. В результаті було отримано рівняння регресії, що описує процес ударного деформування заготовки при згинанні бабою з наповнювачем і показує залежність кута пружинення від кута і радіусу згинання, а також від параметрів баби молота з

наповнювачем (відношення маси кульок до маси баби K_M і відношення маси однієї кульки K_{1M}).

В результаті було побудовано 2 рівняння регресії в залежності від напрямку прокатки заготовки у вигляді:

- згинання вздовж напрямку прокатки:

$$\Delta\alpha = 1,44126 + 0,3 \left(\frac{R}{S}\right) - 0,01667\alpha + 3K_M + 2010,0051K_{1M}; \quad (2.12)$$

- згинання впоперек напрямку прокатки:

$$\Delta\alpha = 1,48875 + 0,15 \left(\frac{R}{S}\right) - 0,01\alpha + K_M + 670,017K_{1M}.$$

(2.13)

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії по t -критерію Стьюдента проводили виходячи з рівномірного дублювання дослідів. При цьому визначали дисперсію коефіцієнтів побудованої математичної регресійної моделі:

$$S_{b_0}^2 = 6,17 \cdot 10^{-4}, \quad S_{b_1}^2 = 1,23 \cdot 10^{-6}, \quad S_{b_2}^2 = 1,25 \cdot 10^{-5},$$

$$S_{b_3}^2 = 3,43 \cdot 10^{-5}, \quad S_{b_4}^2 = 8,47 \cdot 10^{-11}.$$

Число ступенів свободи $f_1 = N \cdot (g-1) = 16 \cdot (4-1) = 48$. При рівні значущості $\alpha = 0,05$ (5% рівень значущості) та $f_1 = 48$ табличне значення t -критерію Стьюдента $t_{0,05; \infty} = 1,96$.

Довірчі інтервали коефіцієнтів регресійної моделі y_2 визначали за формулою:

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_{i1}}^2.$$

(2.14)

При цьому:

$$\Delta b_0' = 0,0012; \quad \Delta b_1' = 0,0000024; \quad \Delta b_2' = 0,0000245; \quad \Delta b_3' = 0,00649;$$

$$\Delta b_{11}' = 1,6 \cdot 10^{-10}; \quad \Delta b_{22}' = 13,3 \cdot 10^{-9}; \quad \Delta b_{33}' = 1,33 \cdot 10^{-6}; \quad \Delta b_{111}' = 4,88 \cdot 10^{-8}.$$

Оскільки абсолютна величина коефіцієнтів виявилася більшою за величину довірчого інтервалу, всі коефіцієнти слід визнати статистично значущими.

Далі проводили перевірку адекватності математичної моделі по F -критерію (критерію Фішера) при прийнятому рівні значущості 5%, для чого за допомогою

побудованого рівняння регресії визначали розрахункові значення відгуку $y_{2\text{розр}}$ і порівнювали їх з експериментальними значеннями $y_{2\text{експер}}$.

Далі проводили розрахунок дисперсії адекватності математичної моделі

$$S_{\text{адекв}}^2 = \sum_{i=1}^N \dots \quad (2.15)$$

де $f_2 = N - k' = 9 - 4 = 5$ – число ступеней свободи;

$k'=6$ – число значущих коефіцієнтів рівняння регресії

Звідси отримали дисперсію адекватності побудованого рівняння регресії $S_{\text{адекв}}^2 = 0,00049622$.

Розрахункове значення F -критерію визначали за формулою:

$$F_{f_2, f_1}^{\text{розрах}} = \frac{S_{\text{адекв}}^2}{S_y^2} \quad (2.16)$$

Отже: $F_{3;36}^{\text{розрах}} = 2,61$.

При рівні значимості $\alpha = 0,01$ (1% рівень значущості) і при $f_1 = 36$ табличне значення F -критерію дорівнює $F_{0,01;3;36}^{\text{табл}} = 4,56$. Оскільки $F_{3;36}^{\text{розрах}} < F_{0,01;3;36}^{\text{табл}}$, гіпотеза про адекватність моделі на 1% рівня значимості не відкидається.

На підставі отриманих рівнянь регресії (2.12) і (2.13) були побудовані графіки залежності кута пружинення від параметрів згинання (кут і відносний радіус згинання), а також параметрів баби молота з наповнювачем (відношення маси кульок до маси баби K_M і відношення маси однієї кульки до маси баби молота K_{1M}) (рис. 2.5-2.13).

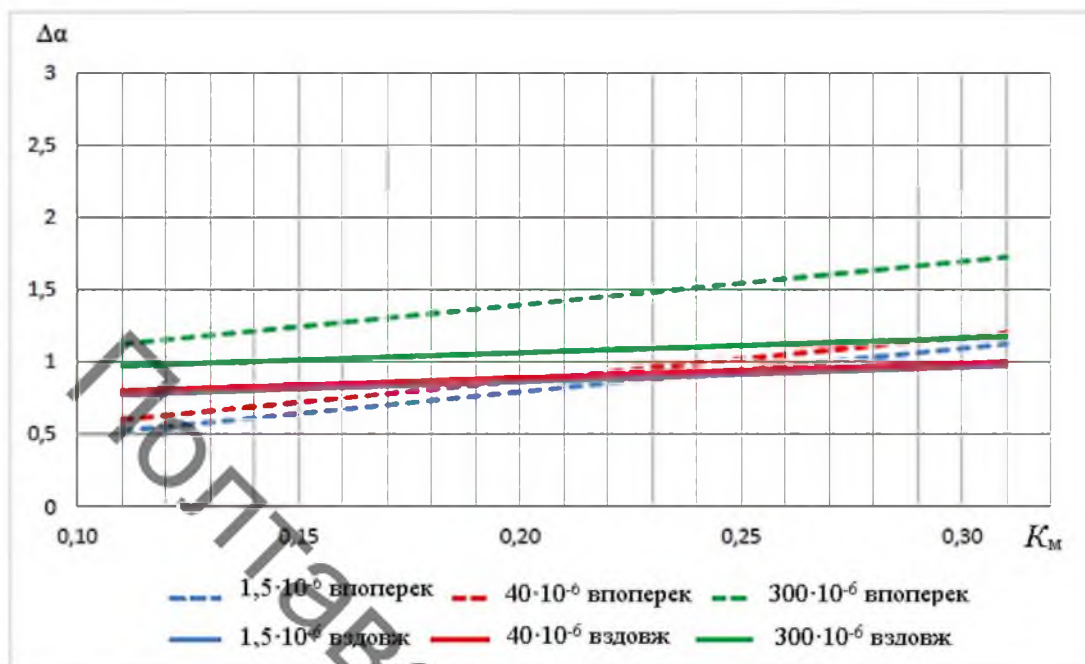


Рисунок 2.13 – Залежність кута пружинення від K_M при $\alpha=120^\circ$ $r/S=2,5$ при використанні баби молота з наповнювачем

В результаті проведеного аналізу отриманих залежностей було встановлено, що для всіх випадків найменший кут пружинення досягається при параметрах наповнювача баби молота $K_M \geq 0,11$, $K_{1M} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$.

Використання $K_M \leq 0,1$ може призвести до зниження ефекту зменшення пружинення при використанні баби з наповнювачем, так як наповнювач буде являти собою практично суцільне тіло з корпусом баби молота. Експериментальна перевірка по застосуванню, наприклад, дрібнозернистого піску (фракція $150 \square 300$ мкм) або металевих гранул (розмір гранул 100-150 мкм) як наповнювача баби молота не виявило жодного ефекту і не впливало на величину пружинення в порівнянні з гнучкою стандартною бабою молота.

Далі були побудовані рівняння регресії, що визначають залежності кута пружинення від параметрів згинання і параметрів баби молота з наповнювачем для сталей 08X15H5Д2Т, 12X18H10Т і сплавів АМг2Н, Д19АТ, Т1 шляхом введення поправочних коефіцієнтів, що залежать від механічних властивостей даних матеріалів (табл.2.1):

- згинання вздовж напрямку прокатки:

$$\Delta\alpha_{\text{теор}} = \frac{K\sigma_s}{E} (1,44126 + 0,3 \left(\frac{R}{S}\right) - 0,01667\alpha + 3K_M + 2010,0051K_{1M}); \quad (2.17)$$

- згинання впоперек напрямку прокатки:

$$\Delta\alpha_{\text{теор}} = \frac{K\sigma_s}{E} (1,48875 + 0,15 \left(\frac{R}{S}\right) - 0,01\alpha + K_M - 670,017K_{1M}).$$

(2.18)

Таблиця 2.1 – Результат моделювання кольорових металів за допомогою регресії

Марка матеріалу	K	$\Delta\alpha_{\text{експ}}^{\circ}$	$\Delta\alpha_{\text{теор}}^{\circ}$	Розбіжність, %
АМГ2Н	0,0012	0,19	0,186	2,15
Д19АТ	0,00483	2,36	2,355	0,21
Т1	0,0158	5,86	5,826	0,58
08Х15Н5Д2Т	0,0184	8,46	8,372	1,05
12Х18Н10Т	0,092	1,2	1,207	0,57

Порівняння експериментальних і розрахункових значень кута пружинення при згинанні заготовок зі сталей 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т і сплавів АМГ2Н, Д19АТ, Т1 дозволило встановити високу збіжність побудованих математичних моделей (2.8) і (2.9) з розбіжністю не більше 2,15%.

Висновки.

1. На підставі методу багатofакторного планування були побудовані математичні моделі згинання на листоштампувальних молотах у вигляді рівняння регресії, що описує залежність кута пружинення заготовок від діаметра та маси кульок, що засипаються в бабу молота з наповнювачем та рівняння регресії, що описує залежність кута пружинення заготовок від відношення маси заготовки до маси баби молота. Перевірка адекватності моделей за критерієм Фішера підтверджує збіжність моделей з експериментальними даними на 1% рівні значущості.

2. На підставі отриманих рівнянь регресії були побудовані графіки залежності кута пружинення від параметрів згинання (кут і відносний радіус згинання), а також

параметрів баби молота з наповнювачем (відношення маси кульок до маси баби K_M та відношення маси однієї кульки до маси баби молота K_{1M}).

Можна відзначити зменшення кута пружинення при збільшенні кута і відносного радіусу згинання при використанні заготовок з різним напрямком прокатки, причому значення кута пружинення при згинанні поперек напрямку прокатки вище значень кута пружинення при згинанні вздовж напрямку прокатки приблизно в 1,15–1,2 рази.

В результаті аналізу побудованих рівнянь регресії були визначені також найбільш раціональні значення відношення маси однієї кульки до маси баби молота з наповнювачем $K_{1M} \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$ і відношення маси всіх кульок до маси баби $K_M \geq 0,11$, при яких можливе отримання найменшого кута пружинення.

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Згинання заготовок та визначення параметрів удару проводили на комплексі для експериментальних досліджень, принципова схема та фотографія якого представлена на рисунках 3.1 та 3.2.

1 – стойки копра (баби молота); 2 – штамп; 3 – цифрова відеокамера; 4 – перехідник; 5 – персональний комп'ютер; 6 – основа (шабот); 7 – баба молота; 8 – пристрій підйому баби; 9 – пристрій захоплення баби

Рисунок 3.1 – Принципова схема комплексу для експериментальних досліджень

Комплекс включає вертикальний копер 1 з встановленими на ньому експериментальним штампом 2 і систему відеозйомки, що включає відеокамеру 3, PCI-контролер 4 для інтерфейсу з камерою і персональний комп'ютер 5

Вертикальний копер 1 складається з двох стоек і шабота 6, змінної баби 7, лебідки для підйому 8 баби та пристрій для захвату і фіксації баби 9. При підйомі баби на необхідну висоту захват відпускають і баба падає на верхню плиту штампу 2, деформуючи при цьому заготовку.

Одночасно з початком руху баби мишею персонального комп'ютера включали введення зображення досліджуваної зони в буферну пам'ять відеокамери 3. Відеозапис проводили з частотою 3000 кадрів в секунду.

Основні технічні характеристики вертикального копра приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики копра

Маса баби, кг	22,4
Маса основи копра, кг	250

Гранична висота скидання баби, м	2
Максимальна теоретична швидкість баби при ударі, м/с	6,26

На рисунку 3.3 представлений експериментальний штамп для згинання. Кут згинання приймали 60, 90 та 120°, радіус згинання 0,5, 1,5 та 2,5 мм.

На рисунку 3.4 фотографія змінних матриць та пуансонів з кутами 60, 90 та 120° та радіусами округлення 0,5, 1,5 та 2,5 мм.

На рисунку 3.5 наведено фотографії матриці з цинкового сплаву ЦАМ 4-1 і пуансону зі свинцю марки С1, виготовлені методом лиття в піщані форми.

Згинання заготовок проводили з використанням експериментального штампу зі змінним набором пуансонів та матриць. При цьому приймали такі параметри експериментів [2]:

- заготовки: 20x40 мм, товщиною $S = 2$ мм (напрямок згинання – вздовж і поперек напрямку прокатки);

- матеріали заготовок: сталі 10, 08X15H5Д2Т, 12X18Н10Т та кольорові сплави АМг2Н, Д19АТ, Т1;

- кут згинання $\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$;

- відносний радіус згинання $r/S=0,5, 1,5$ та $2,5$;

- швидкість баби при ударі: 3 м/с (висота скидання баби 0,5 м).

Крім цього, заготовки мали 2 різні напрямки прокатки щодо напрямку згинання □ вздовж і впоперек (рис. 3.6).

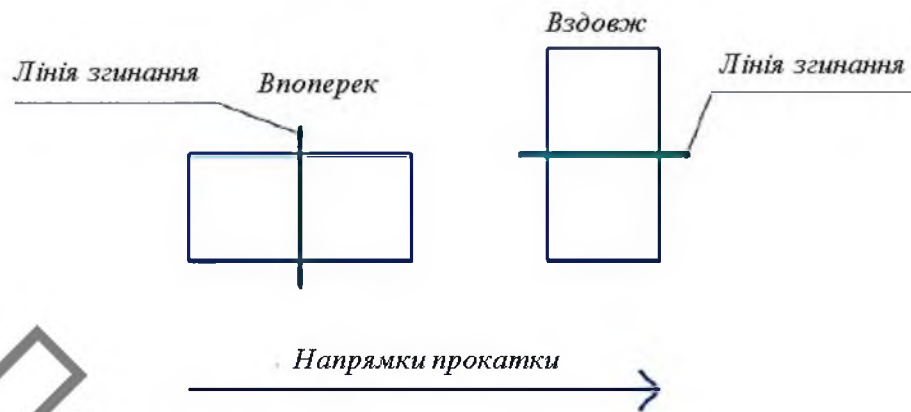


Рисунок 3.6 – Напрямок згинання щодо напрямку прокатки заготовки

Для згинання заготовок на копрі використовували стандартну бабу масою $m_{\text{баби}} = 22,4$ кг, виготовлену зі сталі 45 (ДСТУ 7809).

Також для згинання заготовок використовували бабу з наповнювачем (рис. 3.7), що складається з корпусу з внутрішньою порожниною і засипаними всередину кульками діаметром $D_{\text{кульки}} = 0,001; 0,006$ та $0,012$ м із сталі ШХ15. Корпус баби був виготовлений із сталі 45. Між кришкою 1 баби з наповнювачем і кульками 4 встановлена пружна прокладка 2 з поролону, яка забезпечувала попереднє пружне стиснення кульок в бабі.

Маса корпусу баби дорівнювала 14,5 кг, відношення маси кульок до загальної маси $K_M = 0,11$, $K_M = 0,21$ і $K_M = 0,31$.

Рисунок 3.7 – Баба молота (копра) з наповнювачем: 1 – кришка; 2 – пружна прокладка; 3 – корпус; 4 – кульки

Для можливості порівняння результатів експериментів масу баби з наповнювачем приймали рівною масі стандартної баби $m_{баби} = 22,4$ кг. Для цього при різній масі кульок, що засипаються всередину $m_{кульки} = 3,4; 5,7$ та $7,8$ кг, використовували кришки баби масою $5,42; 3,17$ та $0,92$ кг відповідно.

Були складені матриці плану повнофакторного експерименту 3^2 (при використанні стандартної баби молота, табл.3.2) і дробофакторного експерименту 3^{4-2} (при використанні баби молота з наповнювачем, табл. 3.3) дослідження впливу параметрів згинання на кут пружного пружинення заготовки після згинання [9].

Як незалежні чинники були прийняті такі величини:

- для згинання з використанням стандартної баби молота (копра):

X_1 – відносний радіус згинання r/S ; X_2 – кут згинання;

- для згинання з використанням баби молота (копра) з наповнювачем:

X_1 – відносний радіус згинання r/S ; X_2 – кут згинання; X_3 – відношення маси кульок до маси баби K_M ; X_4 – відношення маси однієї кульки до маси баби молота K_{1M} .

Таблиця 3.2 – Матриця плану експерименту при використанні стандартної баби молота

№ досліду	Відносний радіус згинання r/S	Кут згинання, °
1	0,5	60
2	1,5	60
3	2,5	60
4	0,5	90
5	1,5	90
6	2,5	90
7	0,5	120
8	1,5	120
9	2,5	120

Таблиця 3.3 – Матриця плану експерименту при використанні баби молота з наповнювачем

№ досліджу	Відносний радіус згинання r/S	Кут згинання, °	Відношення маси кульок до маси баби молота K_M	Відношення маси однієї кульки до маси баби молота K_{1M}
1	0,5	60	0,11	$1,5 \cdot 10^{-6}$
2	1,5	60	0,21	$40 \cdot 10^{-6}$
3	2,5	60	0,31	$300 \cdot 10^{-6}$
4	0,5	90	0,21	$300 \cdot 10^{-6}$
5	1,5	90	0,31	$1,5 \cdot 10^{-6}$
6	2,5	90	0,11	$40 \cdot 10^{-6}$
7	0,5	120	0,31	$40 \cdot 10^{-6}$
8	1,5	120	0,11	$300 \cdot 10^{-6}$
9	2,5	120	0,21	$1,5 \cdot 10^{-6}$

Надалі для обробки отриманих відеозображень процесів згинання на молоті (копре) використовували програму MotionAnalyze®BMSTU. Ця програма призначена для обробки відсозображень та отримання кінематичних характеристик рухомих об'єктів (переміщення, швидкість, прискорення).

Висновки.

За запропонованою методикою, що включає вибір обладнання, оснащення, приладів, матеріалів, розмірів заготовок та обробку результатів дослідження, були проведені експериментальні дослідження процесу згинання заготовок зі сталей 10, 08X15H5Д2Т, 12X18H10Т і кольорових сплавів АМг2Н, Д19АТ, Т19АТ, Т1 баби молота, а також в умовах зміни тривалості ударної взаємодії при використанні баби молота з наповнювачем у вигляді сталевих кульок діаметром 0,001, 0,006 та 0,012м із сталі ШХ15. При цьому відношення маси кульок до загальної маси склали $K_M = 0,11$, $K_M = 0,21$ і $K_M = 0,31$.

Для згинання використовували штамп з набором сталевих матриць і пуансонів з кутами 60, 90 і 120⁰ і радіусами округлення 1,0, 3,0 і 5,0 мм, також для згинання використовували матрицю з цинкового сплаву ЦАМ 4-1 і пуансон зі свинцю марки С1. При згинанні заготовок використовували високошвидкісну відеозйомку.

Полтавський державний
аграрний університет

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Результати експериментальних досліджень процесу згинання заготовок

Результати експериментальних досліджень процесу згинання заготовок стандартною бабою молота (копра) та бабою молота (копра) з наповнювачем наведено в таблицях 4.1 та [таблиці А.1](#).

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних досліджень процесу згинання заготовок стандартною бабою молота та бабою молота з наповнювачем ($\alpha = 90^\circ$, $r/S = 2,5$)

№ дослідю	Марка матеріалу	Стандартна баба молота		Баба молота з наповнювачем	
		$\Delta\alpha, ^\circ$	$t, \text{мс}$	$\Delta\alpha, ^\circ$	$t, \text{мс}$
1	АМг2Н	0,9	4,67 (відскок пуансона)	0,19	6,67 (немає відскоку пуансона)
2	Д19АТ	3,05	4,67 (відскок пуансона)	2,36	6,67 (немає відскоку пуансона)
3	Т1	8,17	4,67 (відскок пуансона)	0,19	6,67 (немає відскоку пуансона)
4	08Х15Н5Д2Т	10,14	4,33 (відскок пуансона)	5,86	6,67 (немає відскоку пуансона)
5	12Х18Н10Т	1,8	3,33 (відскок пуансона)	1,2	6,67 (немає відскоку пуансона)

В результаті аналізу отриманих експериментальних даних можна відзначити збільшення тривалості удару t (до 1,3–1,8 разів) і відсутність відскоку пуансона у всіх експериментах з бабою молота з наповнювачем, а також істотне зниження кута пружинення $\Delta\alpha$ (4,0–4,5 рази) і кривизни позиції деталі Δ (до 2,5–3,0 разів) при використанні баби молота з наповнювачем.

У таблиці 4.2 наведено результати експериментів з згинання заготовок зі сталі 10 з використанням свинцево-цинкових штампів (кут згинання $\alpha = 90^\circ$, $r/S = 2,5$, $K_M = 0,11$, $K_{1M} = 40 \cdot 10^{-6}$). При цьому встановлено високу збіжність значень кута пружинення з результатами згинання в жорсткому сталевому штампі (розбіжність не більше 8,5%).

Таблиця 4.2 – Результати експериментальних досліджень процесу згинання заготовок (сталь 10) стандартною бабою молота та бабою молота з наповнювачем з використанням свинцево-цинкового штампа

Напрямки згинання	Жорсткий сталевий штамп		Свинцево-цинковий штамп		Розбіжність, %	
	$\Delta\alpha, ^\circ / \Delta, \text{мм}$					
	Стандарт. баба	Баба з наповн.	Стандарт. баба	Баба з наповн.	Стандарт. баба	Баба з наповн.
Вздовж	1,0	0,92	1,01	0,94	0,99	2,12
	0,114	0,048	0,117	0,045	2,56	6,67
Впоперек	1,24	0,95	1,27	0,99	2,36	4,04
	0,07	0,038	0,104	0,035	2,88	8,57

Під час обробки відеозображень за допомогою комп'ютерної програми вимірювали хід пуансона по осі Y (рис.4.1).

В результаті для всіх проведених експериментів щодо згинання заготовок були побудовані графіки залежності переміщення пуансону та сили деформування від часу (рис. А.1 – А.18).

В результаті проведеного аналізу побудованих залежностей для всіх експериментів було встановлено збільшення сили деформування приблизно в $1,15 \square 1,2$ рази та тривалості її дії на заготовку в $1,3 \square 1,8$ рази при використанні баби з наповнювачем у порівнянні зі стандартною бабою.

Отримані експериментальні дані дозволили розробити принципові схеми процесу згинання при використанні стандартної баби молота та баби молота з наповнювачем (рис. 4.2 та 4.3), що дають пояснення отриманих експериментальних даних.

Процес згинання заготовок з використанням стандартної баби молота можна розділити на кілька основних етапів (рис. 4.2):

- початок руху баби молота;
- зіткнення пуансону з заготовкою та початок згинання заготовки;
- згинання заготовки;
- закінчення згинання заготовки та зупинка баби молота;
- відскок пуансону та баби молота від заготовки.

Процес згинання листових заготовок з використанням баби молота з наповнювачем також можна розділити на кілька основних етапів (рис. 4.3):

- початок руху баби молота разом із наповнювачем;
- зіткнення пуансону з заготівлею та початок згинання заготівлі;
- згинання заготівлі;
- закінчення згинання заготовки, зупинка корпусу баби молота і пружне навантаження наповнювача;
- пружне розвантаження наповнювача та правка (калібрування) заготовки. При цьому максимальна сила деформування становила:

$$F_{\max} = F_{\text{згинання}} + F_{\text{правки}}, \quad (4.1)$$

де $F_{\text{згинання}}$ – сила згинання;

$F_{\text{правки}}$ – сила правки (калібрування);

$$F_{\text{правки}} = F_{\text{гибки}} \cdot (1,15 \div 1,2);$$

- закінчення процесу деформування заготовки.

4.2 Визначення оптимальних основних параметрів баби молота з наповнювачем

4.2.1 Розробка методики розрахунку основних параметрів баби молота з наповнювачем

На основі отриманих експериментальних даних із згинання заготовок зі сталі 10, 08X15H5Д2Т, 12X18H10Т і кольорових сплавів АМг2Н, Д19АТ, Т1 та аналізу отриманих математичних моделей процесу згинання було встановлено, що для проведення згинання заготовок з найменшим пружиненням кульок до маси баби $K_M \geq 0,11$ та відношенням маси однієї кульки до маси баби $K_{1M} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$. Вибір конкретних значень даних параметрів необхідно проводити з урахуванням конструктивних особливостей баби листоштампувального молота.

В результаті було запропоновано методику розрахунку основних параметрів баби молота з наповнювачем у вигляді сталевих кульок зі сталі ШХ15, що включає визначення наступних параметрів:

1. Маса кульок $m_{\text{кульки}} = K_M m_{\text{баби}}$
2. Маса однієї кульки $m_{1\text{кулька}} = \rho V_{1\text{кульки}}$
3. Об'єм однієї кульки $V_{1\text{кульки}}$
4. Кількість кульок $n_{\text{кульок}} = \frac{m_{\text{кульок}}}{m_{1\text{кульки}}}$
5. Сумарний об'єм кульок $V_{\text{кульок}} = n_{\text{кульок}} V_{1\text{кульки}}$
6. Об'єм отворів під кульки $V_{\text{отв}} = 1,25 V_{\text{кульок}}$

З використанням даної методики було проведено визначення параметрів баби листоштампувального молота моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг (маса баби молота 1295 кг):

- маса кульок $m_{\text{кульки}} = K_M m_{\text{баби}} = 142,5$ кг;
- маса однієї кульки $m_{1\text{кулька}} = \rho V_{1\text{кульки}} = 0,0041$ кг;
- об'єм однієї кульки $V_{1\text{кульки}} = 0,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$;
- кількість кульок $n_{\text{кульок}} = \frac{m_{\text{кульок}}}{m_{1\text{кульки}}} = 31586$ шт.;
- сумарний об'єм кульок $V_{\text{кульок}} = n_{\text{кульок}} V_{1\text{кульки}} = 0,016 \text{ м}^3$;
- об'єм отворів під кульки $V_{\text{отв}} = 11,25 V_{\text{кульок}} = 0,0205 \text{ м}^3$.

На основі отриманих даних була спроектована конструкція баби листоштампувального молота моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг.

У корпусі баби молота запропоновано виготовити 10 отворів: 2 отвори діаметром $d=125$ мм та глибиною $h=400$ мм, 2 отвори діаметром $d=95$ мм та глибиною $h=500$ мм та 6 отворів діаметром $d=55$ мм та глибиною $h=500$ мм.

Для запобігання висипанню кульок наповнювача під час руху баби молота запропоновано встановити кришку з масою 40 кг, що дорівнює різниці маси видаленого з отворів металу та маси кульок.

На **рисунках А.19–А.21** наведені креслення складальне та деталі баби молота з наповнювачем моделі МЛ-1,5, а також креслення кришки баби.

4.2.2 Рекомендації по удосконаленню технологічних процесів згинання заготовок на листоштампувальних молотах

Рекомендації щодо проектування технологічних процесів згинання листових заготовок на листоштампувальних молотах включають такі основні етапи:

1. Аналіз креслення деталі.
2. Вибір обладнання залежно від габаритів деталі та штампів.
3. Розрахунок кута пружинення $\Delta\alpha$ при згинанні бабою молота з наповнювачем (з використанням рівнянь (2.12), (2.13), (2.17), (2.18) та порівняння з допустимими відхиленнями кута згинання $[\alpha]$, відповідно до креслення деталі:

- якщо розрахункове значення $\Delta\alpha < [\alpha]$, то поправочні операції не використовують;

- якщо розрахункове значення $\Delta\alpha > [\alpha]$, необхідні поправочні операції;

- за необхідності використовують проміжний відпал.

4. За наявності вимог креслення деталі – остаточне термічне оброблення.

5. Контрольні операції.

З використанням розроблених рекомендацій було проведено вдосконалення технологічного процесу згинання деталі «Зашивка» на листоштампувальному молоті моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг.

На рисунку 4.4 представлений ескіз деталі. Матеріал деталі □ алюмінієвий сплав Д19АМ. Товщина заготівлі – 1,5 мм [14].

В даний час технологічний процес виготовлення даної деталі включає 11 основних операцій: 2 операції згинання за 5 ударів, 2 проміжні відпали, 3 операції ручної правки, 2 операції калібрування на гідравлічному пресі, остаточна термічна обробка (загартування та старіння) і операція контролю (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Існуючий технологічний процес виготовлення деталі «Зашивка»

№ операції	Найменування та зміст операції	Обладнання	Оснастка та інструмент
1	2	3	4
1	Попереднє згинання (4 удари)	Листоштампувальний молот мод. МЛ-1,5	Штамп АЦ-13, набір гумових підкладок
2	Відпал заготовки	Пічка муфельна мод.СНОЛ	
3	Кінцеве згинання (1 удар)	Листоштампувальний молот МЛ-1,5	Формувальний штамп АЦ-13
4	Ручна правка		Формоблок, молоток
5	Відпал заготовки	Пічка муфельна мод.СНОЛ	
6	Калібрування деталі	Гідравлічний прес для штампування еластичного середовища мод. ЯО-6017А, номінальна сила 240 МН	Формоблок

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4
7	Ручна правка		Формоблок, молоток

8	Термічна обробка (загартування та старіння)		Формоблок
9	Калібрування деталі	Гідравлічний прес для штампування еластичного середовища мод. ЯО-6017А, номінальна сила 240 МН	
10	Ручна правка		Формоблок, молоток
11	Контроль: - відсутності тріщин; - геометричних розмірів		Лупа, мікрометр, штангенциркуль

При цьому кут пружинення при згинанні стандартною бабою молота, розрахований з використанням рівняння (2.6), становив $\Delta\alpha = 2,5^\circ$, що суттєво більше допустимого відхилення $[\alpha] = +1^\circ$, що і призводить до високої трудомісткості виготовлення даної деталі відповідно до існуючого технологічного процесу штампування на стандартному обладнанні.

Кут пружинення при згинанні бабою молота з наповнювачем, розрахований з використанням рівняння (2.17), становив $\Delta\alpha = 0,9^\circ$, що менше відхилення $[\alpha] = +1^\circ$, тобто геометричні розміри деталі відповідатимуть вимогам креслення вже після 1-ої операції згинання.

Це дозволило запропонувати новий технологічний процес виготовлення деталі «Зашивка», що включає одну операцію згинання за 2 удари, кінцеву термічну обробку (загартування та старіння), калібрування на гідравлічному пресі та контрольну операцію (табл. 4.4). При цьому кількість ударів молота буде знижено в 2 рази, виключено трудомісткі операції ручної правки та відпалу деталі, а також зменшено у 2–3 рази загальну трудомісткість та час виготовлення деталі.

Таблиця 4.4 – Запропонований технологічний процес виготовлення деталі «Зашивка»

№ операції	Найменування та зміст операції	Обладнання	Оснастка та інструмент
------------	--------------------------------	------------	------------------------

1	Згинання (2 удари)	Листоштампувальний молот мод. МЛ-1,5	Штамп АЦ-13, набір гумових підкладок
2	Термічна обробка (загартування та старіння)		
3	Калібрування деталі	Гідравлічний прес для штампування еластичного середовища мод. ЯО-6017А, номінальна сила 240 МН	Формоблок
4	Контроль: - відсутності тріщин; - геометричних розмірів		Лупа, мікрометр, штангенциркуль

Розроблена технологія виготовлення деталі «Зашивка» на листоштампувальному молоті моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг при використанні баби молота з наповнювачем дозволить зменшити в 2-3 рази кількість операцій та знизити загальну трудомісткість виготовлення деталі.

Висновки

1. В результаті обробки отриманих відеозображень процесу згинання на молоті (копрі) за допомогою комп'ютерної програми було встановлено, що:

- застосування баби молота з наповнювачем для згинання заготовок призводить до збільшення тривалості взаємодії інструменту та заготівлі до 1,3-1,8 разів у порівнянні з гнучкою стандартною бабою;

- застосування баби молота з наповнювачем для згинання заготовок призводить до суттєвого зниження кута пружинення деталі $\Delta\alpha$ до 4,0-4,5 разів і кривизни полиці деталі Δ до 2,5-3,0 разів;

- при згинанні заготовок з використанням свинцево-цинкових штампів була показана висока збіжність з результатами згинання в інструментальному штампі (розбіжність не більше 8,5%), що дозволяє рекомендувати отримані експериментальні результати для розробки технологічних процесів згинання на листоштампувальних молотах.

2. Побудовані графіки залежностей переміщення пуансону та сил деформування від часу при використанні стандартної баби молота та баби молота з наповнювачем.

При цьому було встановлено збільшення сили деформування приблизно $1,15 \div 1,2$ рази та тривалості її дії на заготовку в $1,3 \div 1,8$ рази під час використання баби з наповнювачем проти стандартної баби.

3. Отримані експериментальні дані дозволили розробити принципові схеми процесу згинання при використанні стандартної баби молота та баби молота з наповнювачем, що дають якісне пояснення отриманих експериментальних даних.

4. На основі отриманих експериментальних даних із згинання заготовок зі сталі 10, 08X15H5D2T, 12X18H10T і кельорових сплавів АМг2Н, Д19АТ, Т1 і аналізу отриманих математичних моделей процесу згинання було встановлено, що для проведення згинання заготовок з найменшим пружиненням найбільш доцільно використовувати бабу молота з наповнювачем з відношенням маси кульок до маси баби молота $K_M \geq 0,1$ та відношенням маси однієї кульки до маси баби молота $K_{1M} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$. Вибір конкретних значень даних параметрів необхідно проводити з урахуванням конструктивних особливостей баби листоштампувального молота.

5. В результаті була запропонована методика розрахунку основних параметрів баби молота з наповнювачем у вигляді сталевих кульок зі сталі ШХ15, що включає визначення наступних параметрів: маса кульок, маса і об'єм однієї кульки, кількість кульок, сумарний обсяг кульок, об'єм отворів під кульки.

6. З використанням даної методики було визначено оптимальні параметри та спроектовано конструкцію баби з наповнювачем листоштампувального молота моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг. При цьому маса кульок склала 142,5 кг, маса однієї кульки – 0,0041 кг (діаметр кульки 10 мм), кількість кульок 31586 шт., Сумарний об'єм кульок $0,016 \text{ м}^3$ і об'єм отворів під кульки $0,0205 \text{ м}^3$.

7. Запропоновані рекомендації щодо удосконалення технологічних процесу згинання деталі «Зашивка» на листоштампувальному молоті моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг при використанні баби молота з наповнювачем.

Запропонована технологія виготовлення даної деталі дозволяє зменшити у 2-3 рази кількість операцій та знизити загальну трудомісткість виготовлення деталі.

8. Запропонована конструкція і методика розрахунку основних параметрів баби листоштампувального молота з наповнювачем у вигляді сталевих кульок, що дозволяє збільшити ККД ударного деформування при згинанні на молотах, підвищити геометричну точність деталей, а також рекомендації з проектування технологічних процесів згинання листових заготовок на листоштампувальних молотах дозволяють знизити загальну трудомісткість та собівартість виготовлення деталі.

Полтавський державний
аграрний університет

Розроблені пропозиції щодо вдосконалення технологічних процесів згинання листових заготовок на листоштампувальних молотах, а також розроблені рекомендації щодо модернізації листоштампувального молота моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг.

5.1 Охорона праці

Охорона праці при експлуатації листоштампувальних молотів регламентується системою законодавчих та нормативних актів України, які встановлюють вимоги щодо безпечних умов праці, попередження виробничого травматизму та професійних захворювань. Основними нормативними документами є Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю України, ДСТУ, ДБН, а також галузеві нормативні акти (НПАОП), що визначають вимоги безпеки до ковальсько-штампувального обладнання.

Відповідно до чинного законодавства роботодавець зобов'язаний забезпечити функціонування системи управління охороною праці, здійснювати контроль за технічним станом обладнання, організовувати навчання та інструктажі з охорони праці працівників, а також створювати умови для зниження впливу шкідливих виробничих факторів [12].

Загальна характеристика умов праці

Листоштампувальні молоти широко застосовуються у заготовельному виробництві машинобудівельних підприємств для виконання операцій згинання, формоутворення та правки листових заготовок. Робота на даному обладнанні належить до категорії робіт підвищеної небезпеки через наявність рухомих частин, значних ударних навантажень, високого рівня шуму та вібрації, а також можливість травмування обслуговуючого персоналу.

У процесі експлуатації листоштампувальних молотів працівники піддаються впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть призвести до

виробничого травматизму та професійних захворювань. Тому забезпечення безпечних умов праці є важливою складовою організації технологічного процесу.

При роботі на листоштампувальних молотах на працівників можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори:

- механічні фактори – рухомі та обертові частини молота, зона удару молота, можливість затягування одягу або кінцівок;
- підвищений рівень шуму та вібрації, що виникає під час ударної дії молота;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони внаслідок зношування інструменту та нагрівання металу;
- підвищене фізичне навантаження при ручній подачі та зніманні заготовок;
- небезпечна напруга в електричному колі електроприводів і систем керування;
- пожежна небезпека, пов'язана з використанням мастильних матеріалів і нагрівом деталей.

Наявність зазначених факторів вимагає застосування комплексу технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів [11].

Вимоги безпеки до обладнання та робочого місця

Листоштампувальні молоти повинні відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів з охорони праці та бути оснащені захисними і блокувальними пристроями. Основні вимоги безпеки включають:

- наявність захисних огорожень небезпечних зон та рухомих частин;
- використання дворукого керування або педаль з фіксацією для запобігання випадковому включенню молота;
- справність гальмівних пристроїв і систем аварійної зупинки;
- достатнє освітлення робочої зони відповідно до норм ДБН;
- неслизьке покриття підлоги та чітке маркування небезпечних зон.

Робоче місце оператора має бути організоване з урахуванням ергономічних вимог, що знижує втомлюваність і підвищує рівень безпеки праці.

Заходи щодо зниження рівня шуму та вібрації

З метою зменшення негативного впливу шуму та вібрації при роботі на листоштампувальних молотах застосовуються такі заходи:

- установка молота на віброізолюючі фундаменти;
- використання шумопоглинаючих кожухів та екранів;
- своєчасне технічне обслуговування та балансування рухомих частин;
- застосування індивідуальних засобів захисту органів слуху (наушники, беруші).

Рівні шуму та вібрації не повинні перевищувати гранично допустимі значення, встановлені санітарними нормами.

Засоби індивідуального захисту та навчання персоналу

Працівники, які обслуговують листоштампувальні молоти, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт, зокрема:

- спецодягом і спецвзуттям;
- захисними окулярами або щитками;
- рукавицями;
- засобами захисту органів слуху.

Допуск до роботи дозволяється лише після проходження вступного та первинного інструктажу з охорони праці, навчання безпечним методам роботи та перевірки знань з охорони праці. Періодично проводяться повторні інструктажі та за потребою позапланові.

Пожежна безпека та дії в аварійних ситуаціях

Робочі місця повинні бути оснащені первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники відповідного типу). Забороняється використання несправного обладнання та зберігання легкозаймистих матеріалів у зоні роботи молота.

У разі виникнення аварійної ситуації або загрози життю працівник зобов'язаний негайно зупинити обладнання, повідомити керівника зміни та діяти згідно з інструкцією з охорони праці [11].

Висновки. Реалізація комплексу організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів з охорони праці при роботі на листоштампувальних молотах дозволяє суттєво знизити рівень виробничого травматизму, забезпечити безпечні умови праці та підвищити ефективність виробничого процесу.

5.2 Екологічна експертиза

Екологічна експертиза технологічного процесу листового штампування на молотах є складовою частиною оцінки впливу виробничої діяльності на навколишнє природне середовище та здоров'я людини. Її метою є виявлення, аналіз і мінімізація негативних екологічних наслідків, що виникають у процесі експлуатації листоштампувального обладнання [1].

Проведення екологічної експертизи здійснюється відповідно до вимог Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», Закону України «Про оцінку впливу на довкілля», Закону України «Про відходи», а також чинних державних стандартів, санітарних норм і правил екологічної безпеки.

Технологічний процес на листоштампувальних молотах включає операції підготовки заготовок, механічного деформування металу, використання мастильно-охолоджувальних матеріалів, технічне обслуговування обладнання та транспортування готових деталей. З екологічної точки зору даний процес відноситься до механічної обробки металів, яка не супроводжується значними хімічними перетвореннями, проте має низку негативних факторів впливу на навколишнє середовище [13].

Основними джерелами екологічного навантаження є утворення виробничих відходів, викиди забруднюючих речовин у повітря робочої зони, підвищені рівні шуму та вібрації, а також споживання енергетичних і матеріальних ресурсів.

У процесі роботи листоштампувальних молотів можливе забруднення атмосферного повітря механічними домішками у вигляді металевого пилу, а також аерозолями мастильних матеріалів. Джерелами викидів є зона деформації металу, поверхні штампів та вузли тертя обладнання.

Концентрація забруднюючих речовин, як правило, не перевищує гранично допустимих значень за умови справної роботи вентиляційних систем. Для зниження негативного впливу на атмосферне повітря передбачаються місцеві відсмоктувачі, загальнообмінна вентиляція та регулярне технічне обслуговування обладнання.

Безпосередній вплив технологічного процесу листового штампування на водні об'єкти є мінімальним, оскільки вода не використовується безпосередньо у виробничому циклі. Разом з тим, потенційну небезпеку становлять мастильно-охолоджувальні рідини та технічні мастила, які при неналежному зберіганні або аварійних витоках можуть призвести до забруднення ґрунтів та поверхневих вод.

З метою запобігання негативному впливу застосовуються герметичні системи зберігання мастильних матеріалів, піддони для збору можливих витоків, а також організовується збір і передача відпрацьованих рідин спеціалізованим підприємствам для утилізації.

У процесі роботи на листоштампувальних молотах утворюються такі види відходів:

- металеві обрізки та відходи листового матеріалу;
- зношений штамповий інструмент;
- відпрацьовані мастильні матеріали;
- забруднені ганчір'я та фільтрувальні матеріали.

Більшість металевих відходів належить до малонебезпечних та підлягає повторному використанню або здачі на вторинну переробку. Відпрацьовані мастильні матеріали відносяться до небезпечних відходів і потребують спеціального обліку та утилізації відповідно до чинних вимог.

Листоштампувальні молоти є джерелом підвищеного шуму та вібрації, які можуть поширюватися за межі виробничих приміщень. Надмірний шум негативно впливає не лише на працівників, але й на прилеглі території.

Для зниження шумового навантаження застосовуються шумоізолюючі конструкції, віброгасильні фундаменти, а також обмеження режимів роботи обладнання у нічний час. Контроль рівнів шуму здійснюється відповідно до санітарних норм [13].

Проведена екологічна експертиза показала, що технологічний процес на листоштампувальних молотах за умови дотримання вимог екологічної безпеки не створює значного негативного впливу на навколишнє природне середовище.

Впровадження запропонованих заходів дозволяє мінімізувати екологічні ризики та забезпечити відповідність виробництва чинним екологічним нормам.

Висновки. Технологічний процес листового штампування на молотах є екологічно допустимим за умови дотримання вимог законодавства, належної організації виробництва та впровадження заходів щодо зменшення негативного впливу на довкілля. Реалізація екологічно орієнтованого підходу сприяє сталому розвитку підприємства та підвищенню рівня екологічної безпеки.

5.3 Економічна ефективність розробки

Економічна ефективність технологічного процесу згинання листових заготовок визначається співвідношенням досягнутого виробничого ефекту та сукупних витрат на його реалізацію. При порівнянні стандартної баби листоштампувального молота та баби з наповнювачем доцільно враховувати як прямі економічні показники (витрати на виготовлення, експлуатацію та обслуговування), так і непрямі ефекти, пов'язані з підвищенням якості продукції, зменшенням браку та зростанням продуктивності праці.

Застосування баби молоту з наповнювачем змінює характер передачі ударної енергії від молота до заготовки, що позитивно впливає на стабільність процесу згинання та рівномірність деформації листового матеріалу.

Порівняльна характеристика витрат.

Капітальні витрати. Стандартна баба молота має простішу конструкцію та нижчу початкову вартість виготовлення. Разом з тим, баба з наповнювачем потребує додаткових витрат на: виготовлення порожнистого корпусу; придбання металевих кульок; забезпечення герметичності та балансування конструкції.

Однак збільшення капітальних витрат є одноразовим і компенсується в процесі експлуатації за рахунок зменшення поточних витрат та підвищення ефективності виробництва.

Експлуатаційні витрати.

При використанні баби молота з наповнювачем спостерігається: зменшення пікових динамічних навантажень на вузли молота; зниження зносу напрямних, штампового оснащення та опорних елементів; збільшення міжремонтних інтервалів.

В результаті зменшуються витрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання, а також скорочуються простої, пов'язані з аварійними зупинками.

Вплив на продуктивність і якість продукції.

Використання баби молота з наповнювачем забезпечує більш плавну передачу енергії удару, що призводить до: стабілізації процесу згинання; зменшення пружного пружинення матеріалу; підвищення точності геометричних параметрів деталей.

Зменшення кількості бракованих заготовок та необхідності повторної обробки безпосередньо знижує собівартість одиниці продукції. Крім того, скорочення часу на наладку та коригування режимів згинання сприяє зростанню фактичної продуктивності обладнання.

Зниження витрат на матеріали та енергію.

Завдяки раціональнішому використанню енергії удару: зменшується кількість холостих або надмірних ударів; скорочуються втрати енергії на вібрації та шум; знижується питоме енергоспоживання на одну операцію згинання.

Економія електроенергії та зменшення витрат на метал за рахунок зниження браку формують додатковий економічний ефект, який є особливо відчутним при серійному та масовому виробництві.

Узагальнюючи результати порівняльного аналізу, можна зробити висновок, що застосування баби молота з наповнювачем при згинанні листових заготовок є економічно доцільним. Незважаючи на дещо вищі початкові капітальні витрати, вони компенсуються за рахунок: зниження експлуатаційних витрат; підвищення якості та точності деталей; зменшення браку; збільшення ресурсу обладнання.

Таким чином, впровадження запропонованого конструктивного рішення забезпечує зниження собівартості продукції та підвищення конкурентоспроможності виробництва в цілому.

Розрахунок економічної ефективності застосування баби молота з наповнювачем [4].

Вихідні дані для розрахунку.

Для порівняльної економічної оцінки приймемо такі умовні дані:

Річна програма випуску деталей $N = 20000$ шт.

Собівартість однієї деталі при використанні стандартної баби молота $C_1 = 120$ грн/шт.

Собівартість однієї деталі при використанні баби молота з наповнювачем $C_2 = 108$ грн/шт.

Додаткові капітальні витрати на виготовлення та впровадження нової баби $K_d = 80000$ грн.

Термін служби баби молота $T = 5$ років.

Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень $E_n = 0,15$.

Зниження собівартості зумовлене зменшенням браку, витрат на ремонт обладнання та енергоспоживання.

Річний економічний ефект від зниження собівартості продукції визначається за формулою:

$$E_c = (C_1 - C_2) \cdot N \quad (5.1)$$

$$E_c = (120 - 108) \cdot 20000 = 240000 \text{ грн/рік.}$$

Отже, за рахунок використання баби з наповнювачем річна економія становить 240 тис. грн.

Річні приведені витрати з урахуванням капітальних вкладень визначаються за формулою:

$$B_{\pi} = C_2 \cdot N + E_n \cdot K_d \quad (5.2)$$

Для баби молота з наповнювачем приведені витрати становлять:

$$B_{\pi} = 108 \cdot 20000 + 0,15 \cdot 80000 = 2172000 \text{ грн.}$$

Для стандартної баби приведені витрати становлять:

$$B_{п1} = C_1 \cdot N. \quad (5.3)$$

$$B_{п1} = 120 \cdot 20000 = 2400000 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від впровадження баби молота з наповнювачем визначається як різниця приведених витрат:

$$E_p = B_{п1} - B. \quad (5.4)$$

$$E_p = 2400000 - 2172000 = 228000 \text{ грн/рік.}$$

Термін окупності додаткових капітальних витрат визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{K_d}{E_c}, \quad (5.5)$$

$$T_{ок} = \frac{80000}{240000} = 0,33 \text{ року}$$

Таким чином, додаткові витрати на впровадження баби молота з наповнювачем окупаються приблизно за 4 місяці.

Економічні розрахунки зведені в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники ефективності розробки

Показники	Стандартна баба молота	Баба молота з наповнювачем
Річна програма випуску деталей, шт.	20000	20000
Собівартість однієї деталі, грн	120	108
Додаткові капітальні витрати, грн	-	80000
Нормативний коефіцієнт ефективності	-	0,15
Річні приведені витрати, з урахуванням капіталовкладень грн	2400000	2172000
Річна економія від зниження собівартості, грн	-	240000
Загальний річний економічний ефект, грн	-	228000
Термін окупності капітальних витрат, роки	-	0,33

З наведених у таблиці даних видно, що використання баби молота з наповнювачем дозволяє знизити собівартість виготовлення однієї деталі на 12 грн, що при річній програмі 20 тис.штук забезпечує економію 240 тис.грн на рік. З урахуванням додаткових капітальних вкладень загальний річний економічний ефект становить 228 тис.грн, а термін окупності не перевищує 0,33 року.

Висновки. Виконані розрахунки свідчать, що застосування баби молота з наповнювачем при згинанні листових заготовок є економічно доцільним. Річний

економічний ефект становить близько 228 тис. грн, а термін окупності не перевищує одного року.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведеного аналізу існуючих досліджень процесів згинання встановлено, що одним з напрямків підвищення точності деталей та зниження пружного пружинення при згинанні є збільшення тривалості ударної взаємодії інструменту та заготівлі шляхом утримання падаючих частин молота в нижній точці при ударі при використанні спеціальних пристроїв.

2. Розроблено методику експериментальних досліджень процесу згинання заготовок на листоштампувальному молоті в умовах збільшення тривалості взаємодії інструменту з заготовкою при використанні запропонованої конструкції баби молота з наповнювачем у вигляді сталевих кульок.

3. Проведені на основі запропонованої методики експериментальні дослідження процесу згинання заготовок із сталей 10, 08X15H5Д2Т, 12X18H10Т та кольорових сплавів АМг2Н, Д19АТ, Т1 на листоштампувальних молотах дозволили встановити:

- при згинанні заготовок за допомогою баби молота з наповнювачем тривалість удару збільшується в $1,3 \square 1,8$ рази, кут пружного пружинення зменшується до $4,5 \square 5,0$ разів і кривизна зменшується до $2,5 \square 3,0$ разів порівняно із згинанням стандартною бабою молота;

- показана висока збіжність результатів згинання у свинцево-цинкових штампів із згинанням в інструментальному штампі (розбіжність не більше 8,5%), що дозволяє рекомендувати отримані експериментальні результати для розробки технологічних процесів згинання на листоштампувальних молотах.

4. При використанні методу багатofакторного планування експерименту були побудовані математичні моделі процесу згинання на молоті у вигляді рівнянь регресії, що показують залежності кута пружинення від кута та радіусу згинання, а також від параметрів баби молота з наповнювачем.

В результаті проведеного аналізу отриманих математичних моделей визначено найбільш доцільні параметри баби з наповнювачем: $K_M \geq 0,1$ та $K_{1M} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$, при яких можливе отримання найбільшої точності при згинанні заготовок і які можна використовувати при розробці технологічних процесів згинання на молотах.

5. Розроблено пропозиції щодо вдосконалення технологічних процесів згинання на листоштампувальних молотах, що включають методику розрахунку основних параметрів баби молота з наповнювачем та рекомендації щодо проектування технологічних процесів згинання листових заготовок на листоштампувальних молотах.

6. Розроблено технологію виготовлення деталі «Зашивка» на листоштампувальному молоті моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг при використанні баби молота з наповнювачем, що дозволяє зменшити в 2-3 рази кількість операцій та знизити загальну трудомісткість виготовлення деталі.

Розроблені пропозиції щодо вдосконалення технологічних процесів згинання листових заготовок на листоштампувальних молотах, а також розроблені рекомендації щодо модернізації листоштампувального молота моделі МЛ-1,5 з масою падаючих частин 1500 кг.

Розроблена конструкція баби листоштампувального молота з наповнювачем може бути використана в листоштампувальних цехах для підвищення точності деталей, що виготовляються, зниження трудомісткості і витрат на виробництво.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Артамонов Б. Б., Міронова Н. Г. Екологічна експертиза: навч. посіб. Львів: Новий Світ-2000, 2025. 142 с. URL: <https://ns2000.com.ua/ekolohichna-ekspertyza/>
2. Боков В. М. Технологія холодного штампування: підручник. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2021. 213 с. URL: <https://surl.li/jktqdj>
3. Гожій С. П., Сабол С. Ф., Кліско А. В. Ковальсько-штампувальне обладнання: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 151 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42053/1/Posibnyk-4_KShO-HiP.pdf
4. Гринчуцький В. І., Карапетян Е. Т., Погрішук Б. В. Економіка підприємства: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2010. 304 с. URL: <https://surl.li/lwiyvvd>
5. Добрянський С. С., Малафєєв Ю. М., Пуховський Є. С. Проектування і виробництво заготовок: підручник. Київ: НТУУ КПІ, 2014. 353 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/46090/1/Proektuvannia.pdf>
6. Іванов В. О., Ступін Б. А., Берладір Х. В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин : навч. посіб. Суми: СумДУ, 2023. 189 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/ac87b0ec-82ec-4212-bd46-a9df909dda88>
7. Малафєєв Ю. М. Технологічні основи машинобудування: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 201 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/2630b2b7-4ac4-44ca-a4a1-b608077cf00>
8. Марченко С. В., Гапонова О. П., Говорун Т. П., Харченко Н. А. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2016. 146 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/324278937.pdf>
9. Онищенко В. О., Срібнюк С. М., Коробко Б. О., Матяш О. В. Основи наукових досліджень та науково-технічної творчості: навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 280 с. URL: <https://surl.li/vdoykx>

10. Паливода Ю. Є., Дячун А. Є. Заготовки у машинобудівному виробництві: навч.-метод. посіб. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. 148 с.
URL: <https://surl.lu/ukqgie>
11. Пістун І. П., Стець Р. Є., Трунова І. О. Охорона праці в галузі машинобудування: навчальний посібник. Суми: Університетська книга, 2021. 556с.
URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Pistun_2011_557.pdf
12. Про охорону праці: закон України від 21.11.2002, № 229-IV із змінами від 21.08.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення 16.12.2025).
13. Промислова екологія: навчальний посібник / С.О. Апостолук, В.С. Джигирей, І.А. Соколовський та ін. 2-ге вид., виправл. і доповн. Київ: Знання, 2012. 430 с. URL: <https://surl.li/duagsj>
14. Розробка креслень деталей і складальних одиниць: Довідковий методичний посібник при роботі над курсовими та дипломними проектами для студентів всіх технічних спеціальностей всіх форм навчання / Укладачі С. Г. Карнаух, Т. О. Кулік. Краматорськ: ДДМА, 2021. 100 с. URL: <https://surl.lu/kpobnj>
15. Технологія процесів листового штампування: навч. посіб. / уклад.: В. Л. Чухліб, О. А. Юрченко, А. В. Ашкелянець. Харків: НТУ ХПІ, 2021. 76 с.
URL: <https://surl.li/qkodtr>
16. Технологія машинобудування: навч. посіб. / І. І. Назаренко та ін. Київ: Ямчинський О.В., 2024. 164 с.
URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/13033>
17. Технологія машинобудівних підприємств: підручник / В. Л. Дикань, Ю.Є. Калабухін, Н. Є. Каличева та ін., за заг. ред. В. Л. Дикаля. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 386 с. URL: <https://surl.lt/kulltm>
18. Швець С. В., Швець У. С., Борисюк В. М. Моделювання мехатронної ковальсько-пресової системи: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2022. 177 с. URL: <https://surl.lt/neduij>
19. Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Фесенко А. В. Технологічні основи машинобудування: навч. посіб. Харків: НТУ ХПІ, 2022. 421с.

URL: <https://surl.li/vxyjpp>

Полтавський державний
аграрний університет