**Бабин І.А.**

к.т.н., доцент

Луц П.М.

к.т.н., ст. викладач

Штуць А.А.

к.т.н. доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Babyn I.**

Ph.D., Associate Professor

Luts P.

Ph.D., Senior Lecturer

Shtuts A.

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.983****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-9**

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ ПРУЖНОГО ПОВЕРНЕННЯ ПРИ ДВОКУТОВОМУ ЗГИНАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТАМПУ ІЗ ПІДПРУЖИНЕНИМИ ПЛАНКАМИ

Пружне повернення є одним із ключових факторів, що суттєво знижують досягнення геометричної точності деталей, отриманих методом листового згинання, особливо у випадку формування профілів із двома кутами згину. Величина пружного повернення визначається сукупною дією пружних і пластичних характеристик матеріалу, товщиною заготовки, ступенем і схемою деформації, геометричними параметрами інструменту, а також умовами контакту в зоні згинання.

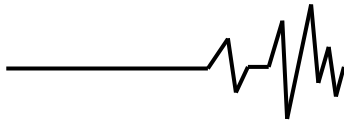
У промисловій практиці точне прогнозування величини пружного повернення залишається складним, але пріоритетним завданням, що зумовлює необхідність застосування додаткових технологічних заходів для досягнення заданої точності: калібрувальних операцій, використання складних регульованих штампів, спеціальних температурних режимів (наприклад, попередній підігрів оснастки) або модифікованих умов деформування. Такі підходи призводять до ускладнення технологічного процесу та зростання собівартості продукції.

У статті досліджено ефективність компенсації пружного повернення під час двокутового згинання шляхом застосування спеціальної конструкції штампа, оснащеного підпружиненими притискними планками. Запропоноване рішення забезпечує безперервний контрольований притиск заготовки до поверхні пуансона протягом усього циклу згинання та створює додаткову керовану пластичну деформацію, спрямовану на компенсацію кутового відхилення після зняття навантаження.

Підпружинені планки виготовляються з вуглецевої сталі й мають геометрію, оптимізовану відповідно до очікуваної величини пружного повернення конкретного матеріалу заготовки. Пуансон виконується з відповідною компенсаційною виїмкою, що сприяє формуванню цільового кута з урахуванням прогнозованого відхилення. Конструкція розрахована на формування прямих кутів згину.

Наведено результати теоретичного моделювання та експериментального дослідження процесу двокутового згинання за допомогою розробленого штампного оснащення. Встановлено, що використання підпружинених притискних планок дозволяє суттєво зменшити, а в багатьох випадках – практично повністю усунути пружне повернення, забезпечуючи отримання деталей із заданими кутами параметрами за одну технологічну операцію без необхідності калібрування у подальшому.

Запропонований метод вирізняється



конструктивною простотою, економічною доцільністю та високою перспективністю для застосування в умовах одиничного й дрібносерійного виробництва.

Ключові слова: листовий штамп, пуансон, двокутове згинання, пружне повернення *springback*, підпружинені притискні планки, компенсація пружності, точність гнуття, листове штампування.

Постановка проблеми. Листове штампування посідає провідне місце серед технологій обробки металів тиском і широко застосовується в машинобудуванні, авіабудуванні, суднобудуванні, будівельній галузі та виробництві сільськогосподарської техніки.

Однією з найпоширеніших формоутворювальних операцій у цій технології є гнуття, під час якого відбувається локальна зміна кривини листової заготовки внаслідок пружно-пластичної деформації матеріалу [1]. Основним чинником, що суттєво ускладнює досягнення високої геометричної точності гнутих деталей, є пружне повернення – небажане часткове відновлення початкової форми заготовки після зняття деформуючого навантаження, що проявляється у збільшенні кута згину або радіуса вигину порівняно з проектними значеннями.

Величина пружного повернення залежить від низки взаємопов'язаних параметрів: пружності і пластичності матеріалу, товщини листа, заданого кута згинання, відносного радіуса згину (r/s), схеми та ступеня деформації, а також силових, трибологічних і кінематичних умов контакту інструменту з заготовкою [2, 3].

Особливо актуальною проблема пружного повернення стає при двосторонньому згинанні, яке є типовим способом формування П- подібних, V- подібних, S- подібних, Z- подібних та інших профілів, що використовуються як корпусні елементи, кронштейни, скоби, кутники, опорні деталі тощо. Такі вироби мають широкий діапазон габаритних розмірів і виготовляються з листів товщиною переважно 0,5 - 6 мм.

Пружне повернення призводить до систематичного відхилення фактичного кута згину від заданого, що є неприпустимим у випадках, коли кутові параметри виступають посадковими, сполучними або функціональними характеристиками деталі в складальній одиниці. Це зумовлює необхідність застосування додаткових коригувальних операцій (калібрування, доробка вручну, повторне згинання), що суттєво ускладнює технологічний процес, збільшує трудомісткість, собівартість і час виготовлення.

У зв'язку з цим існує нагальна потреба в розробці простих, надійних та економічно ефективних методів компенсації пружного повернення саме на етапі основної операції згинання, які б не вимагали значного ускладнення конструкції штампової оснастки, додаткового обладнання чи суттєвого збільшення кількості

технологічних переходів, а також були придатними для умов одиничного та дрібносерійного виробництва.

Мета досліджень. Метою дослідження є створення та обґрунтування технологічного способу ефективної компенсації пружного повернення під час операції двокутового згинання листових заготовок шляхом цілеспрямованого введення пружних елементів у конструкцію штампової оснастки.

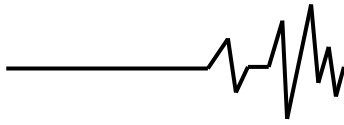
Експериментальне визначення механічних характеристик матеріалу заготовок проводиться відповідно до міжнародного стандарту ISO 6892-1:2019 «Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури» [4].

Контрольоване згинання зразків та оцінка пружного повернення виконується з дотриманням вимог стандарту ISO 7438:2020 «Металеві матеріали. Випробування на згин» [5].

Запропонований підхід дозволяє систематично дослідити кількісний вплив пружних елементів на зменшення або повну компенсацію пружного повернення, що є основою для подальшої оптимізації конструкції штампа та технологічного процесу двостороннього згинання.

Аналіз останніх публікацій. Процес пластичного згинання листових заготовок характеризується нерівномірним розподілом деформацій по товщині матеріалу: зовнішні шари зазнають розтягування, внутрішні — стиснення, тоді як нейтральний шар (нейтральна поверхня) зберігає нульову тангенціальну деформацію [3, 4]. Немонотонний характер деформацій через товщину спричиняє нерівномірне деформаційне зміцнення, що безпосередньо впливає на розподіл залишкових напружень і, як наслідок, на кількісну характеристику пружного повернення (*springback*) [5]. Для заготовок малої ширини (вузьких смуг) додатково проявляються значні поперечні деформації, що призводять до антикластичної кривини (викривлення поперечного перерізу). Навпаки, широкі заготовки демонструють переважно плоский деформований стан із мінімальним викривленням поперечного профілю завдяки високому опору поперечній деформації.

Величина пружного повернення виражається в збільшенні кута згину після розвантаження. Його величина зростає при підвищенні межі плинності матеріалу,



відносного радіуса згину (r/s), кута згинання та при зменшенні товщини листа [6, 9].

При згинанні вузьких смуг (ширина < 200 мм) спостерігається виражене зміння поперечного перерізу: локальне потоншення в зоні вигину, розширення внутрішньої частини кута з утворенням кривини та звуження зовнішньої частини (рис. 1, а). Зі збільшенням ширини заготовки поперечна деформація поступово затухає через збільшення жорсткості у поперечному перерізі. Для широких смуг і листів (ширина > 200 мм) потоншення матеріалу в зоні згину відбувається майже без помітного спотворення перерізу (рис. 1, б). Винятком є крайні частини деталей, де ефекти подібні до тих, що характерні для вузьких смуг [4].

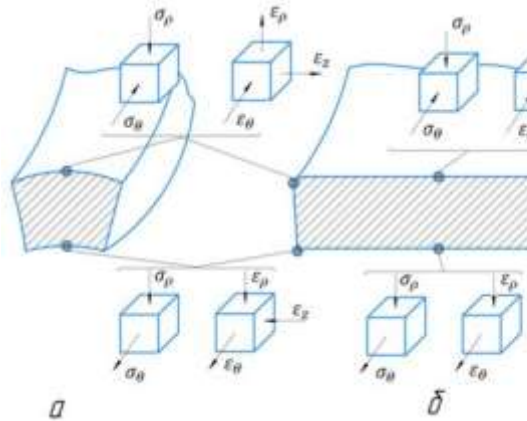


Рис. 1. Схематичне зображення напружено-деформованого стану при згинанні вузької (а) та широкої (б) заготовки: σ – нормальні напруження; ϵ – деформаційні зміни.



Рис. 2. Основні методи компенсації пружного повернення при згинанні листових заготовок

Геометрія деталей, що виготовляються двокутовим згинанням, характеризується поєднанням прямолінійних ділянок однакової чи різної довжини, з'єднаних радіусними переходами (рисунок 3). Типовими представниками є П-, V-, S-, Z-подібні

згинання без притиску заготовки застосовується переважно для деталей низької точності (7-й квалітет), оскільки допускає неконтрольоване зміщення матеріалу в процесі деформування. Згинання з притиском забезпечує вищу точність (5-й квалітет і якісніше) завдяки неможливості переміщення й зсуву заготовки [6]. Водночас більшість існуючих конструкцій штампів із притиском вирізняються підвищеною складністю, високою вартістю виготовлення та обмеженою універсальністю. Особливі труднощі виникають при компенсації пружного повернення в умовах нестабільних механічних властивостей матеріалу [5, 8].

Деталі, отримані методом двокутового згинання, становлять один із найбільш поширених класів елементів у машинобудівних конструкціях за номенклатурою та обсягом виробництва. До них належать металеві корпуси, кути, кронштейни, скоби, опорні елементи тощо. Вони знаходять широке застосування в авіаційній, ракетній, суднобудівній, сільськогосподарській та інших галузях. Габаритні розміри таких деталей варіюються від кількох сантиметрів до кількох метрів, а товщина заготовок переважно становить від 0,2 до 6 мм (з переважанням діапазону від 0,5 до 6 мм). Для компенсації пружного повернення застосовуються різні методи (рисунок 2).

профілі. V-подібні деталі також можуть бути отримані двокутовим згинанням завдяки симетрії: спочатку формується П-подібний профіль, який після розрізання навпіл дає дві V-подібні деталі [4].

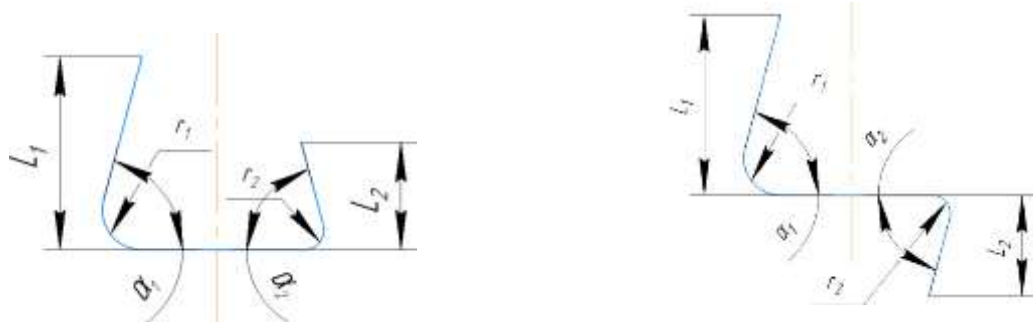
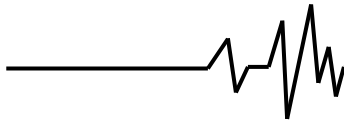


Рис. 3. Типові схеми деталей сформованих методом багатокутного згинання

Ключовим геометричним параметром таких деталей є кут згину, який задається з високою точністю та виступає сполучним (посадковим) параметром у складальних вузлах. Тому пружне повернення, що призводить до зміни кута після розвантаження, є критичним дефектом. Радіус криволінійної ділянки в вершині кута зазвичай не є сполучним параметром і призначається виходячи з вимог до жорсткості деталі та технологічної можливості формоутворення з урахуванням пластичних властивостей матеріалу.

Експлуатаційні характеристики готових штампованих деталей значною мірою залежать від властивостей вихідної листової заготовки, отриманої прокаткою. При виборі параметрів заготовки керуються як вимогами до кінцевих властивостей деталі, так і її здатністю до пластичного формоутворення в операціях листового штампування.

У сучасних конструкціях широко застосовуються П-подібні деталі з матеріалів різних класів міцності, які можна умовно поділити на дві групи за співвідношенням межі плинності ($\sigma_{0,2}$), межі міцності (σ_B) та модуля пружності (E): середньої та високої міцності.

Багато листових матеріалів, зокрема алюмінієві сплави, виявляють помітну пластичну анізотропію. Дослідження [4, 10] показують, що анізотропія суттєво впливає на рівень і розподіл напружень та деформацій під час згинання, що потребує обов'язкового врахування анізотропних характеристик при прогнозуванні пружного повернення та проектуванні технологічних процесів для П-подібних та аналогічних деталей.

Перспективним напрямком удосконалення є впровадження адаптивних рухомих елементів у конструкцію штампа, здатних динамічно змінюватися та пристосовуватися до умов деформування та створювати контрольоване додаткове догинання заготовки для компенсації пружного повернення.

Результати досліджень. Серед різноманітних гнутих профілів, що виготовляються методом листового штампування, особливе місце посідають П-

подібні (U-подібні) деталі, які знаходять найширше застосування в машинобудуванні, будівельних конструкціях та суміжних галузях. Для їх виробництва переважно використовують низьковуглецеві сталі з високою пластичністю (вміст вуглецю в межах 0,05 - 0,40 %), що забезпечують добру здатність до пластичного формоутворення без руйнування.

У авіаційній, ракетно-космічній та суміжних високотехнологічних галузях перевагу надають листовому прокату з алюмінію та його сплавів. Вибір цих матеріалів зумовлений винятково високим відношенням міцності до густини (питома міцність), а також підвищеною корозійною стійкістю в умовах експлуатації.

У зв'язку з цим дослідження спрямоване на отримання можливості компенсації пружного напруження при двокутовому згинанні простим та економічним способом. Запропоноване рішення полягає в застосуванні спеціальної конструкції штампа, оснащеного підпружиненими притискними планками. Ці елементи забезпечують постійний, контрольований притиск заготовки до робочої поверхні пуансона протягом усього циклу деформування. Такий безперервний притиск створює додаткову локальну пластичну деформацію в зоні згину, спрямовано компенсуючи ефект пружного повернення після зняття навантаження.

Компенсуючий кут підпружиненої планки доцільно приймати рівним величині пружного відхилення, яке спостерігається після розвантаження:

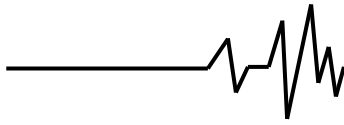
$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{після}} - \alpha_{\text{зад}}, \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{після}}$ – кут деталі після згинання без компенсатора;

$\alpha_{\text{зад}}$ – заданий кут.

Враховуючі результати експерименту: $\Delta\alpha = 91,8^\circ - 90^\circ = 1,8^\circ$.

Отже, кут нахилу робочої (похилої) ділянки білінійної підпружиненої планки доцільно прийняти:



$$\alpha_{пл} = \Delta\alpha = 1,8^\circ.$$

Це забезпечує додаткове догинання полиць на завершальній стадії ходу пуансона й компенсацію зворотного пружного розвантаження.

Також виникає необхідність виконати розрахунок сили притиску підпружиненої планки. Розрахунок підпружиненої планки подамо, як консольну листову пружину прямокутного перерізу, на яку діє еквівалентне навантаження, що створює прогин δ . Для консольної балки відповідно до класичних залежностей опору матеріалів [11] з зосередженим навантаженням на кінці вираховується за формулою:

$$F = \frac{3EI\delta}{L^3} \quad (2)$$

де E – модуль пружності матеріалу планки;
 b – ширина планки;
 h – товщина планки;
 L – робоча довжина пружної ділянки;
 δ – необхідний прогин.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3)$$

Потрібний прогин можна пов'язати з компенсуючим кутом:

$$\delta \approx L \tan(\alpha_{пл}) \quad (4)$$

Зусилля притиску вираховуємо для планки з вуглецевої сталі ($E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па) з розмірами ($L = 0,06$ м; $b = 0,02$ м; $h = 0,003$ м) та $\alpha_{пл} = 1,8^\circ$, що дорівнює:

$$F = \frac{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 4,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,00188}{(0,06)^3} \approx 2,47 \cdot 10^2 \text{ Н}$$

$$F \approx 250 \text{ Н}$$

За двох симетричних планок сумарний притиск може сягати $F \approx 500$ Н (без урахування втрат на тертя та реальної схеми контакту), що є достатнім для додаткового догинання полиць у зоні кутового формоутворення.

Для двокутного згинання додаткова компенсаційна дія підпружинених планок має створювати додатковий вигинаючий момент у полицях заготовки, а він у першому наближенні масштабується як:

- по товщині t^2 бо опір згину росте пропорційно квадрату товщини;

- по ширині притиску уздовж лінії згину b .

Тому для прогнозу потрібного зусилля притиску залежно від товщини та ширини листа необхідно забезпечити компенсацію пружного

відхилення підпружинених планок, які повинні створювати додаткове зусилля для формування керованої пластичної деформації полиць заготовки на завершальній стадії двокутного згинання [12]. Величина цього зусилля визначається жорсткістю заготовки на згин, яка залежить від товщини листа та довжини лінії згину (ширини притиску).

З урахуванням класичних співвідношень опору згину листових матеріалів прийнято, що необхідне притискне зусилля масштабуються пропорційно ширині ділянки притиску b та квадрату товщини заготовки t . У такому разі прогнозуючи залежність можна подати у вигляді:

$$F_{прит}(t, b) = F_0 \left(\frac{b}{b_0}\right) \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 \quad (5)$$

де F_0 – відоме базове притискне зусилля, визначене експериментально або розрахунково для еталонних значень товщини t_0 і ширини b_0 .

Формула (5) дозволяє виконати прогноз для діапазону товщин 0,5 – 6 мм та ширин притиску 10 - 200 мм.

Отримані результати приведені на графіку (рисунк 4) показують, що зі збільшенням товщини листа у два рази необхідне притискне зусилля зростає приблизно у чотири рази, тоді як подвоєння ширини ділянки згину призводить до пропорційного, тобто двократного, збільшення зусилля. Це пояснюється різким зростанням жорсткості заготовки на згин, та із збільшенням її товщини та лінійною залежністю опору деформації від довжини лінії прикладання навантаження.

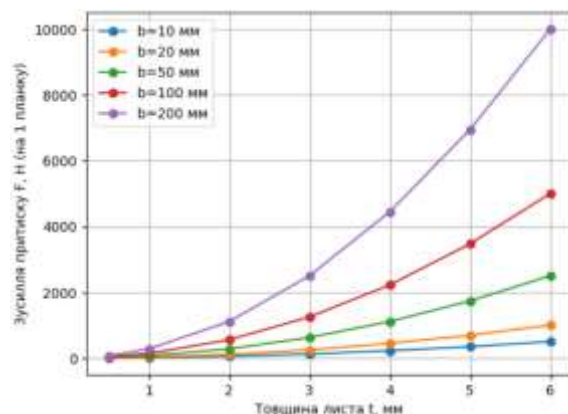
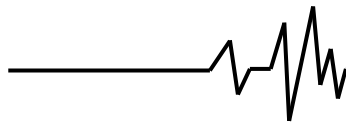


Рис. 4. Зусилля притиску прогнозоване для деталей різної товщини та ширини

Аналіз впливу геометричних і механічних параметрів заготовки на величину необхідного притискного зусилля показав, що для товстих і широких листів потрібне суттєво більше зусилля притиску підпружинених компенсуючих планок порівняно з тонкими та вузькими заготовками. Цю залежність слід обов'язково враховувати на етапі проектування штампової оснастки.



Запропонована емпірично-аналітична залежність може слугувати інженерною методикою для попереднього визначення раціональних значень жорсткості пружних елементів та їх геометричних параметрів. Остаточне уточнення притискного зусилля рекомендується проводити експериментальним шляхом з обов'язковим урахуванням конкретної марки матеріалу, радіуса згинання, коефіцієнтів тертя в зонах контакту, а також особливостей взаємодії інструменту із заготовкою.

Розроблено конструкцію одноопераційного штампа для двокутового згинання, оснащеного підпружиненими планками білінійної (двосегментної) форми. Кожна планка складається з двох прямолінійних ділянок, одна з яких виконана під кутом, що відповідає прогнозованій або експериментально визначеній величині пружного повернення матеріалу заготовки (рисунок 5).

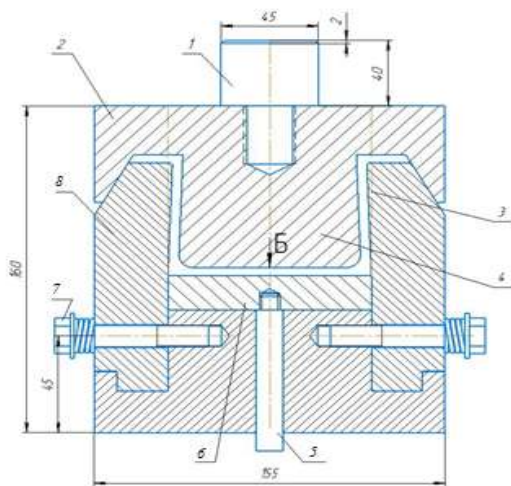


Рис. 5. Схема удосконаленого штампового оснащення: 1 – хвостовик; 2 – верхня плита; 3 – пружні планки; 4 – пуансон; 5 – напрямний виштовхувач; 6 – нижня упорна плита; 7 – гвинт кріплення планки; 8 – планка

Планки виготовляються з високовуглецевої інструментальної сталі, а кут нахилу робочої ділянки встановлюється рівним величині пружного повернення, характерній для даного матеріалу та умов деформування. Під час робочого ходу пуансона вниз виштовхувач опускається, звільняючи пружні планки, які поступово притискають вертикальні полиці заготовки до бічних поверхонь пуансона, створюючи контрольоване додаткове навантаження. На зворотному ході виштовхувач виводить сформовану деталь із робочої зони матриці.

Розроблена конструкція штампа розрахована на формування кутів згину 90° . Послідовність етапів двокутового згинання з використанням підпружинених компенсуючих елементів представлена на рисунку 6.

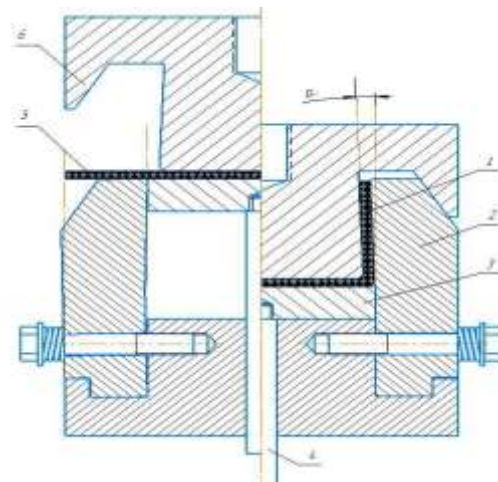


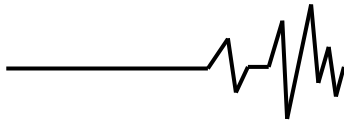
Рис. 6. Схема процесу двокутового згинання з використанням підпружинених компенсуючих планок: 1 – деталь, 2 – пружна планка, 3 – нижня упорна плита, 4 – виштовхувач, 5 – деталь, 6 – пуансон

У процесі руху пуансона вниз відбувається послідовне звільнення пружних планок, які здійснюють активне догинання вертикальних полиць, щільно притискаючи їх до пуансона. Така схема забезпечує додаткову контрольовану пластичну деформацію в критичних зонах згину, що спрямована на повну або часткову компенсацію пружного повернення після розвантаження.

Експериментальне підтвердження ефективності розробленого оснащення показало, що застосування підпружинених компенсуючих планок дозволяє отримати номінальний кут згину 90° за одну технологічну операцію. Без використання планок фактичний кут після розвантаження становив $91,8^\circ$, тоді як із застосуванням запропонованої конструкції досягнуто значення $90,0^\circ$ (повна компенсація пружного повернення для досліджуваного матеріалу). Отримані результати свідчать про можливість усунення потреби в додаткових калібрувальних операціях, що суттєво підвищує продуктивність і знижує собівартість виготовлення деталей.

Висновки. Дослідження підтвердило, що пружне відхилення є основним чинником, який обмежує точність П-, V- та S-подібних деталей при двокутовому згинанні. Його величина зумовлена поєднанням пружних і пластичних деформацій, немонотонністю напруженого стану по товщині заготовки та деформаційним зміцненням матеріалу.

Аналіз відомих рішень показав, що більшість способів компенсації пружного відхилення пов'язані зі складними та дорогими конструкціями штампів або додатковими операціями, що знижує економічну ефективність процесу.



Запропонований спосіб із застосуванням штампу з підпружиненими планками забезпечує компенсацію пружного відхилення без калібрування за рахунок створення додаткової керованої деформації полиць заготовки на завершальній стадії згинання.

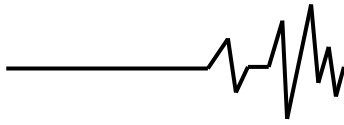
Експериментально встановлено, що при використанні підпружинених планок кут 90° досягається за одну операцію без залишкового відхилення, тоді як без них спостерігається збільшення кута через пружне відхилення. Запропонований метод є простим, надійним і економічно доцільним, що робить його перспективним для одиничного та дрібносерійного виробництва. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку аналітичної методики розрахунку параметрів білінійних планок з урахуванням властивостей різних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Калпакчієв С. В. Обробка металів тиском. Київ : Вища школа, 2006. 512 с.
2. Погорілий Л. В. Машина та обладнання для листового штампування. Київ : Урожай, 2005. 368 с.
3. Воронін М. О. Технологія холодного штампування. Львів : Афіша, 2010. 304 с.
4. ISO 6892-1:2019. Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.
5. ISO 7438:2020. Metallic materials – Bend test.
6. Lange K. Handbook of Metal Forming. New York : McGraw-Hill, 1985. 1200 p.
7. Marciniak Z., Duncan J., Hu S. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 320 p.
8. Hosford W., Caddell R. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. 4th ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 320 p.
9. Wagoner R., Chenot J.-L. Metal Forming Analysis. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 368 p.
10. Groover M. Fundamentals of Modern Manufacturing. 6th ed. Hoboken : Wiley, 2020. 1050 p.
11. ASM Handbook. Vol. 14A: Metalworking: Bulk Forming. ASM International, 2005. 894 p.
12. Wagoner R., Chenot J.-L. Metal Forming Analysis. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 368 p.
13. Матвійчук В. А. Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування: Теорія і практика обробки матеріалів тиском. АТ «Мотор Січ»: Монографія. 2016. С. 339 – 363.
14. Веселовська Н.Р., Турич В.В., Руткевич В.С. Контактна взаємодія інструмента з деталлю у процесах поверхневого пластичного деформування з ультразвуком. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2 (85). С. 51 – 58.

References

1. Kalpakchiyev, S.V. (2006). Obrobka metaliv tyskom. [Metalworking by pressure]. Kyiv : Vyshcha shkola,. 512. [in Ukrainian].
2. Pohorilyy, L.V. (2005). Mashyny ta obladnannya dlya lystovoho shtampuvannya. [Machines and equipment for sheet metal forming]. Kyiv : Urozhay, 368[in Ukrainian].
3. Voronin, M.O. (2010). Tekhnolohiya kholodnoho shtampuvannya. [Cold forming technology]. L'viv : Afisha,. 304. [in Ukrainian].
4. ISO 6892-1:2019. (2019). Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. [in English].
5. ISO 7438:2020. (2020). Metallic materials – Bend test. [in English].
6. Lange, K. (1985). Handbook of Metal Forming. New York : McGraw-Hill, 1200 p. [in English].
7. Marciniak, Z., Duncan, J., Hu, S. (2002). Mechanics of Sheet Metal Forming. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 320 p. [in English].
8. Hosford, W., Caddell, R. (2011). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. 4th ed. Cambridge : Cambridge University Press, 320 p. [in English].
9. Wagoner, R., Chenot, J.-L. (2001). Metal Forming Analysis. Cambridge : Cambridge University Press, 368 p. [in English].
10. Groover, M. (2020). Fundamentals of Modern Manufacturing. 6th ed. Hoboken : Wiley, 1050 p. [in English].
11. ASM Handbook. (2005). Vol. 14A: Metalworking: Bulk Forming. ASM International, 894 p. [in English].
12. Wagoner, R., Chenot, J.-L. (2001). Metal Forming Analysis. Cambridge : Cambridge University Press, 368 p [in English].
13. Matviychuk, V.A. Mikhalevich, V.M. (2016). Rozvytok protsesiv lokal'noho deformuvannya: Teoriya i praktyka obrobky materialiv tyskom. AT «Motor Sich». [Development of processes of local deformation: Theory and practice of processing materials by pressure. JSC "Motor Sich"]. Monograph, P. 339-363. [in Ukrainian].
14. Veselovska, N.R., Turych, V.V., Rutkevich, V.S. (2017). Kontaktna vzayemodiya instrumenta z detallyu u protsesakh poverkhnevoho plastychnoho deformuvannya z ul'trazvukom. [Contact interaction of the tool with



the part in the processes of surface plastic deformation with ultrasound]. *Vibrations in engineering and technology*. № 2 (85). P. 51–58. [in Ukrainian].

RESEARCH INTO THE POSSIBILITY OF COMPENSATING FOR ELASTIC RETURN DURING TWO-ANGLE BENDING USING A STAMP WITH SPRING-LOADED STRIPS

Springback is one of the key factors that significantly reduce the achievement of geometric accuracy of parts obtained by sheet bending, especially in the case of forming profiles with two bending angles. The magnitude of springback is determined by the combined effect of the elastic and plastic characteristics of the material, the thickness of the workpiece, the degree and pattern of deformation, the geometric parameters of the tool, as well as the contact conditions in the bending zone.

In industrial practice, accurate prediction of the magnitude of springback remains a difficult but priority task, which necessitates the use of additional technological measures to achieve the specified accuracy: calibration operations, the use of complex adjustable dies, special temperature regimes (for example, preheating of the tooling) or modified deformation conditions. Such approaches lead to a complication of the technological process and an increase in the cost of production.

The article investigates the effectiveness of springback compensation during double-angle bending by using a special design of a die equipped with spring-

loaded clamping strips. The proposed solution provides continuous controlled pressing of the workpiece to the punch surface throughout the bending cycle and creates additional controlled plastic deformation aimed at compensating for angular deviation after load removal.

The spring-loaded strips are made of carbon steel and have a geometry optimized in accordance with the expected value of springback of a specific workpiece material. The punch is made with a corresponding compensation notch, which contributes to the formation of the target angle taking into account the predicted deviation. The design is designed to form right angles of bending.

The results of theoretical modeling and experimental research of the double-angle bending process using the developed die equipment are presented. It has been established that the use of spring-loaded clamping strips allows to significantly reduce, and in many cases – to practically completely eliminate, elastic return, ensuring the production of parts with specified angular parameters in one technological operation without the need for subsequent calibration.

The proposed method is distinguished by its structural simplicity, economic feasibility and high prospects for application in single and small-scale production.

Keywords: sheet metal stamp, punch, two-angle bending, springback, spring-loaded clamping strips, elasticity compensation, bending accuracy, sheet metal stamping.

Відомості про авторів

Бабин Ігор Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

Луц Павло Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

Штуць Андрій Анатолійович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Babyn Ihor – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

Luts Pavlo – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 1, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua). ORCID 0000-0002-3776-8940.

Shtuts Andrii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Стаття надійшла 28.11.2025

Стаття прийнята 10.12.2025

Опубліковано 25.12.2025