

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

МІРЗАК ВОЛОДИМИР ЯКОВИЧ



УДК 621.98.04

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТОНКОЛИСТОВОГО РОЗДІЛОВОГО
ШТАМПУВАННЯ МЕХАНІЧНИМ КОМПЕНСАТОРОМ
ПОХИБОК СИСТЕМИ «ПРЕС-ШТАМП»**

Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кременчук – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі обробки металів тиском та спецтехнологій Центральноукраїнського національного технічного університету Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник **Боков Віктор Михайлович**,
кандидат технічних наук, професор кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій, Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: **Кухар Володимир Валентинович**,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України

Хорольський Володимир Леонідович,
кандидат технічних наук, старший викладач кафедри транспортних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Захист відбудеться «30» червня 2017 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.06 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: 39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського за адресою: 39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20.

Автореферат розісланий « 27 » травня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 45.052.06, д.т.н., проф.



В. М. Чебенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Експлуатаційні характеристики електротехнічних, радіотехнічних та електронних виробів з тонколистового матеріалу значною мірою залежать від якості останніх, зокрема від точності штампування та величини задирки. Так, наприклад, похибки внутрішнього та зовнішнього діаметрів пластин магнітопроводів у електродвигунах призводять до нерівномірності повітряного зазору між статором і ротором, а наявність задирки та її нерівномірність розташування по контуру розділення – до погіршення електромагнітних характеристик набраного пакету. Тому виникає потреба в їх додатковій непродуктивній чистовій механічній обробці або застосуванні операцій зачищення.

Показано, що джерелом біля 60 % похибок, що впливають на втрату якості, є система «прес–штамп». Існує багато пристроїв компенсації похибок системи «прес–штамп» (наприклад, плаваючі хвостовики, вузли переміщення, еластичні компенсатори тощо), але їх ефективність під час штампування деталей підвищеної точності (сьомий, шостий квалітети) є недостатньою. У роботі пропонується та розвивається ідея про можливість використання механічних компенсаторів для суттєвого зменшення зазначених похибок.

У зв'язку з зазначеним вище робота, що спрямована на підвищення якості тонколистового розділового штампування із застосуванням механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» на прикладі пластин магнітопроводів, є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувалися на підставі госпдоговірних і пошукових тем внутрішньовузівського фінансування: госпдоговірних робіт «Разработка и внедрение устройства повышения работоспособности штампов при штамповке пластин магнитопроводов» № 01860121872), «Исследование и разработка устройств компенсации и штамповой оснастки для пробивки отверстий в деталях типа «Сопло»» (№ 01870012995), внутрішньовузівська науково-дослідна робота «Підвищення якості тонколистового розділового штампування механічним компенсатором похибок системи прес-штамп» (№ ДР 0113u003618), в яких автор брав участь як виконавець і відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – підвищення якості тонколистового розділового штампування шляхом застосування механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп».

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені наступні задачі:

- систематизувати причини втрати якості при тонколистовому розділовому штампуванні та оцінити вплив головних джерел похибок системи «прес–штамп»;
- виконати аналіз засобів компенсації похибок системи «прес–штамп»;
- запропонувати механічний компенсатор похибок системи «прес-штамп» як засіб підвищення якості тонколистового розділового штампування;

- розробити методику дослідження впливу механічного компенсатора на деформації напрямних колонок і нижньої плити блоку під навантаженням;
- розробити методику дослідження впливу механічного компенсатора на якість штампування;
- виконати моделювання показників міцності механічного компенсатора похибок системи «прес–штамп» із застосуванням методу скінчених елементів;
- виконати експериментальне дослідження якості розділового тонколистового штампування на механічному компенсаторі похибок системи «прес–штамп»;
- розробити та впровадити у виробництво способи та пристрої підвищення якості розділового тонколистового штампування.

Об'єкт дослідження – тонколистове розділове штампування.

Предмет дослідження – тонколистове розділове штампування із застосуванням механічного компенсатора похибок системи «прес–штамп» на прикладі пластин магнітопроводів.

Методи дослідження: теоретичні дослідження проводилися на основі загальних положень щодо якості розділового штампування за відомими методиками. Експериментальні дослідження проводилися методами прямих вимірів з використанням серійної тензометричної та осцилографічної апаратури. Для моделювання деформаційної картини механічного компенсатора і розрахунку показників міцності підп'ятника та нижньої плити використовувався метод скінчених елементів, який реалізовувався із застосуванням розрахункового модулю САПР SolidWorks. Розрахунок поліноміальних математичних моделей показників міцності деталей механічного компенсатора здійснювався з використанням пакету прикладних програм «Планування, регресія і аналіз моделей». Вплив механічного компенсатора на якість штампування (висоту задирки та відхилення розмірів) вивчався статистичними методами, зокрема побудовою гістограм і кривих розподілу розмірів за контуром вимірювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Уперше на моделі компенсатора похибок системи «прес–штамп» зі сферичною увігнутою опорою ковзання та провальним отвором установлено аналітичні зв'язки та виявлено вплив геометричних параметрів (відносної площі в плані сферичної опори F_k/F_z , радіусу сфери компенсатора R_k і внутрішнього радіусу сферичної опори в плані r_6) на показники міцності підп'ятника та нижньої плити (коефіцієнт запасу міцності, переміщення, відносну деформацію та напруження текучості його елементів під технологічним навантаженням). Це дозволило оптимізувати геометричні показники механічного компенсатора, тобто забезпечити його працездатність при номінальному зусиллі та мінімальній металоемності.

2. Доповнено наукові дані про істотний позитивний вплив механічного компенсатора на напружено-деформований стан елементів штампного блоку. Зокрема виявлено зменшення кутів повороту напрямних колонок у сім разів та деформації нижньої плити блока. Встановлено, що товщина плит штампних

блоків у діапазоні дослідження не впливає на величину деформації. Показано зниження радіальних зусиль на напрямні вузли штампа у 3,6 рази.

3. Уперше виявлено підвищення якості тонколистового розділового штампування при динамічному підстроюванні системи «прес–штамп» за допомогою механічного компенсатора похибок. Зокрема, для пластин магнітопроводів виявлено зменшення розкиду розмірів у 2,25–2,40 рази, підвищення щільності розподілу розмірів на 30–40 %, зменшення висоти задирки на 45–93 % і забезпечення більш рівномірного розподілу її за контуром, порівняно з даними без використання компенсатора.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблено та запропоновано спосіб тонколистового розділового штампування в системі «прес–штамп» з беззazorним напрямом рухливої частини штампа відносно нерухливої, згідно з яким штампування здійснюють з динамічним підстроюванням системи «прес–штамп» у напрямі збігання осі прикладання технологічного зусилля від преса з віссю, що проходить через центр тиску штампа, та дає змогу підвищити якість штампування за рахунок підвищення точності штампування на 1–3 квалітети та забезпечити більш рівномірний розподіл задирки за контуром (патент України на корисну модель № 70346, заявл. 07.11.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11);

- описано математичні моделі показників міцності механічного компенсатора зі сферичною увігнутою опорою ковзання та провальним отвором, які дозволяють керувати коефіцієнтом запасу міцності, переміщенням, відносною деформацією та напруженням текучості його елементів під технологічним навантаженням, і вказують шляхи оптимізації його геометричних параметрів;

- запропоновані та розроблені нові механічні компенсатори похибок системи «прес–штамп» і пристрої, які розширюють технологічні можливості та зменшують знос розділового інструменту при застосуванні штампів послідовної дії (патент України № 35305, опубл. 10.09.2008); покращують якість тонколистового розділового штампування та підвищують стійкість штампів при збереженні закритої висоти преса-автомата з нижнім приводом (патент України № 69662, опубл. 10.05.2012); розширюють технологічні можливості регулювання рівномірного зазору між розділовими пуансоном і матрицею на етапах складання та експлуатації штампа (патент України № 25571, опубл. 10.08.2007); здійснюють моніторинг деформаційного стану штампа в процесі технологічного навантаження в реальних умовах штампування (патент України № 32167, опубл. 12.05.2008);

- за результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено гаму механічних компенсаторів різного технологічного призначення для кривошипних пресів номінальним зусиллям 63, 250, 350, 400, 630 і 1000 кН відповідно. Промислові випробування компенсаторів на ряді підприємств показали підвищення якості тонколистового розділового штампування. Очікуваний річний економічний ефект від упровадження до виробництва одного механічного компенсатора складає 299250 грн.;

- запропоновані рекомендації щодо розробки технологічних процесів тонколистового розділового штампування деталей підвищеної якості;

– результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі на кафедрі "Обробка металів тиском та спецтехнології" ЦНТУ при виконанні курсових та дипломних проектів, магістерських робіт, а також при проведенні лекцій за дисциплінами "Конструювання та виготовлення штампів", "Просторове комп'ютерне моделювання та проектування систем ковальсько-штампувального виробництва", "Експериментальні дослідження в обробці металів тиском".

Особистий внесок здобувача. У результаті науково-дослідних робіт, матеріали яких опубліковані у співавторстві, автором проаналізовано вплив похибок системи «прес–штамп» на якість тонколистового розділового штампування, розроблена причинно-наслідкова діаграма втрати якості, проведено структурний аналіз пристроїв компенсації похибок, запропоновано механічний компенсатор похибок системи «прес-штамп» як засіб підвищення якості тонколистового розділового штампування, розроблено методику експериментальних досліджень механічного компенсатора, виконано оптимізацію геометричних параметрів механічного компенсатора похибок, досліджено вплив механічного компенсатора на якість тонколистового розділового штампування, запропоновані нові технічні рішення та розроблені технічні рекомендації щодо підвищення якості тонколистового розділового штампування. Разом з науковим керівником сформульовано мету та задачі дослідження. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, викладено у списку праць.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на розширеному науковому семінарі кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій Кіровоградського національного технічного університету (м. Кропивницький, протокол № 1 від 8.11.2016 р.) та об'єднаного семінару при кафедрі технології машинобудування КрНУ ім. М. Остроградського, на другій міжвузівській науково-практичній конференції «Проблемы прочности, надежности и долговечности деталей и конструкций» (1987, м. Кіровоград), а також на міжнародних науково-технічних конференціях «Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні і металургії» (1999–2001, м. Краматорськ; 2000, м. Краматорськ–Слов'янськ), на міжнародній науково-технічній конференції «Новые методы и средства исследования процессов и машин обработки металлов давлением» (2005, м. Краматорськ), на VI міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» (2014, м. Харків), на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Кіровоградського національного технічного університету (1996–2016 р.р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в одній монографії, 11 наукових публікаціях (з них 10 у провідних фахових виданнях України) і 2 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференції. Отримано 15 авторських свідоцтв, 6 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти

розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 240 сторінок, у тому числі 124 сторінки основного тексту, 62 рисунка і 14 таблиць, з яких 36 рисунків та 3 таблиці розміщено на 29 окремих сторінках, списку використаних джерел з 138 найменувань на 16 сторінках і 3 додатків на 67 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність науково-технічної проблеми, висвітлено її зв'язок з науковими програмами та темами. Наведено загальну характеристику, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Наведено інформацію про апробацію матеріалів дисертації, а також про структуру роботи.

У **першому розділі** показано, що в точному машинобудуванні, приладобудуванні, радіоелектронній промисловості суттєва номенклатура деталей виготовляється з матеріалу товщиною до одного міліметра методами тонколистового розділового штампування. За такої товщини технологічний процес розділення матеріалу стає надто чутливим до дії зовнішніх і внутрішніх чинників і потребує своєчасного реагування. Проблемою якості розділового тонколистового штампування та компенсацією похибок системи «прес–штамп» займалися такі відомі вчені, як Романовський В. П., Шенкар В. С., Зубцов М. Є., Смірнов-Аляєв Г. А., Михаленко Ф. П., Ковальов В. Г., Титаренко Н. І., Качанов А. П., Мовшович І. Я., Mikkers I. C., Ланской Є. Н., Рудман Л. І., Кухарь В. В. та інші. На підставі проведеного аналізу причин втрати якості при тонколистовому розділовому штампуванні та оцінювання впливу головних джерел похибок системи «прес–штамп» розроблено діаграму причинно-наслідкових зв'язків втрати якості при тонколистовому розділовому штампуванні (рис. 1), що побудована за принципом відомої діаграми Ісікави. Діаграма дозволяє не тільки систематизувати причини втрати якості, але й показує їх взаємозв'язок, оцінює відсотковий вплив головних джерел похибок, а також указує на шляхи ефективного підвищення якості тонколистового розділового штампування. Із діаграми видно, що джерелом 60 % похибок, які впливають на якість тонколистового розділового штампування, є штамп і пов'язаний з ним прес. Вони утворюють систему «прес–штамп», що потребує компенсації похибок.

Проведений аналіз засобів компенсації похибок системи «прес–штамп» показав, що питання керування якістю штампування тонколистових матеріалів у вітчизняній промисловості досліджені недостатньо. Потребується подальше вдосконалення засобів компенсації в напрямі обґрунтування вибору типу пристрою компенсації, оптимізації його геометричних параметрів із забезпеченням показників міцності робочих деталей та універсальності застосування.

Із великої кількості засобів компенсації похибок системи «прес–штамп» найбільш перспективним для підвищення якості тонколистового розділового штампування є механічний компенсатор, який реалізує принцип динамічного підстроювання, запропонований автором, і відрізняється широкою універсальністю застосування.

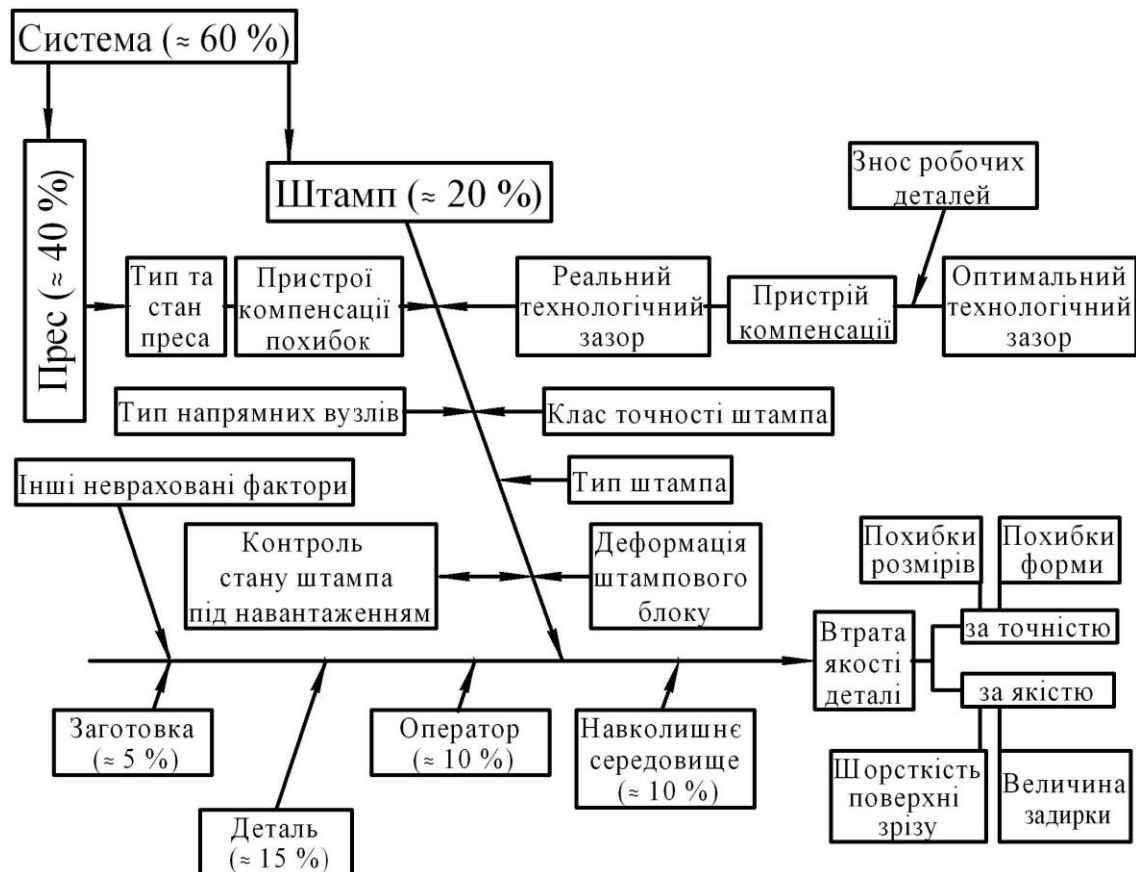


Рис. 1. Діаграма причинно-наслідкових зв'язків втрати якості тонколистового розділового штампування

Отже, головним напрямом дослідження є підвищення якості тонколистового розділового штампування шляхом застосування механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп». Виходячи із сучасного стану проблеми, сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** виконано вибір і обґрунтування напрямків і методів дослідження. Основними параметрами якості тонколистового розділового штампування є точність штампування та величина задирки, які суттєво залежать від похибок системи «прес–штамп». Для підвищення якості штампування розділовий штамп установлювався на механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп». Деформаційні та коливальні процеси в системі «прес–штамп» мають певну специфіку. Деталі і вузли системи працюють при змінних динамічних навантаженнях і мають складну геометричну форму. Саме тому вивчення роботи і оптимізація геометричних параметрів механічного компенсатора здійснювалося двома методами:

– методом скінчених елементів, який реалізовувався із застосуванням розрахункового модулю САПР SolidWorks, – для моделювання деформаційної картини механічного компенсатора похибок системи «прес–штамп» і розрахунку показників міцності підп'ятника та нижньої плити;

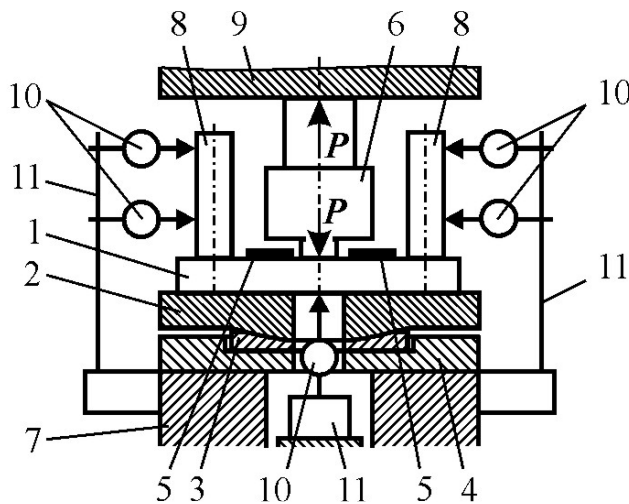


Рис. 2. Схема визначення деформації напрямних колонок та нижньої плити блока при встановленні на компенсатор: 1 – нижня плита; 2 – верхня рухома плита зі сферичною п'ятою; 3 – підп'ятник; 4 – нижня опорна плита; 5 – тензодатчик; 6 – гідравлічний навантажувач; 7 – стіл преса; 8 – напрямна колонка; 9 – повзун преса; 10 – індикатор годинникового типу; 11 – індикаторна стійка

Для живлення тензорезисторів і посилення сигналу розбалансу моста використовувався тензопідсилювач «Топаз 3–02» з числом вимірювальних каналів 10. Реєстрація вимірювання відбувалася на фотопапір шлейфовими осцилографами К12–22 і НО–41 з використанням гальванометрів з магнітним заспокоєнням.

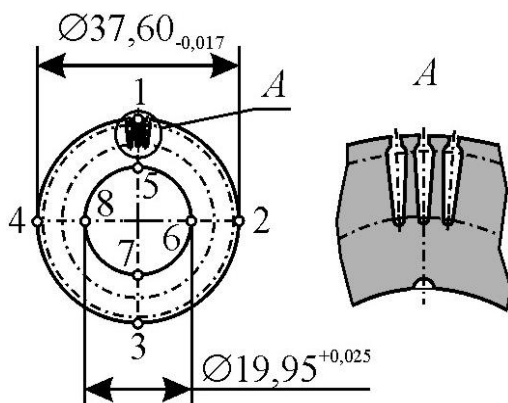


Рис. 3. Схема виміру висоти задирки пластини ротора

$S = 0,35$ мм. Розмір партії – 140 штук. Далі деталі вимірювалися на трьохкоординатній вимірювальній машині з цифровою видачею інформації. З метою виключення прогину в момент вимірювання, деталь встановлювалася на магнітну підставку. Виміри величини задирки проводилися пасаметром з ціною поділки шкали 0,002 мм. Результати вимірів статистично оброблялися в такій

– тензометричним методом для виявлення реальної картини напруженого стану штампових блоків під навантаженням при встановленні на механічний компенсатор (рис. 2) та без компенсатора,

Як первинні перетворювачі використовувалися дрові тензорезистори на паперовій основі типу 2ПКБ з базами 5, 10, 15 і 20 мм, з опором 100 і 200 Ом. Тензорезистори наклеювалися клеєм БФ–2, БФ–4 або ціакриновим на поверхню робочих і напрямних елементів штампів і на балки рівного опору за напівмостовою та мостовою схемами в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Для дослідження якості тонколистового штампування (показників точності штампування та величини задирки) використовувалися різноманітні експериментальні та робочі штампи для штампування пластин магнітопроводів (рис. 3) в умовах виробництва без компенсатора та з компенсатором.

Дослідження величини відхилення розмірів внутрішнього та зовнішнього контурів пластини ротора здійснювалося на експериментальному штампі суміщеної дії. Використовувалися штаби із залізонікелевого сплаву 50Н (пермалоя) товщиною

послідовності: значення висоти задирок розбивали на вибірки з 10 вимірами в кожній; визначали середнє значення вибірок. Для оцінки випадкової помилки окремого виміру розраховували значення середньоквадратичного відхилення, визначали ширину довірчого інтервалу за критерієм Ст'юдента. Розміри, що не

Таблиця 1 – Характеристика з'єднання елементів механічних компенсаторів

Код	Схема з'єднання z, L_z, Π_z x, L_x, Π_x y, L_y, Π_y	Характеристика з'єднання	Компенсація деформацій переміщення L_x, L_y, L_z та поворотів Π_x, Π_y, Π_z					
			L_x	L_y	L_z	Π_x	Π_y	Π_z
0		Плоска опора, нерухоме з'єднання	+	-	-	-	-	-
1		Плоска опора ковзання, рухоме з'єднання	+	+	+	-	-	+
2		Плоска опора кочення, рухоме з'єднання	+	+	+	-	-	+
3		Плоска опора з проміжним еластичним середовищем, рухоме з'єднання	+	+	+	-	-	+
4		Сферична вогнута опора ковзання, рухоме з'єднання	+	-	-	+	+	+
5		Сферична випукла опора ковзання, рухоме з'єднання	+	-	-	+	+	+
6		Сферична вогнута опора кочення, рухоме з'єднання	+	-	-	+	+	+
7		Сферична випукла опора кочення, рухоме з'єднання	+	-	-	+	+	+

потрапили до довірчого інтервалу, відкидалися. Розміри, що залишилися, підсумовувалися та знову визначалося середнє значення вибірки.

Дослідження виконувалися на експериментальній установці на базі однокривошипного двостоякового пресу моделі КД2126Е, номінальним зусиллям 400 кН з використанням механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп».

У третьому розділі приведено визначення та системний аналіз елементів структури механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп», правило кодування конструкції, оптимізація

виду, моделювання показників міцності та деформаційної картини.

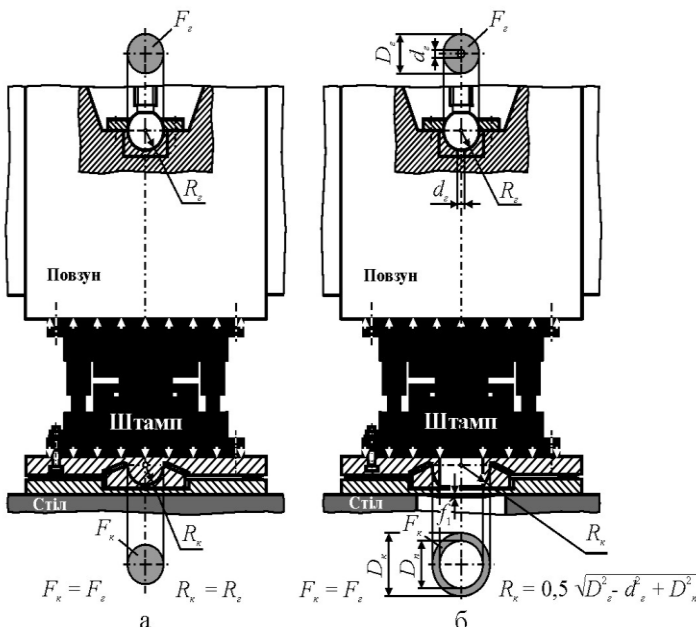


Рис. 4. До обґрунтування вибору мінімального радіуса підп'ятника механічного компенсатора з сферичною увігнутою поверхнею ковзання: а – без провального отвору; б – з провальним отвором

Деформація L_x, L_y, L_z системи «прес-штамп» відбувається шляхом розміщення їх елементів за осями x, y, z , а також шляхом їх повороту Π_x, Π_y, Π_z навколо цих осей. Тому, для зорення «ідеального» компенсатора обхідно компенсувати всі можливі види деформації.

Компенсація деформації системи «прес-штамп» може здійснюватися за допомогою з'єднань певних елементів компенсатора (табл. 1), так одне з'єднання не може одночасно компенсувати всі види переміщення.

На підставі системного аналізу елементів структури, запропоновано правило кодування та схеми основних механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп». Показано, що з усіх компенсаторів найбільший науковий та практичний інтерес становить компенсатор зі сферичною уві-

гнутою опорою ковзання (рис. 4), який є не тільки універсальним, але й, за інших рівних умов, має найменшу деформацію нижньої плити.

З метою оптимізації показників міцності та моделювання деформаційної картини механічного компенсатора зі сферичною увігнутою опорою ковзання та провальним отвором для кривошипного пресу моделі КД2126Е (рис. 5), запропонована та реалізована методика побудови їх математичних моделей, яка містить розрахунок показників міцності підп'ятника та нижньої плити з використанням методу скінчених елементів, що реалізовувався із застосуванням розрахункового модулю САПР SolidWorks, та побудову трифакторних поліноміальних математичних моделей (табл. 2, рис. 6) з використанням пакету прикладних програм «Планування, регресія і аналіз моделей».

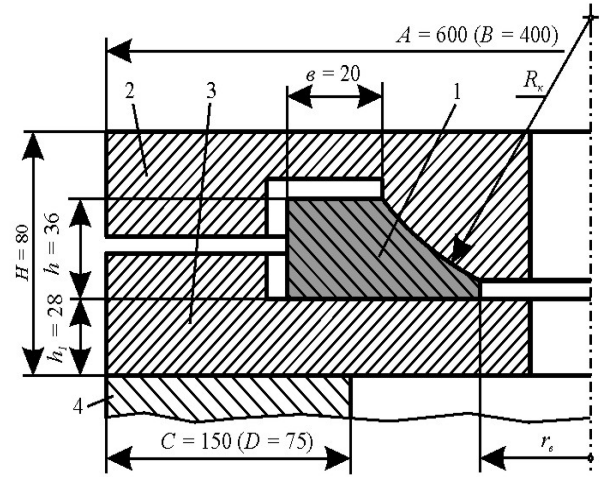


Рис. 5. Розрахункова схема до визначення оптимальних геометричних параметрів підп'ятника (F_{κ}/F_2 , R_{κ} , r_6) механічного компенсатора: 1 – підп'ятник; 2 – верхня плита; 3 – нижня плита; 4 – стіл пресу

Таблиця 2 – Математичні моделі показників міцності елементів механічного компенсатора

Елемент	Математична модель
Підп'ятник	Коефіцієнт запасу міцності n (Y_1) $y_1 = 13,91 - 2,18x_1x_3 + 2,01x_1 + 1,34x_3 + 0,83x_2x_3 + 0,83x_2$
	Переміщення під навантаженням Δz (Y_2), мм $y_2 = 1,367 - 0,516x_3 - 0,497x_1 + 0,475x_1x_3 - 0,0882x_2x_3 - 0,055x_2 - 0,033x_1x_2$
	Відносна деформація δ (Y_3) $y_3 = 0,0115 + 0,00225x_1x_3 - 0,002x_1 - 0,00175x_3 - 0,00075x_2$
	Напруження текучості σ (Y_4), МПа $y_4 = 27,81 + 5,617x_1x_3 - 4,885x_1 - 4,076x_3 - 1,505x_2$
Нижня плита	Коефіцієнт запасу міцності n_n (Y_5) $y_5 = 15,27 + 5,681x_3 + 4,044x_1 + 0,501x_2x_3$
	Переміщення під навантаженням Δz_n (Y_6), мм $y_6 = 1,383 - 0,707x_3 - 0,575x_1 + 0,379x_1x_3 - 0,047x_2x_3 - 0,044x_1x_2 - 0,033x_2$
	Відносна деформація δ_n (Y_7), $y_7 = 0,0126 - 0,005375x_3 - 0,004375x_1 + 0,002625x_1x_3$
	Напруження текучості σ_n (Y_8), МПа $y_8 = 30,555 - 12,802x_3 - 10,3025x_1 + 6,61x_1x_3 - 0,5625x_2x_3$
Чинники: F_{κ}/F_2 (X_1) – відносна площа в плані сферичної опори; R_{κ} (X_2), мм – радіус сфери компенсатора; r_6 (X_3), мм – внутрішній радіус сферичної опори.	
Масштабні співвідношення чинників: $x_1 = 0,667(X_1 - 5,5)$; $x_2 = 0,0333(X_2 - 370)$; $x_3 = 0,0333(X_3 - 80)$	

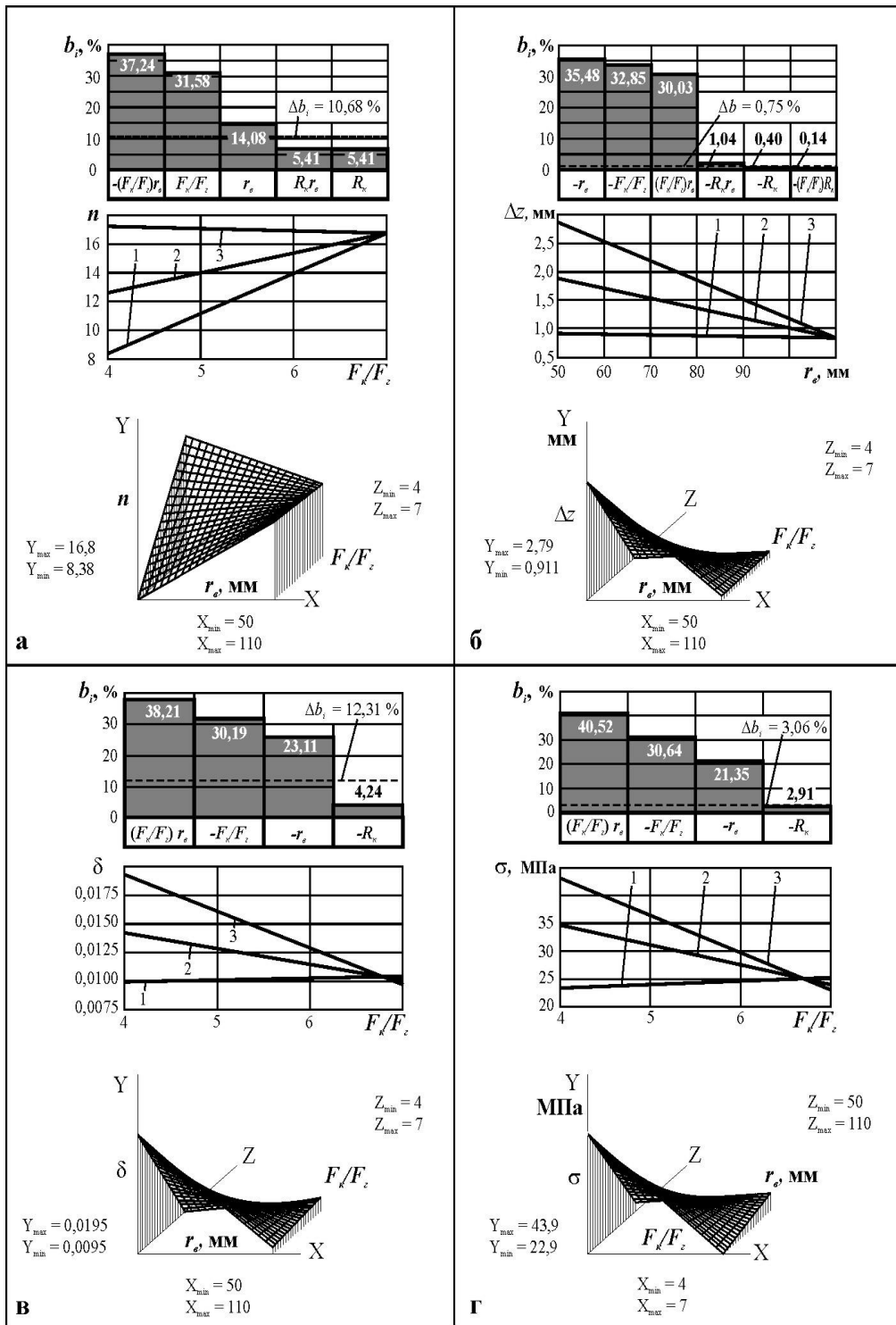


Рис. 6. Ступінь впливу чинників на показники міцності під'ятника як елемента механічного компенсатора: а – коефіцієнт запасу міцності n ; б – переміщення під навантаженням Δz ; в – відносна деформація δ ; г – напруження текучості σ , МПа

Отримані математичні моделі показників міцності даного виду механічного компенсатора дозволили визначити наступні його оптимальні геометричні параметри: $F_k/F_z = (F_k/F_z)_{max} = 7$; $R_k = (R_k)_{max} = 400$ мм та $r_e = (r_e)_{max} = 110$ мм. Дані параметри забезпечують наступні найкращі показники міцності механічного компенсатора: $n = n_{max} = 18$; $\Delta z = \Delta z_{min} = 0,632$ мм; $\delta = \delta_{min}$

$= 0,008$; $\sigma = \sigma_{min} = 19,72$ МПа. Результати моделювання підтверджуються епіюрами напружено-деформованого стану механічного компенсатора та візуалізацією його деформаційної картини (рис. 7).

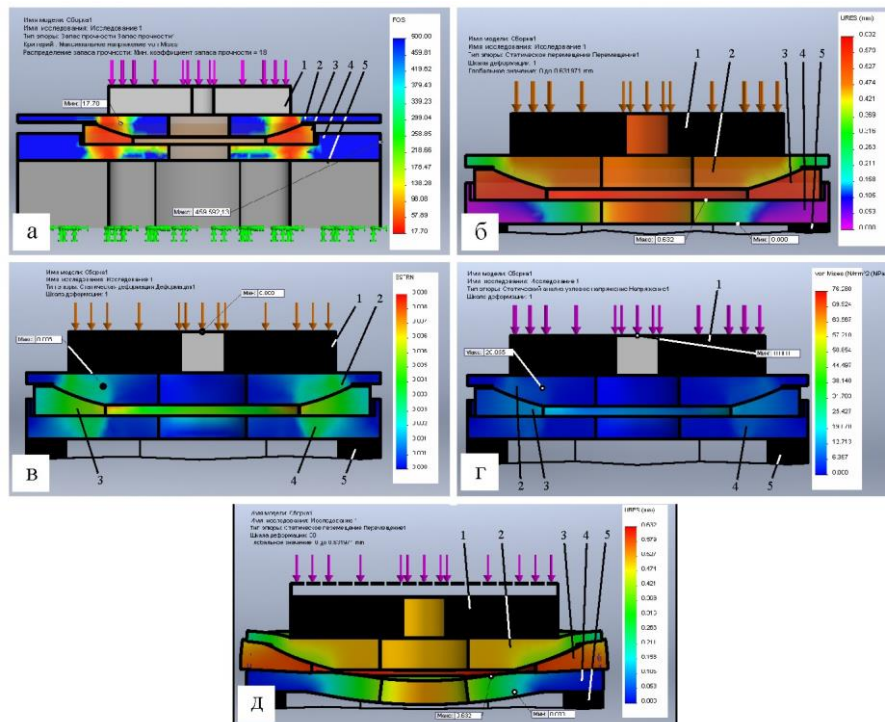


Рис. 7. Епіюри розподілу коефіцієнта запасу міцності (а), переміщення (б), відносної деформації (в), напруження текучості (г) і деформаційна картина механічного компенсатора при збільшенні переміщення в 30 разів (д): 1 – плита штампа; 2 – верхня плита; 3 – підп’ятник; 4 – нижня плита; 5 – стіл преса

Саме зазначений компенсатор використовувався для подальших експериментальних досліджень якості розділового тонколистового штампування.

У **четвертому розділі** наводяться дослідження деформаційної картини штампового блоку під навантаженням та впливу механічного компенсатора на якість штампування пластин ротора. Результати досліджень характеру переміщень і деформацій елементів штампового блоку без компенсатора та з компенсатором похибок системи «прес–штамп» наведено на рис. 8, де α , β – кути повороту колонок, відповідно в площинах $X-Z$ та $Y-Z$ при закріпленні плити прихоплювачами; γ , δ – кути повороту колонок, відповідно, в площинах $X-Z$ та $Y-Z$ без закріплення плити прихоплювачами; ε_1 , ε_2 – деформація плити, відповідно, з прихоплювачами та без прихоплювачів; f_1 , f_2 – прогин плити, відповідно, з прихоплювачами та без прихоплювачів.

Виявлено позитивний вплив механічного компенсатора на напружено-деформований стан елементів штампового блоку, що приводить до істотної зміни деформаційної картини системи «прес–штамп»: спостерігається зменшення кутів повороту напрямних колонок у сім разів; деформація плит практично не спостерігається і не змінюється із зростанням зусилля навантаження; товщина плит штампових блоків у діапазоні дослідження не впливає на величину деформації. Показано (рис. 9), що радіальні зусилля на напрямні вузли штампа при

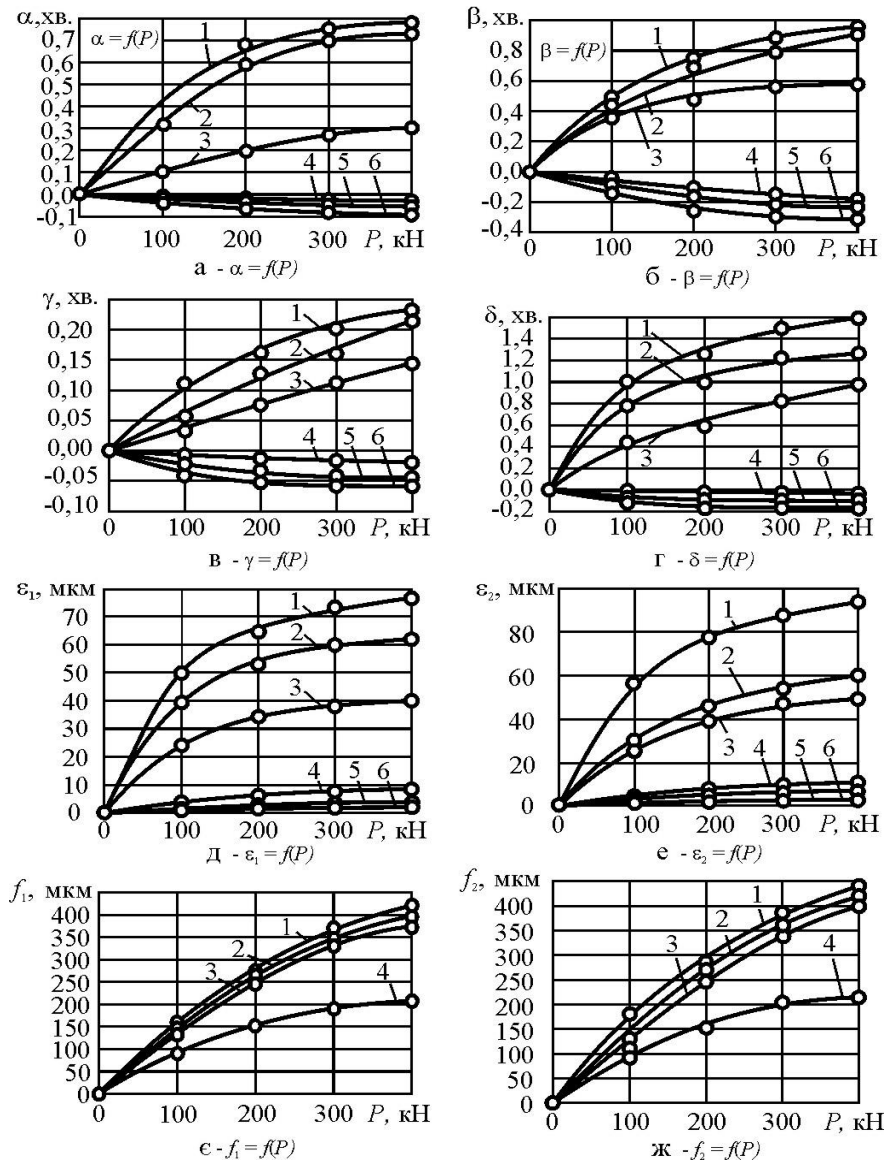


Рис. 8 – Залежність кутів повороту колонок, деформацій та прогину плити від зусилля навантаження P : криві 1, 2, 3 – без компенсатора; криві 4, 5, 6 – з компенсатором; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – відповідно, h – 34, 39, 44, 44, 39, 34 мм

встановленні на механічний компенсатор під дією технологічного зусилля знижуються у 3,6 рази, порівняно з даними без використання компенсатора. Вплив механічного компенсатора на зміну висоти задирки ΔS за внутрішнім і зовнішнім контурами вивчався при штампуванні пластин ротора. З метою порівняння отриманих результатів, штампування здійснювалося при встановленні штампа на компенсатор та без нього. За даними дослідження побудовані залежності висоти задирки від номера вибірки для різних точок зовнішнього та внутрішнього контурів деталі (рис. 10). Результати аналізу середньої задирки для різних умов штампування наведені в табл. 3.

Як бачимо, практично для всього периметра, як за зовнішнім, так і за внутрішнім контурами пластини ротора, спостерігається значне зниження висоти задирки ΔS при встановленні штампа на компенсатор у порівнянні з встановленням штампа без компенсатора. Так, для точок зовнішнього контуру середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор складає 14 мкм, а при встановленні штампа без компенсатора – 27 мкм, що на 93 % більше. Для точок внутрішнього контуру середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор складає 20 мкм, а при встановленні штампа без компенсатора – 29 мкм, що на 45 % більше. Розподіл висоти задирки за периметром контурів пластин, що вирубуються та пробиваються, більш рівномірний при встановленні штампа на компенсатор, що свідчить про зменшення амплітуди динамічного зазору.

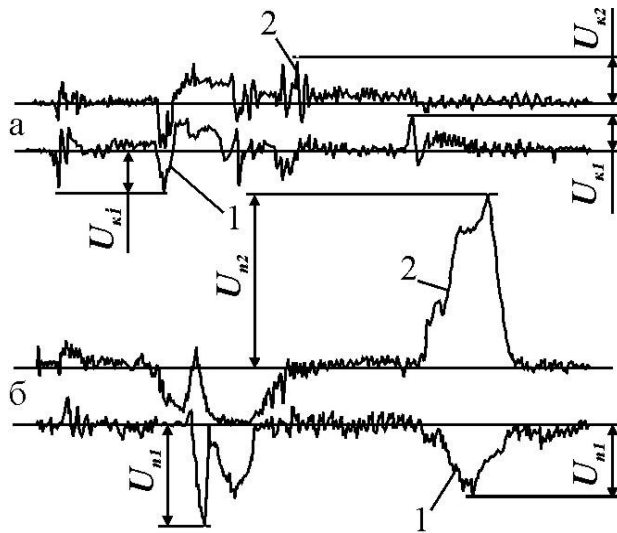


Рис. 9. Осцилограми деформацій напрямних колонок при встановленні штампа на механічний компенсатор (а) та без компенсатора (б): 1 – деформація поперек напрямку штампування; 2 – деформація уздовж напрямку штампування

Вплив механічного компенсатора на відхилення розмірів пластин ротора вивчався за допомогою гістограм та теоретичних кривих розподілу розмірів діаметрів внутрішнього (рис. 11) та зовнішнього контурів пластин ротора при роботі штампа з компенсатором та без нього з урахуванням напрямку прокатування матеріалу заготовки.

Зафіксовано покращення якості штампування пластин ротора з використанням механічного компенсатора, порівняно зі штампуванням без нього. Так, розмах відхилення розмірів пластини ротора поперек прокатування і уздовж прокатування при встановленні штампа на механічний компенсатор у 2,25–2,40 рази

менше, ніж при встановленні штампа без компенсатора.

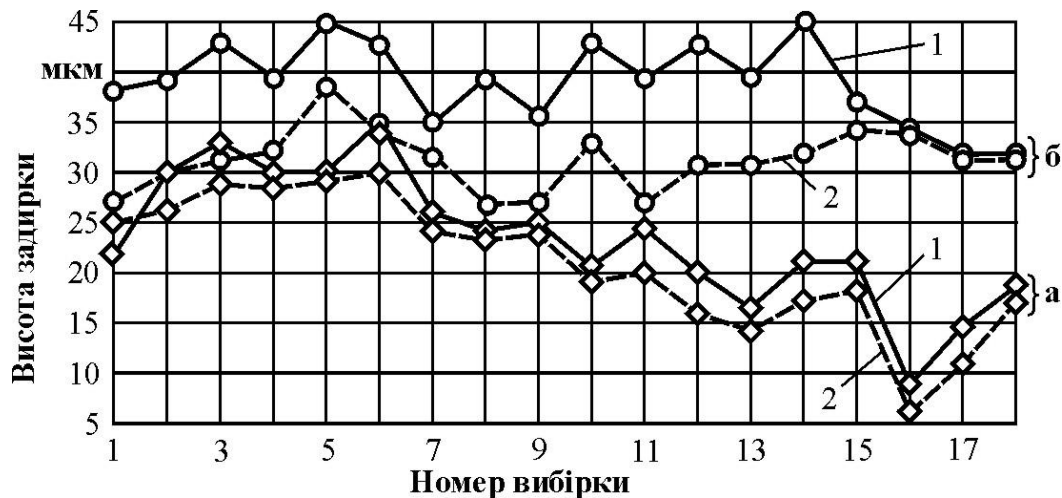


Рис. 10. Залежність висоти задирки від номеру вибірки для зовнішнього (у точці 1) і внутрішнього (у точці 5) контурів пластини ротора при встановленні штампа на компенсатор (а) і без нього (б): 1 – внутрішній контур; 2 – зовнішній контур; $\circ$ – без компенсатора; $\diamond$ – з компенсатором

Таблиця 3 – Середня висота задирки в точках вимірювання пластини ротора

Спосіб встановлення штампа	Середня висота задирки, мкм							
	Точки зовнішнього контуру				Точки внутрішнього контуру			
	Т. 1	Т. 2	Т. 3	Т. 4	Т. 5	Т. 6	Т. 7	Т. 8
На компенсатор	21	9	13	15	23	16	19	21
Без компенсатора	31	29	21	29	38	26	25	27

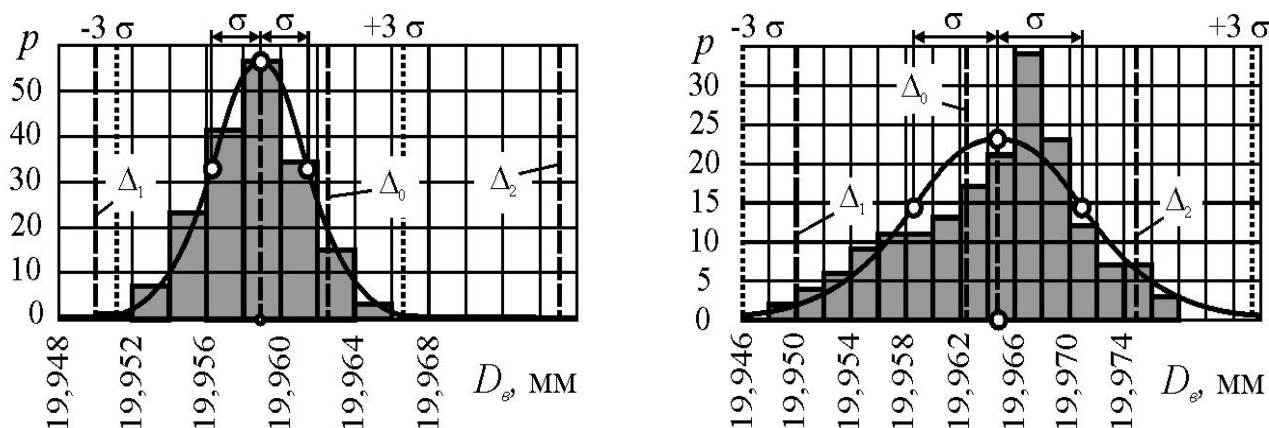


Рис. 11. Гістограми та теоретичні криві нормального розподілу розмірів внутрішнього D діаметра пластини ротора після штампування поперек прокатування: а – встановлення штампа на компенсатор; б – встановлення штампа без компенсатора; Δ_0 , Δ_1 , Δ_2 – відповідно, номінальне значення, нижня межа, та верхня межа поля допуску; p – частота спостережень

Окрім того, встановлено, що щільність розподілу розмірів пластин ротора при встановленні штампа на механічний компенсатор на 30–40 % вища, ніж при встановленні штампа без компенсатора. Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» з метою підвищення якості тонколистового розділового штампування.

У п'ятому розділі за результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновані нові технічні рішення, які спрямовані на: підвищення якості тонколистового розділового штампування; розширення технологічних можливостей механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» (рис. 12); підвищення стійкості розділового інструменту та керування точністю отриманих деталей внаслідок автоматичного регулювання величини

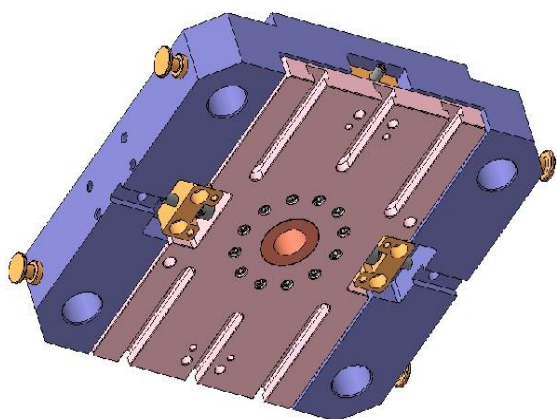


Рис. 12 – Універсальний механічний компенсатор для кривошипного преса-автомата з нижнім приводом номінальним зусиллям 400 кН

зазору в процесі штампування по мірі зношування бічних поверхонь спряженої пари цього інструменту; здійснення моніторингу деформаційного стану штампа в процесі технологічного навантаження в реальних умовах штампування.

Розроблено гаму механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» для кривошипних пресів різного технологічного призначення, які показали підвищення якості тонколистового розділового штампування.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена *актуальна науково-технічна проблема*, – підвищення якості тонколистового розділового штампування шляхом застосування механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп».

Основні результати дисертаційних досліджень полягають у наступному:

1. Експлуатаційні характеристики електротехнічних, радіотехнічних та електронних виробів з тонколистового матеріалу значною мірою залежать від якості останніх, зокрема від точності штампування та величини задирки. Із запропонованої діаграми причинно-наслідкових зв'язків втрати якості витікає, що джерелом біля 60 % похибок є система «прес–штамп». Існує багато способів і пристроїв компенсації похибок системи «прес–штамп» (наприклад, плаваючі хвостовики, вузли переміщення, еластичні компенсатори тощо), але їх ефективність при штампуванні деталей підвищеної точності (7-ий, 6-ий квалітети) є недостатньою. Пропонується ідея використання механічних компенсаторів для суттєвого зменшення даних похибок. Тому робота, що спрямована на підвищення якості тонколистового розділового штампування із застосуванням механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» на прикладі пластин магнітопроводів є актуальним науково-практичним завданням.

2. Виконаний структурний аналіз засобів компенсації похибок системи «прес–штамп». Запропоновано новий спосіб підвищення якості тонколистового розділового штампування за рахунок динамічного підстроювання системи «прес–штамп» в напрямку збігання осі прикладання технологічного зусилля від пресу з віссю, що проходить через центр тиску штампа, який реалізується шляхом експлуатації штампа на механічному компенсаторі й є високоефективною альтернативою традиційним способам штампування.

3. Запропонована методика (з використанням пакету прикладних програм «Планування, регресія і аналіз моделей») та отримано математичні моделі показників міцності механічного компенсатора зі сферичною увігнутою опорою ковзання та провальним отвором, які дозволяють ефективно керувати коефіцієнтом запасу міцності n , переміщенням Δz , відносною деформацією δ та напруженням текучості σ його елементів під технологічним навантаженням, і вказують шляхи оптимізації його геометричних параметрів. За допомогою даних моделей визначено такі оптимальні геометричні параметри механічного компенсатора для кривошипного пресу моделі КД2126Е: відносна площа в плані сферичної опори $F_k/F_z = (F_k/F_z)_{max} = 7$, радіус сфери компенсатора $R_k = (R_k)_{max} = 400$ мм та внутрішній радіус сферичної опори в плані $r_e = (r_e)_{max} = 110$ мм. Дані параметри забезпечують наступні найкращі показники його міцності: $n = n_{max} = 18$ (обмеження за підп'ятником); $\Delta z = \Delta z_{min} = 0,632$ мм (обмеження за підп'ятником); $\delta = \delta_{min} = 0,008$ (обмеження за підп'ятником); $\sigma = \sigma_{min} = 19,72$ МПа (обмеження за підп'ятником). Отримані показники міцності підтверджуються результатами моделювання напружено-деформованого стану механічного компенсатора із застосуванням метода скінченних елементів в

розрахунковому модулі САПР SolidWorks.

4. Виявлено позитивний вплив механічного компенсатора на напружено-деформований стан елементів штампного блоку, що приводить до істотної зміни деформаційної картини системи «прес–штамп»: спостерігається зменшення кутів повороту напрямних колонок у сім разів; деформація плит практично не спостерігається і не змінюється із зростанням зусилля навантаження; товщина плит штампних блоків у діапазоні дослідження не впливає на величину деформації. Показано, що радіальні зусилля на напрямні вузли штампа суміщеної дії для штампування пластин ротора при встановленні на механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп» під дією технологічного зусилля знижуються у 3,6 рази, порівняно з даними без використання компенсатора.

5. Зафіксовано покращення якості штампування пластин ротора з використанням механічного компенсатора, порівняно зі штампуванням без нього. Так, розмах відхилення розмірів пластини ротора поперек прокатування і уздовж прокатування при встановленні штампа на механічний компенсатор у 2,25–2,40 рази менше, ніж при встановленні штампа без компенсатора. Крім того, встановлено, що щільність розподілу розмірів пластин ротора при встановленні штампа на механічний компенсатор на 30–40 % вища, ніж при встановленні штампа без компенсатора. Експериментально виявлено значне зниження висоти задирки при встановленні штампа на механічний компенсатор при штампуванні пластин ротора за зовнішнім та внутрішнім контурами. Так, для точок зовнішнього контуру середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор складає 14 мкм, а при встановленні штампа без компенсатора – 27 мкм, що на 93 % більше. Для точок внутрішнього контуру середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор складає 20 мкм, а при встановленні штампа без компенсатора – 29 мкм, що на 45 % більше. Розподіл висоти задирки за периметром контурів пластин, що вирубуються та пробиваються, більш рівномірний при встановленні штампа на компенсатор, що свідчить про зменшення амплітуди динамічного зазору. Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» з метою підвищення якості тонколистового розділового штампування.

6. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновані нові технічні рішення, спрямовані на: підвищення якості тонколистового розділового штампування; розширення технологічних можливостей механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп»; підвищення стійкості розділового інструменту та керування точністю отриманих деталей внаслідок автоматичного регулювання величини зазору в процесі штампування у міру зношування бічних поверхонь спряженої пари цього інструменту; здійснення моніторингу деформаційного стану штампа в процесі технологічного навантаження в реальних умовах штампування. Розроблено гаму механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» різного технологічного призначення для кривошипних пресів номінальним зусиллям 63, 250, 350, 400, 630 і 1000 кН відповідно. Промислові випробування

даних компенсаторів на низці підприємств показали підвищення якості тонколистового розділового штампування. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво одного механічного компенсатора для тонколистового розділового штампування складає 299250 грн.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Мірзак В. Я. Компенсатори похибок пресів: [монографія] / В. Я. Мірзак, В. М. Боков. – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 148 с. ISBN 978-617-7079-52-0.

Наукові статті у фахових виданнях України, занесених до міжнародної наукометричної бази Scopus:

2. Мирзак В. Я. Устройство для определения параметров точности кривошипных прессов при нагружении / В. Я. Мирзак, А. П. Качанов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003. – № 6. – С. 22–25. *Здобувачем розроблено пристрій для виміру відхилення переміщення повзуна під навантаженням.*

3. Качанов А. П. Повышение стойкости разделительных штампов за счет использования механических компенсаторов / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 4. – С. 18–22. *Здобувачем розроблено та досліджено оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес-штамп».*

4. Мірзак В. Я. Вплив механічного компенсатора похибок на якість тонколистового розділового штампування / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/7 (78). – С. 10–15. *Здобувачем розроблено методіку та вивчено вплив механічного компенсатора на напружено-деформований стан нижньої плити блоку та відхилення розмірів пластин ротора.*

Наукові статті, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

5. Мирзак В. Я. Исследование влияния способа установки и крепления штампового блока на его жесткость и металлоёмкость / В. Я. Мирзак, А. П. Качанов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : збір. наук. праць. – Краматорськ : ДМА, 1999. – С. 251–255. *Здобувачем розроблено оснащення, проведені експериментальні дослідження та опрацьовані отримані результати.*

6. Мірзак В. Я. Аналіз схем компенсації похибок системи “прес-штамп” / В. Я. Мірзак, А. П. Качанов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : збір. наук. праць. – Краматорськ–Слов’янськ, 2000. – С. 415–421. *Здобувачем проаналізовано існуючі схеми компенсації похибок системи «прес-штамп» і розроблений класифікатор елементарних ланок.*

7. Мирзак В. Я. Управление точностью и качеством штампованных деталей с применением встроенной в штамп системы компенсации погрешностей прессового оборудования / В. Я. Мирзак, А. П. Качанов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : збір. наук. праць. – Краматорськ, 2000. – С. 430–435. *Здобувачем розроблено та досліджено вбудовані в штамп системи компенсації.*

8. Мірзак В. Я. Прогнозування точності штампованих виробів при виконанні розділових операцій з тонколистового матеріалу / В. Я. Мірзак, А. П. Качанов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : збір. наук. праць. – Краматорськ, 2001. – С. 454–460. *Здобувачем розроблений класифікатор похибок системи прес-штамп.*

9. Мірзак В. Я. Моделювання показників міцності механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп» із застосуванням метода скінченних елементів / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Техніка в сільсько-господарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збір. наук. праць. – Кіровоград : КНТУ, 2014. – Вип. 27. – С. 3–12. *Здобувачем розроблені скінченно-елементні моделі напружено-деформованого стану елементів механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп».*

10. Мірзак В. Я. Підвищення якості розділового тонколистового штампування / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Вісник національного технічного університету «ХПІ» : збір. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Вип. № 43. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – С. 89–97 (*Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*). *Здобувачем розроблені діаграма причинно-наслідкових зв'язків втрати якості тонколистового розділового штампування, методики дослідження та проведені експериментальне дослідження впливу способу штампування на якість штампування.*

11. Мірзак В. Я. Засоби динамічного моніторингу якості тонколистового розділового штампування в системі «прес-штамп» / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збір. наук. праць. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – Вип. 28. – С. 46–57. *Здобувачем розроблені засоби динамічного моніторингу якості тонколистового розділового штампування в системі «прес-штамп».*

12. Мірзак В. Я. Принцип динамічного підстроювання як спосіб підвищення якості тонколистового розділового штампування / В. Я. Мірзак, В. М. Боков / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 46. – Кіровоград : КНТУ, 2016. – С. 245–258. *Здобувачем запропоновано та досліджено принцип динамічного підстроювання як спосіб підвищення якості тонколистового розділового штампування.*

Праці апробаційного характеру:

13. Мірзак В. Я. Контроль точності пресового обладнання під навантаженням / В. Я. Мірзак, А. П. Качанов // Труды Международной научно-

технической конференции «Новые методы и средства исследования процессов и машин обработки металлов давлением». – Краматорськ : ДМА, 2005. – С. 402–408. *Здобувачем спроектований пристрій контролю точності пресового обладнання під навантаженням.*

14. Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: Тезисы докл. VI Международной науч.-технич. конф. (ноябрь 2014) / отв. ред. Ю. О. Плеснецов. – Харьков: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2014. – С. 45. *Здобувачем розроблено методіку та досліджено механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

Авторські свідоцтва, патенти, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. А. с. 1324736 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Узел самоцентрирования пуансона относительно матрицы / А. П. Качанов, В. И. Рубан, В. Я. Мирзак, (СССР). – № 4008822/31–27; заявл. 17.01.86; опубл. 23.07.87, Бюл. № 27. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

16. А. с. 1371751 СССР, МКИ В 21 J 13/02, В 30 J 15/02, В 21 J 37/00. Узел крепления штампа к столу прессы / А. П. Качанов, В. С. Запорожченко, В. Я. Мирзак (СССР). – № 4109980/31–27; заявл. 15.08.86; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

17. А. с. 1418064 СССР, МКИ В 30 В 15/00. Устройство для измерения отклонения перемещения ползуна вертикальной прессовой установки / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко, В. А. Мельник (СССР). – № 4186495/31–27; заявл. 28.01.87; опубл. 23.08.88, Бюл. № 31. *Здобувачем розроблений пристрій для виміру відхилення переміщення повзуна.*

18. А. с. № 1489898 СССР, МКИ В 21 D 37/04. Штамп для холодной листовой штамповки / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко, Ю. М. Романов, В. И. Рубан (СССР). – № 4326849/31–27; заявл. 11.11.87; опубл. 30.06.89, Бюл. № 24. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп», що вбудований в блок швидкозмінного кріплення.*

19. А. с. 1539079 СССР, М. Кл. В 30 В 15/00, В 30 В 15/28. Компенсатор неравномерности нагружения штампа вертикальной прессовой установки с кривошипно-шатунным исполнительным механизмом привода ползуна / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. И. Рубан, В. С. Запорожченко, П. С. Щеглюк, И. Б. Яковер (СССР). – № 4416576/31–27; заявл. 28.04.88; опубл. 30.01.90, Бюл. № 4. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

20. А. с. 1616838 СССР, М. Кл. В 30 В 15/02. Компенсатор неравномерности нагружения штампа к прессу / В. С. Запорожченко, А. П.

Качанов, В. Я. Мирзак (СССР). – № 4662656/25-27; заявл. 16.03.89; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

21. А. с. 1579624 СССР, М. Кл. В 21 J 13/02. Штамп для холодной объёмной штамповки / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко, А. С. Ляховецкий (СССР). – № 4473482/25-27; заявл. 15.08.88; опубл. 23.07.90, Бюл. № 27. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп», що вбудований в штамп.*

22. А. с. № 1606350, СССР, МКИ В 30 В 15/02. Штамподержатель вертикальной прессовой установки / А. П. Качанов, В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко (СССР). – № 4656987/25-27; заявл. 18.01.89; опубл. 15.11.90, Бюл. № 42. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

23. А. с. 1696320 СССР, М. Кл. В 30 В 15/28. Компенсатор неравномерности нагружения штампа вертикальной прессовой установки / В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко, А. П. Качанов (СССР). – № 4746073/27; заявл. 06.10.89; опубл. 07.12.91, Бюл. № 45. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

24. А. с. 1646896 СССР, М. Кл. В 30 В 15/00. Устройство для компенсации погрешностей кузнечно-прессового оборудования / А. П. Качанов, В. И. Рубан, В. С. Запорожченко, В. Я. Мирзак (СССР). – № 4708477/27; заявл. 22.06.89; опубл. 07.05.91, Бюл. № 17. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

25. А. с. 1710350 СССР, МКИ В30 В 15/28. Компенсатор неравномерности нагружения штампа / А. П. Качанов, В. С. Запорожченко, В. Я. Мирзак (СССР). – № 4765667/27; заявл. 06.12.89; опубл. 07.02.92, Бюл. № 5. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

26. А. с. 1712031 СССР, М. Кл. В 21 D 28/14. Способ листовой штамповки и устройство для его осуществления / А. П. Качанов, В. И. Рубан, В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко (СССР). – № 4708457/27; заявл. 22.06.89; опубл. 15.02.92, Бюл. № 6. *Здобувачем розроблений спосіб листового штампування та пристрій для його здійснення.*

27. А. с. 1759654 СССР, М. Кл. В 30 В 15/00, В 30 В 15/28. Компенсатор неравномерности нагружения штампов / В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко, А. П. Качанов (СССР). – № 4893434/27; заявл. 25.12.90; опубл. 07.09.92, Бюл. № 33. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

28. А. с. № 1754476 А1 СССР, МКИ В 30 В 15/00. Вертикальный штамповочный пресс / В. С. Запорожченко, В. Я., Мирзак А. П. Качанов (СССР). – № 4844988/27; заявл. 28.06.90; опубл. 15.08.92, Бюл. № 30. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп», що вбудований в прес.*

29. А. с. № 1784484 А1 СССР, МКИ В 30 В 15/02. Устройство для настройки связанных направляющими колонками и втулками верхней и нижней частей штампа / А. П Качанов., В. Я. Мирзак, В. С. Запорожченко (СССР). – № 4828938/27; заявл. 25.05.90; опубл. 30.12.92, Бюл. № 48. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

30. Спосіб зміни величини зазору між пуансоном та матрицею розділового штампа: пат. 25571 Україна, МПК В21 D 28/00. / В. Я. Мирзак, В. М. Боков; власник Кіровоградський національний технічний університет. № u200704155; заявл. 16.04.2007; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12. *Здобувачем розроблено новий спосіб зміни величини зазору між пуансоном та матрицею розділового штампа.*

31. Пристрій для моніторингу деформаційного стану штампа в процесі технологічного навантаження: пат. 32167 Україна, МПК В30 В 15/00. / В. Я. Мирзак, В. М. Боков; власник Кіровоградський національний технічний університет. № u200713773; заявл. 10.12.2007; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9. *Здобувачем розроблені засоби динамічного моніторингу якості тонколистового розділового штампування в системі «прес–штамп».*

32. Компенсатор нерівномірності навантаження штампа: пат. 35305 Україна, МПК В30 В 15/28. / В. Я. Мирзак, В. М. Боков; власник Кіровоградський національний технічний університет. № u200804834; заявл. 14.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

33. Компенсатор нерівномірності навантаження штампа: Пат. 58333 Україна, МПК В30 В 15/20. / В. Я. Мирзак, В. М. Боков; власник Кіровоградський національний технічний університет. № u20101118; заявл. 20.09.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

34. Спосіб тонколистового розділового штампування в системі «прес–штамп» з беззазорним напрямком рухомої частини штампа відносно нерухомої: пат. 70346 Україна, МПК В26F1/40 / В. Я. Мирзак, В. М. Боков; власник Кіровоградський національний технічний університет. – № u201113040; заявл. 07.11.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11. *Здобувачем розроблено новий спосіб тонколистового розділового штампування.*

35. Компенсатор нерівномірності навантаження штампа: пат. 69662 Україна, МПК В30 В 15/00. / В. Я. Мирзак, В. М. Боков; власник Кіровоградський національний технічний університет. № u201112251; заявл. 19.10.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. *Здобувачем розроблений оригінальний механічний компенсатор похибок системи «прес–штамп».*

АНОТАЦІЯ

Мірзак В. Я. Підвищення якості тонколистового розділового штампування механічним компенсатором похибок системи «прес–штамп». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском. – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2017.

Дисертація присвячена підвищенню якості тонколистового розділового штампування шляхом застосування механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп». Показано, що 60 % втрат якості пов'язано з похибками системи «прес–штамп», а подальше підвищення якості – з компенсацією цих похибок. Запропоновано принцип динамічного підстроювання, реалізований шляхом експлуатації штампів на механічному компенсаторі. Запропонована методика оптимізації геометричних параметрів і моделювання деформаційної картини компенсатора для кривошипного пресу. Отримано математичні моделі, які дозволяють ефективно керувати показниками міцності та визначати оптимальні геометричні параметри компенсатора. Виявлено позитивний вплив компенсатора на напружено-деформований стан елементів штампного блоку, що приводить до істотної зміни деформаційної картини системи «прес–штамп». Зафіксовано покращення якості штампування пластин ротора з використанням компенсатора, порівняно зі штампуванням без нього. Запропоновані нові технічні рішення та проведені промислові випробування компенсаторів. Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес–штамп» для підвищення якості тонколистового розділового штампування.

Ключові слова: тонколистове штампування, механічний компенсатор, деформаційна картина, показники міцності, пластини магнітопроводів, похибки штампування, якість штампування, відхилення розмірів, висота задирки.

АННОТАЦИЯ

Мирзак В. Я. Повышение качества тонколистовой разделительной штамповки механическим компенсатором погрешностей системы «пресс–штамп». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского. – Кременчуг, 2017.

Диссертация посвящается повышению качества тонколистовой разделительной штамповки путём применения механических компенсаторов погрешностей системы «пресс–штамп». Из анализа предложенной диаграммы причинно-наследственных связей потери качества тонколистовой разделительной штамповки показано, что 60 % потерь качества связано с погрешностями системы «пресс–штамп», а дальнейшее повышение качества – с компенсацией этих погрешностей. Предложен принцип динамического подстраивания, включающий в себя эксплуатацию штампа на механическом компенсаторе – средстве для реализации способа повышения качества тонколистовой разделительной штамповки. На основании системного анализа структуры механического компенсатора погрешностей системы «пресс–штамп» как объекта исследо-

вания показано, что наибольший научный и практический интерес представляет компенсатор со сферической вогнутой опорой скольжения, являющийся не только универсальным, но и, при других одинаковых условиях, обладает наименьшей деформацией нижней плиты. Предложена методика оптимизации геометрических параметров механического компенсатора для кривошипного пресса модели КД2126Е, включающая построение математических моделей показателей прочности подпятника и нижней плиты с использованием метода конечных элементов, реализованный с использованием расчётного модуля САПР SolidWorks, и построения трехфакторных полиномиальных математических моделей с применением пакета прикладных программ «Планирование, регрессия и анализ моделей». Получены математические модели, позволяющие эффективно управлять коэффициентом запаса прочности n , перемещением Δz , относительной деформацией δ и напряжением текучести σ его элементов под технологической нагрузкой. Модели позволили определить такие оптимальные геометрические параметры механического компенсатора, как относительная площадь в плане сферической опоры компенсатора $F_{\kappa}/F_z = (F_{\kappa}/F_z)_{\max} = 7$, радиус сферы компенсатора $R_{\kappa} = (R_{\kappa})_{\max} = 400$ мм и внутренний радиус сферической опоры в плане $r_{\text{в}} = (r_{\text{в}})_{\max} = 110$ мм. Данные параметры обеспечивают наилучшие показатели его прочности (ограничение по подпятнику): $n = n_{\max} = 18$; $\Delta z = \Delta z_{\min} = 0,632$ мм; $\delta = \delta_{\min} = 0,008$, $\sigma = \sigma_{\min} = 19,72$ МПа. Именно этот компенсатор использовался для дальнейших экспериментальных исследований качества разделительной тонколистовой штамповки. Выявлено положительное влияние механического компенсатора на напряженно-деформированное состояние элементов штампового блока, приводящее к существенному изменению деформационной картины системы «пресс–штамп»: наблюдается уменьшение углов поворота направляющих колонок в семь раз; деформация плит практически не наблюдается и не изменяется с повышением усилия нагрузки; величины деформаций, как и в случае с уменьшением углов поворота колонок, на порядок ниже, по сравнению с установкой блоков без компенсатора; толщина плит штамповых блоков в диапазоне исследования не влияет на величину деформации. Зафиксировано улучшение качества штамповки пластин ротора с использованием механического компенсатора, по сравнению со штамповкой без него. Так, размах отклонения размеров пластины ротора поперек прокатки и вдоль прокатки при установке штампа на компенсатор в 2,25–2,40 раза меньше, чем при установке без компенсатора. Кроме того, установлено, что плотность распределения размеров пластин ротора при установке штампа на механический компенсатор на 30–40 % выше, чем при установке штампа без компенсатора. Экспериментально выявлено значительное снижение высоты заусенца по внешнему и внутреннему контурам пластин ротора при установке штампа на механический компенсатор. Так, для точек внешнего контура средняя высота заусенца при установке штампа на компенсатор составляет 14 мкм, а при установке штампа без компенсатора – 27 мкм, что на 93 % больше. Для точек внутреннего контура средняя высота заусенца при установке штампа на компенсатор составляет 20 мкм, а при установке штампа без компенсатора 29 мкм, что на 45 % больше. Распреде-

ление высоты заусенца по периметру контуров пластин, которые вырубаются и пробиваются, более равномерно при установке штампа на компенсатор, что свидетельствует об уменьшении амплитуды динамического зазора. По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены новые технические решения, направленные на повышения качества тонколистовой разделительной штамповки. Их промышленные испытания показали повышение качества.

Ключевые слова: тонколистовая штамповка, механический компенсатор, деформационная картина, показатели прочности, пластины магнитопроводов, погрешности штамповки, качество штамповки, отклонения размеров, высота заусенца.

ABSTRACT

Mirzak V.Y. Improvement of quality of thin plate separate blanking with the help of mechanical error compensator of the "press-stamp" system. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.03.05 – processes and machines for pressure treatment. Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University. – Kremenchuk, 2017.

Dissertation is devoted to the improvement of quality of thin plate separate blanking by the application of mechanical error compensators of the "press-stamp" system. It is shown that 60% of the loss of quality is due to the errors of the "the press-stamp" system and further improvement of the quality is connected with compensation of these errors. A dynamic adjustment principle is suggested which is realized by operating the die on a mechanical compensator. The methodology of optimization of geometrical parameters and modeling of the deformation pattern of the compensator for crank press was suggested. The mathematical models were worked out that allow controlling effectively the indicators of strength and determine the optimal geometric parameters of the compensator. A positive effect of the compensator on the stress-strain state of the stamp block elements was gained. That leads to a significant change in the deformation pattern of the "press-stamp" system. The improvement of quality blanking of the rotor plates using the compensator was fixed. New technical solutions were suggested and production testing of compensators was carried out. The result confirms the usefulness of application of mechanical error compensator in the "press-stamp" system for the improvement of quality of thin plate separate blanking.

Key words: Thin sheet stamping, mechanical compensator, deformation picture, strength indices, magnetic core plates, punching errors, punching quality, dimensional deviations, burr height.

Підписано до друку 20.05.17. Формат 60×84 1/16. Папір офсет.
Друк різнограф. Умов. друк. арк. 1,25. Тираж 100 прим. Зам № 0177.
Свідоцтво держ. реєстру ДК № 4470 від 17.01.2013 р.

ПП «Ексклюзив-Систем»
м. Кропивницький, вул.. Шевченка, 25
тел. 0522-24-35-53