

УДК 681.5.015.8

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.254.163>

Д. МОСЬПАН

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ПРЯМОЛІНІЙНИМИ РИФТАМИ

Предметом дослідження є технологічна лінія виготовлення товстостієвих деталей з рифтами, виготовленими з конструкційних і спеціальних сталей. **Мета роботи** – проаналізувати й створити методи управління основними технологічними операціями на всіх ланках технологічного процесу автоматизованого виготовлення таких деталей і на їх підставі сформулювати передумови розроблення локальних систем керування обладнанням, що забезпечує виконання операцій на кожному визначеному в цій роботі етапі технологічного процесу, а також визначити чинники побудови структури та алгоритму загальної системи керування, яка синхронізуватиме та контролюватиме весь технологічний процес. У статті розв'язуються такі **завдання**: створення моделей основних етапів формоутворення деталей з прямолінійними рифтами та керування динамічними властивостями обраних систем їх реалізації. Використовуються такі **методи**: чисельне інтегрування та розв'язання диференційних рівнянь; аналітичне розв'язання диференційних рівнянь на основі принципу Даламбера або способом використання рівняння Лагранжа; частотний аналіз передатних функцій окремих ланок, поданих у вигляді дробово-раціональних функцій. Досягнуто таких **результатів**: побудовано в першому наближенні склад та послідовність основних операцій узагальненого технологічного процесу автоматизованого виготовлення товстостієвих листових деталей з рифтами; за результатами аналізу процесу пружно-пластичної зміни форми ділянки з багатьма зв'язками визначено вхідні й вихідні параметри, необхідні для побудови моделі керування зазначеним процесом; з'ясовано, що для його реалізації потрібно забезпечити вільне деформування як мінімум 0,25 % площі поверхні рифту поза контактом із формоутворювальним інструментом, і запропоновано необхідні для цього технологічні методи; подано варіанти технічної реалізації обраних технологічних методів; наведено результати моделювання схем і режимів роботи необхідного технічного обладнання. **Висновки**. Застосування запропонованої структури, складу та послідовності основних операцій узагальненого технологічного процесу автоматизованого виготовлення товстостієвих листових деталей з рифтами на основі його реалізації обраними методами на запропонованому обладнанні забезпечить ефективне управління якістю виготовлення зазначених деталей на кожному етапі технологічного процесу.

Ключові слова: автоматизація технологічного процесу; моделювання основних етапів процесу й режимів роботи обладнання; система автоматичного керування; частотні характеристики.

Вступ

Автоматизація процесу виготовлення товстостієвих деталей із конструкційних і спеціальних сталей є актуальним завданням

сучасного машинобудування. У першому наближенні склад та послідовність основних операцій узагальненого технологічного процесу автоматизованого виготовлення таких деталей можна подати так, як зображено на рис. 1.

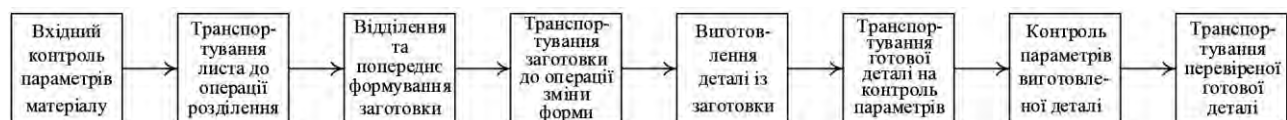


Рис. 1. Склад та послідовність операцій виготовлення деталі

Очевидно, що ключовим моментом є етап виготовлення деталі із заготовки, оскільки можливість його автоматизації та керування ним у реальному часі є вирішальною ланкою системи автоматизації всього процесу.

Аналіз проблеми й наявних методів

Процес виготовлення товстостієвих деталей щодо формоутворення деталей із прямолінійними рифтами детально розглянуто в роботі [1]. Зокрема автори уточнили радіуси кривизни

в меридіональному перерізі та довжину кінця рифту в зоні вільного вигину.

Унаслідок моделювання в праці [2] зроблено висновок про те, що в процесі формоутворення ребер можуть виникати дефекти у вигляді розривів. На вершинах центральних ребер з'являються суттєві стоншування матеріалу. На периферії між ребрами утворюються складки, що погіршують якість готової деталі й завищують вимоги до технологічного обладнання. Для згладжування складок потрібні додаткові зусилля.

У процесі моделювання виявлено, що на формування ребер суттєво впливає величина сил тертя. Так, наприклад, за мінімальних сил тертя матеріал заготовки вільно ковзає вздовж оснастки, запобігаючи надмірному розтягуванню матеріалу в ділянці центральних ребер. Але водночас мінімальні сили тертя зумовлюють значні переміщення матеріалу на периферії.

За умови формування без обважнення плоского елемента заготовки відбувається її руйнування в зоні спряження із кінцем рифту, у разі обважнення понад 8–10 % і формування-витягування по жорсткому пуансону руйнування не відбувається, але утворюються гофри в зоні спряження кінця рифту з плоским елементом. У процесі формування-витягування скороченим пуансоном частина кінця рифту (понад 70 %) формується вільно, розриву заготовки та утворення гофрів не спостерігається.

Було запропоновано такі рекомендації [2]:

– упровадити поетапне формоутворення ребер із проміжним відпадом;

– розглянути інші (неномінальні) геометричні параметри оснастки та готової деталі з метою зниження ступеня деформації;

– мінімізувати тертя між оснасткою та заготовкою.

Після експериментальної перевірки результатів моделювання (деформування здійснювалось на пресі УНМ-100 з відповідною оснасткою до моменту втрати стійкості фланця зразка) зроблено такі висновки:

– граничні відхилення експериментальних значень радіуса кривизни ділянки вільного вигину за умови довжини пуансона, що дорівнює довжині прямолінійного рифту без кінців, обчислені за поданою в роботі [2] залежністю, не перевищують 5 % і лежать в межах допуску на серійно виготовлені деталі. Запобігати утворенню гофрів у процесі штампування товстостієвих деталей можливо способом формування скороченим пуансоном, довжина якого відповідає довжині рифту без кінців,

плюс, як мінімум, 0,7 радіуса циліндричної ділянки рифту. У цьому разі розміри відформованого рифту відповідають заданим у межах дозволу;

– дія додаткових напружень вигину, пов'язаних із зміною радіуса кривизни формоутворювального інструмента є незначними.

У роботі [3] за результатами аналізу процесу пружно-пластичної зміни форми ділянки з багатьма зв'язками зроблений висновок, що для побудови моделі керування таким процесом можна визначити вхідні та вихідні параметри.

Вихідні параметри: швидкість деформації; контактні напруження вздовж осі руху пуансона. Для вимірювання та обчислення значень цих параметрів достатньо встановити на робочий орган преса акселерометр, що дасть змогу в режимі реального часу відстежувати й обчислювати обидва обраних вихідних параметри.

Вхідні параметри: сила, прикладена до заготовки; сили тертя, які перешкоджають витягуванню фланцевої частини заготовки; сили, що діють на заготовку з боку матриці (перетяжного ребра). Вимірювання та керування зазначеними параметрами може бути здійснено таким чином. Сила, прикладена до заготовки, може змінитися в потрібному діапазоні за допомогою використання керованої зустрічної (відповідно до напрямку дії пуансона) пружної дії з боку матриці, що розміщується на пружній основі, жорсткість якої можна змінювати в певних межах.

Аналогічно може бути вирішене питання керування силами, що діють на заготовку з боку матриці (перетяжного ребра).

Сили тертя, які перешкоджають витягуванню заготовки, також можуть відкоригованим способом керувати величиною сили притискання заготовки.

За інформацією з джерела [4] у процесі витягування циліндричних деталей на пресах подвійної дії з жорстким притисканням важливою є не величина тиску, а встановлення мінімально необхідного для певної товщини листа зазору між матрицею та притиском, який не защемлює заготовку, але запобігає утворенню зморшок.

Сили притискання для першого витягування циліндричних деталей з плоскої заготовки обчислюють за такою формулою [5]:

$$Q = 0,25\pi \left[D^2 - (d_1 + 2r_m)^2 \right], \quad (1)$$

де d_1 – діаметр витягування (матриці) на першій операції, мм;

r_m – радіус закруглення витяжної крайки, мм.

Значення, близькі до обчислених за формулою, дає номограма, зображена на рис. 2. Тиск притискання, знайдений за номограмою, визначається тими самими параметрами.

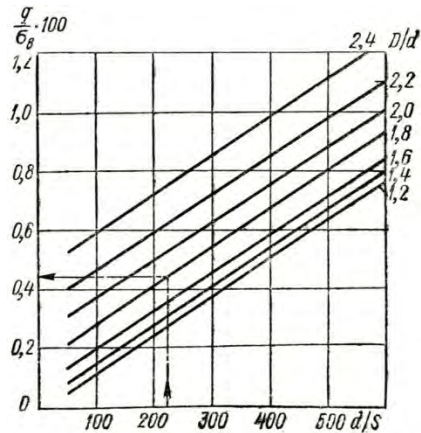


Рис. 2. Номограма для визначення тиску притискання залежно від d/s та D/d (для сталі 10)

Розв'язання завдання

Наведені вище результати аналізу можливості автоматизації етапу виготовлення товстостілової деталі із заготовки свідчать про те, що для його реалізації необхідно забезпечити вільне деформування як мінімум 0,25 % площі поверхні рифту поза контактом з формоутворювальним інструментом. Для цього рекомендовано застосовувати один або декілька з таких технологічних методів:

- 1) використання пристрою для створення перепаду тиску;
- 2) застосування скороченого пуансона;
- 3) керування силою тертя (тобто силою притискання або коефіцієнтом тертя).

Розглянемо можливі варіанти побудови систем автоматичного керування для кожного з наведених вище технологічних методів.

Застосування накладок з еластичного матеріалу

Запропонований у роботі [6] пристрій для створення перепаду тиску з допомогою накладок з еластичного матеріалу, закріплених на заготовці, зображений на рис. 3. Заготовка в цьому разі формується постійним тиском рідини або газу.

Для вирішення поставленого завдання формування товстостілової деталі з рифтами, замість еластичних накладок, можна застосувати спеціальну оснастку, у якій певні ділянки матриці матимуть змогу переміщуватись у напрямку руху пуансона й спиратимуться на основу з керованою пружністю.

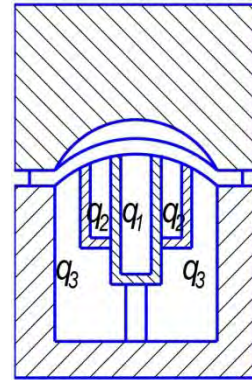


Рис. 3. Пристрій для створення перепаду тиску залежно від d/s та D/d (для сталі 10)

Такою основою можна використати гідроопору із системою активного силового керування (рис. 4).

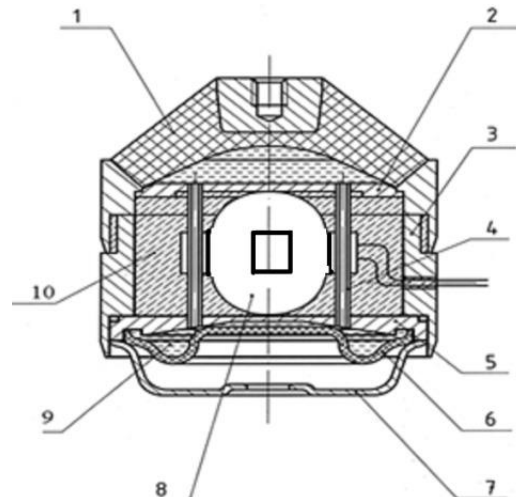


Рис. 4. Розріз керованої гідроопори:

- 1 – гумова обичайка (пружний елемент);
- 2 та 5 – несні перегородки; 3 – корпус;
- 4 – демпферний канал; 6 – мембрана;
- 7 – піддон для кріплення;
- 8 – котушка збудження електромагніту магнітореологічного трансформатора;
- 9 – магнітореологічна рідина;
- 10 – елементи кріплення конструкції

Відповідно до схеми, зображеної на рис. 5, поелементні рівняння динаміки гідроопори мають такий вигляд:

$$m_0 \ddot{x} + c_r x = F(t) - p_1 A \quad (2)$$

$$p_1 - p_2 = r A \dot{x} + L A \ddot{x}. \quad (3)$$

$$p_2 E - A x = \frac{E}{s} u. \quad (4)$$

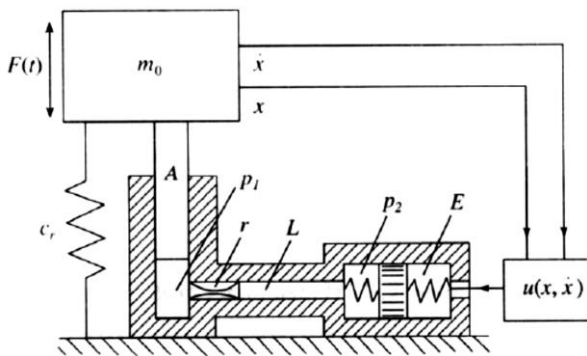


Рис. 5. Гідроопора з активною дією

У формулах (2)–(4):

m_0 – маса об'єкта;

c_r – жорсткість конічної гумової обичайки;

$F(t)$ – сила збурення (сила, прикладена до пуансона);

p_1 – тиск у робочій камері;

A – площа поршня;

p_2 – тиск у додатковій камері;

r – лінійний гідравлічний дисипативний опір каналу;

L – гідравлічна інерційність;

E – ємність додаткової камери;

s – площа перерізу мембрани;

$u(x, \dot{x})$ – активна силова зустрічна дія гідроопори, яка має бути визначеною.

Виразимо з (4) p_2 через x та u і підставимо отриманий вираз у (3), після чого з (3) виразимо p_2 через \dot{x} та \ddot{x} , отримаємо наступне рівняння, яке пов'язуватиме $\ddot{x}, \dot{x}, x, F(t)$ та u :

$$(m_0 + LA^2)\ddot{x} + rA^2\dot{x} + \left(c_r + \frac{A^2}{E}\right)x = F(t) - \frac{A}{s}u(x, \dot{x}). \quad (5)$$

Введемо такі позначки:

$$m = (m_0 + LA^2);$$

$$m_1 = LA;$$

$$2k = rA^2;$$

$$\omega_0^2 = (c_r + A^2/E);$$

$$A/s = N_1.$$

З огляду на наведені позначки рівняння (5) набудатиме вигляду:

$$m\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2x = F(t) - N_1u(x, \dot{x}). \quad (6)$$

Відповідно до схеми, поданої на рис. 1, величини коефіцієнта передачі сили:

$$n(t) = \frac{m\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2x}{F(t) - N_1u(x, \dot{x})} = \frac{m\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2x}{B}.$$

Задача побудови активної зустрічної дії полягає у визначенні такого закону $u^*(x, \dot{x})$, що за умови обмеження на його інтенсивність

$$\int_0^{2\pi/\omega} u^2 dt \leq V \quad (7)$$

забезпечуватиме в усталеному режимі мінімальне значення різниці $\Delta = n(t) - n_{\text{теор.}}$:

$$\min \Delta = \min [n(t) - n_{\text{теор.}}], \quad (8)$$

де $n_{\text{теор.}}$ визначається з теоретичних розрахунків потрібного значення зустрічної дії.

Керування динамічними властивостями системи можна здійснити, використовуючи такі підходи:

- змінювати налаштування системи з допомогою задання певного струму керування демпфера;
- застосовувати канал керування струмом демпфера, водночас замкнути систему за допомогою негативного зворотного зв'язку, наприклад за прискоренням.

Перший підхід відповідатиме керуванню за розімкненим циклом. У другому підході в активній системі створення сили протидії керування способом зміни величини струму в обмотці демпфера здійснюватиметься у функції координат (переміщення, швидкість, прискорення) руху фрагмента матриці. Тобто, на відміну від першого підходу, струм буде змінюватись у процесі керування, реалізуючи адаптивне керування процесом.

У нашій ситуації система керування магніторелогічним трансформатором гідроопори (МРТ гідроопорою) має реалізувати такі функції:

- оцінити ступінь ослаблення гідроопорою рівня силової дії пуансона;
- сформулювати сигнал керування в'язкістю рідини в демпферному каналі магніторелогічного трансформатора.

Для здійснення зазначених функцій система має містити: датчики тиску (сили); систему оброблення сигналів датчиків; потужний напівпровідниковий пристрій з блоками керування силовими ключами. Принцип дії системи автоматичного керування МРТ гідроопори запропонований на рис. 6.

До входу системи надходить інформація про поточні значення величини силової дії (тиску) з датчиків тиску ДТ1, встановленого на гідроопорі (основі 1, на яку діє пуансон), і ДТ2, встановленого на основі 2.

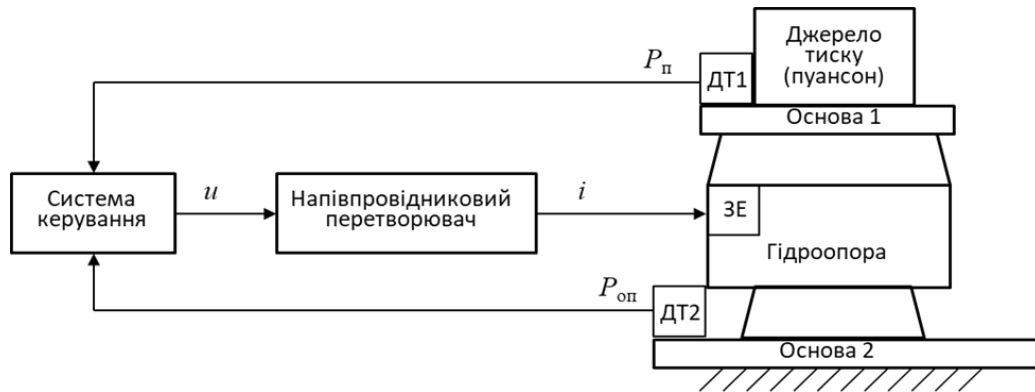


Рис. 6. Функціональна схема системи автоматичного керування гідроопорою формування зустрічної дії

За умови традиційного використання гідроопор у системах віброзахисту, де зовнішня дія є механічними коливаннями в певному спектрі частот, її передатну функцію визначають у такий спосіб. Керовану гідроопору подають у вигляді смугово-загороджувального фільтра. Частота налаштування гідроопори є такою, що придушує смугово-загороджувальний фільтр. Оскільки реальна гідроопора має гумову обичайку, яка гаситиме високочастотні гармоніки, то гідроопору подають як послідовне з'єднання двох ланок: смугово-загороджувального фільтра й передатної функції гумової обичайки. За таких умов передатна функція гідроопори набуває вигляду:

$$W_d = W_f \times W_a = \frac{r_0 s^2 + r_0 \omega_t^2}{s^2 + b \omega_t s + \omega_t^2} \times \frac{0,003s + 1}{0,005s + 1}, \quad (9)$$

де W_f – передатна функція смугово-загороджувального фільтра;

W_a – передатна функція обичайки;

r_0 – коефіцієнт підсилення;

b – ширина загородження;

ω_t – частота налаштування гідроопори.

У нашій ситуації силову дію пуансона під час формоутворення деталі можна подати як одиничну ступінчасту дію, тому частотні властивості гідроопори є менш суттєвими. За таких умов можна скористатися базовою моделлю механічної коливної системи, що містить об'єкт з масою (m) та пружним елементом (k) (рис. 7, а, б).

Структурна схема пояснює місце та роль пружного елемента, до входу якого прикладається зміщення (\bar{z}). Виходом ланки з передатною функцією $W_1 = k$ є сила. Ця сила прикладається

до входу другої ланки з передатною функцією $W_2 = 1/mp^2$. Вихідним сигналом є зміщення (\bar{y}). У такій системі мінімальної складності ланка $W_1 = k$ створює силу пружної взаємодії. Відповідно до теорії автоматичного керування згадана ланка матиме назву підсилювача. Друга ланка є інтегрувальною ланкою другого порядку й «трансформує» пружну силу у зміщення.

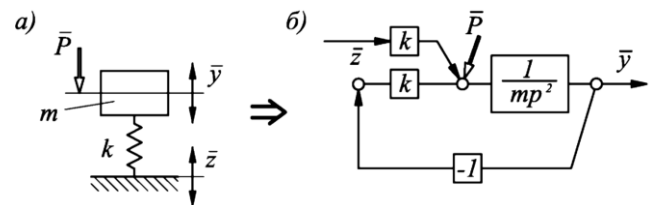


Рис. 7. Коливна механічна система:

а – базова модель; б – її структурна схема

Схеми, зображені на рис. 7, відповідають диференційному рівнянню

$$m\ddot{y} + ky = kz + P(t). \quad (10)$$

Рівняння (10) може бути реалізованим на основі принципу Даламбера або способом використання рівняння Лагранжа. Важливою умовою є те, що в базовій моделі «ключовим» елементом обирається матеріальна точка масою m , щодо якої складається рівняння кінестатики. Пружний елемент з коефіцієнтом жорсткості k таким чином стає елементарною ланкою.

Ускладнення структури може бути здійсненом через паралельне введення до пружного елемента додаткового кола, передатна функція якого може бути подана у вигляді дробово-раціональної функції:

$$W_{\text{од}}(p) = \frac{a_0 + a_1 p + \dots + a_n p^n}{b_0 + b_1 p + \dots + b_m p^m}, \quad (11)$$

де m, n – цілі числа ($n \leq m$);

a_i, b_j – коефіцієнти, що визначаються конструктивними особливостями гідроопори;

$i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{m}$.

Додаткове коло з передатною функцією $W_{\text{од}}(p)$

є додатковим зворотним зв'язком, що вводиться

до структурної схеми (рис. 7, б). У такому разі можна застосовувати відомі в теорії автоматичного керування принципи впровадження керування за абсолютним, відносним відхиленнями, а також за зовнішнім збуренням (рис. 8, а, б).

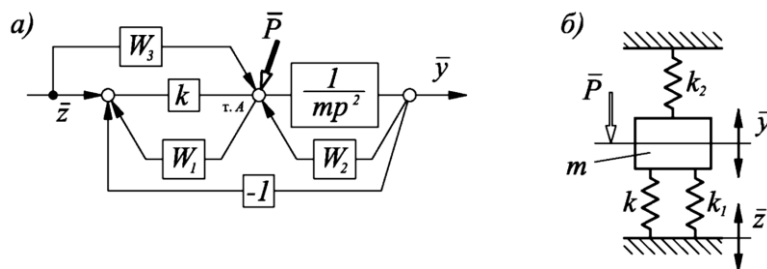


Рис. 8. Види додаткових зв'язків: а – на структурній; б – на розрахунковій схемах

Відповідно до рис. 5 у структурі схеми гідроопори буде присутнім лише один додатковий елемент (гумова обичайка) з передатною функцією $W_{\text{од01}} = W_a = (0,003s + 1)/(0,005s + 1)$ (на рис. 8, а він відповідатиме $W_1 = k_1$).

У такому разі передатна функція структури матиме вигляд:

$$W = \bar{y}/\bar{z} = \frac{k + W_{\text{од01}}}{mp^2 + k + W_{\text{од01}}}. \quad (12)$$

Отже, у розглянутій схемі будуть присутніми два типи елементарних ланок: пружний елемент та інтегровальна ланка другого порядку. Розглянемо детальніше їх частотні характеристики.

Пружний елемент із передатною функцією $W_1 = k$ має такі частотні характеристики:

- дійсна частотна характеристика $U_1 = k$;
- уявна частотна характеристика $V_1 = 0$;
- фазова частотна характеристика $\varphi_1 = 0$,

$\arctg \varphi_1 = 0$;

– амплітудно-частотна характеристика

$$A_1 = \sqrt{U_1^2 + V_1^2} = k;$$

– амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) є вектором, що лежить на осі $0V$ і має довжину k (від частоти не залежить), як показано на рис. 9.

Інтегровальна ланка другого порядку має передатну функцію вигляду $W = A/p^2$ і частотні характеристики:

$$W(j\omega) = -A/\omega^2;$$

$$V(\omega) = 0;$$

$$U(\omega) = -A/\omega^2;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 0;$$

$$\varphi(\omega) = 0;$$

$$A(\omega) = A/\omega^2.$$

АФЧХ інтегровальної ланки другого порядку подана на рис. 10. Вектор зорієнтований у від'ємному напрямку щодо осі $0U$, а його величина є зворотно пропорційною квадрату частоти ω .

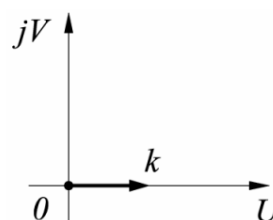


Рис. 9. АФЧХ пружного елемента

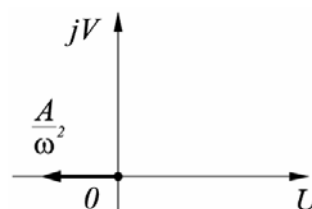


Рис. 10. АФЧХ інтегровальної ланки другого порядку

Елементарні ланки можуть мати різні форми фізичної реалізації. Так, пружний елемент зазвичай подається як гвинтові пружини, листові ресори тощо.

Ланки інтегровального типу мають більш складну природу, що пов'язано з використанням зовнішніх джерел енергії та появою складніших

структур самої ланки. У нашій ситуації це застосування магнітореологічного трансформатора.

Керування силою тертя (тобто силою притиску або коефіцієнтом тертя)

Необхідність забезпечення певного оптимального значення сили тертя в процесі формування товстості деталі з рифтами є актуальною і для способу з використанням скороченого пуансона, і для інших способів. У роботі [7, 8] подані результати спроб керування коефіцієнтом тертя за допомогою нанесення певного шару мастила, але зазначено, що подібні рішення на сьогодні є не достатньо ефективними через неможливість контролювати та утримувати постійну товщину шару мастила протягом усього процесу формування.

Тому був обраний метод, за яким здійснюється кероване притискання полки заготовки. Для його реалізації необхідно побудувати систему автоматичного керування величиною притискання за законом, що забезпечив би рівномірність розподілу механічних напружень на всіх ділянках матеріалу заготовки, які піддаються деформації в процесі виготовлення деталі.

Наразі для керування переміщенням робочих органів за допомогою гідроприводів використовують гідророзподільвачі з дискретними (увімкнено-вимкнено) електромагнітами (ГР) та дросельовальні гідророзподільвачі (ДГР). Приводи з пропорційним керуванням часто називають «інтелектуальна гідравліка».

Гідроприводи з ДГР мають високі точні та динамічні характеристики, однак вони є складнішими, ніж ГР. Можливість високоточного регулювання основних параметрів гідропривода дає змогу забезпечити жорсткі цикли керування. Водночас для більшості мобільних установок необхідна величина тиску в різних переходах робочого циклу не може бути встановленою наперед. У цьому разі доречно застосовувати регулятори *LS* (*Load Sensing* – чутливість до навантаження), у яких перепад тиску на дроселі регулювання швидкості (можливо пропорційному) стабілізується на певному рівні ΔP способом зміни фактичної подачі насоса в режимі online, що забезпечує мінімізацію втрат потужності в гідроприводі.

Під час припинення технологічних операцій центральний контролер подає команду на електронний блок двигуна й насоси. Унаслідок знижуються оберти колінчастого вала до частоти холостого ходу та встановлюються подачі насосів, близькі до нуля. Відновлення технологічної операції супроводжується збільшенням частоти обертання колінчастого вала та встановленням дроселя системи *LS* у робочий стан; у цьому разі тиск на виході з насоса стабілізується на рівні діючого опору навантаження плюс перепад тиску ΔP . На сьогодні гідроприводи з пропорційним електрокеруванням перебувають у стадії інтенсивного розвитку.

На рис. 11–14 зображені схеми гідропривода з *LS*-керуванням.

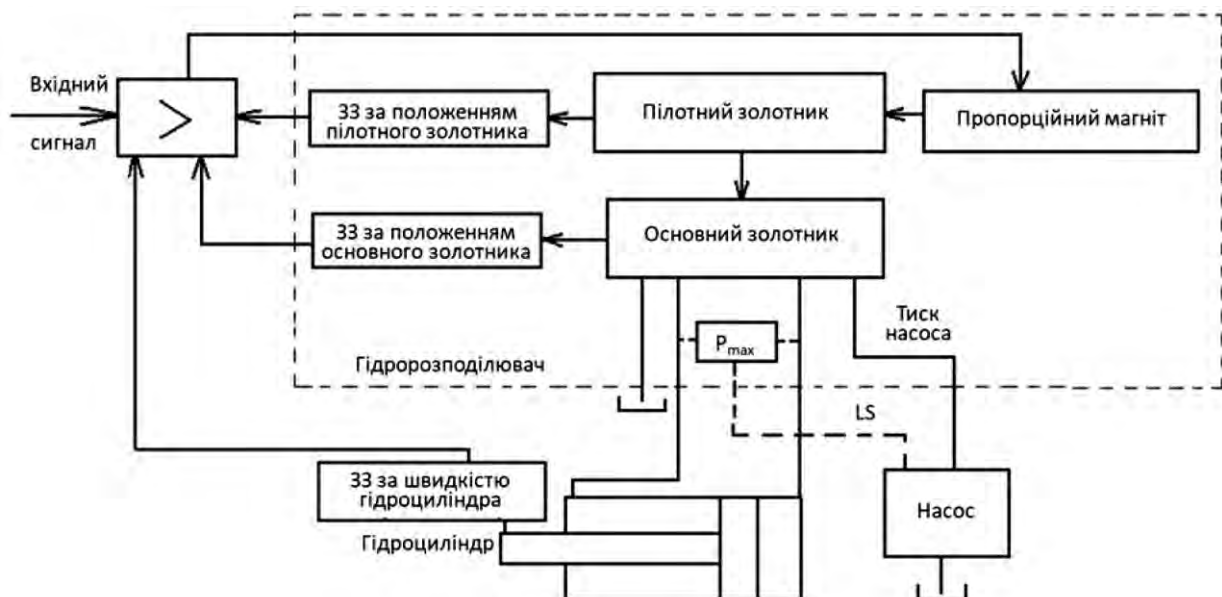


Рис. 11. Структурна схема гідропривода з *LS*-керуванням

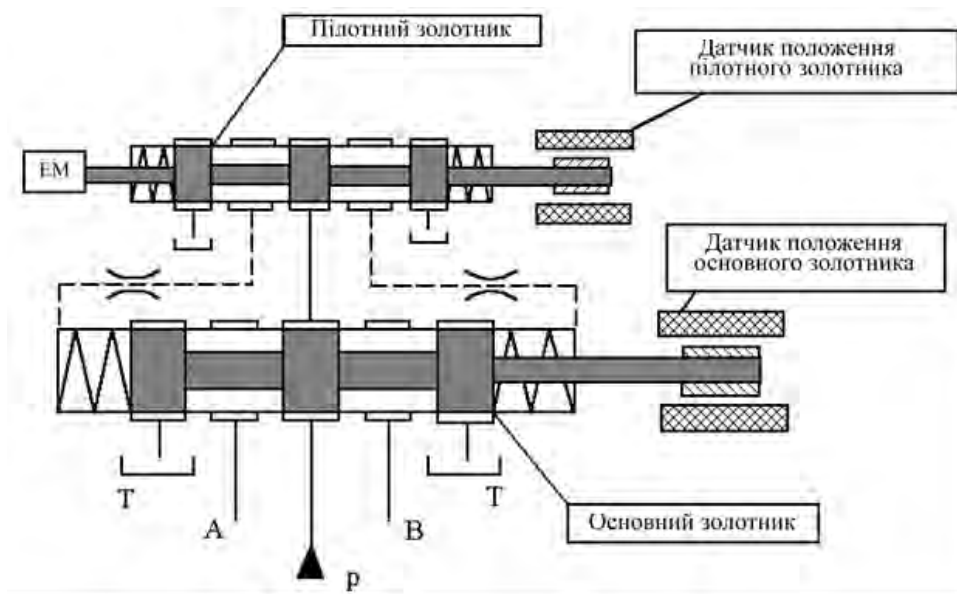


Рис. 12. Принципова схема пропорційного розподільника

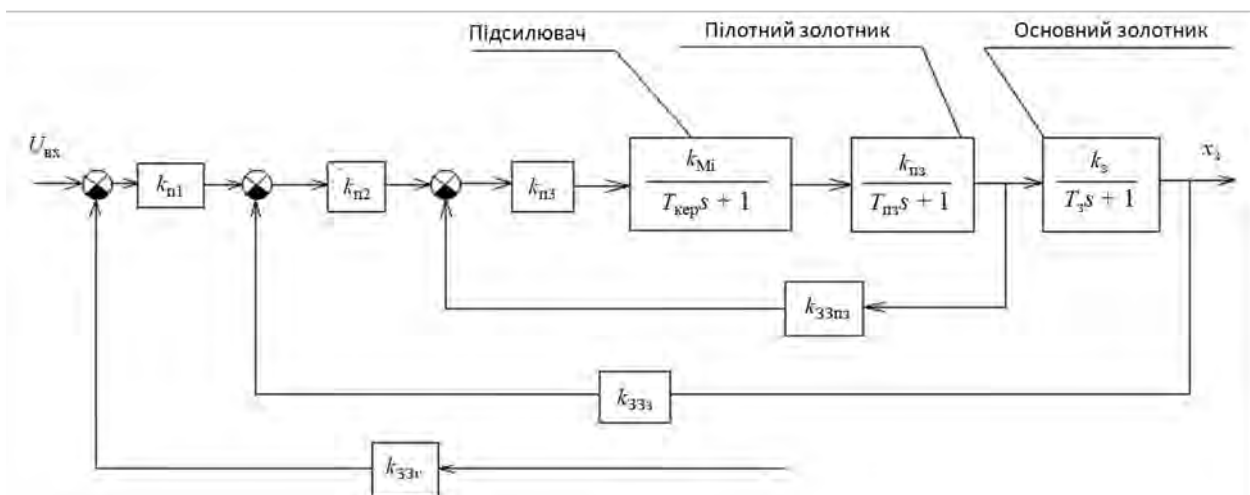


Рис. 13. Структурна схема пропорційного розподільника та електронного підсилювача. У поданій схемі:

$k_{ззп}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за положенням пілотного золотника;

$k_{ззз}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за положенням основного золотника;

$k_{ззв}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю основного золотника

У системах гідропривода з LS -керуванням миттєвий тиск навантаження слугує сигналом зворотного зв'язку для керуючого пристрою, який зі свого боку встановлює необхідний тиск насоса. Тиск підтримується таким, що дорівнює тиску найбільшого навантаження споживача плюс постійний тиск керування. За допомогою компенсаторів тиску підтримується постійний перепад тиску на дроселях $A1$ та $A2$ (рис. 13), що й визначає відсутність залежності швидкості споживача від його навантаження. Це і є основний принцип LS -системи.

Тому для реалізації операції керуваного притиску полки заготовки в пропонуваній системі автоматичного керування процесом виготовлення товстолистової деталі з рифтами буде застосований саме такий принцип. Структурна схема цієї системи подана на рис. 11. Вхідним сигналом для неї буде сила притискання (тиск) робочого органа гідропривода, яка під час формування деталі підтримуватиметься на рівні, визначеному з попередніх теоретичних розрахунків параметрів формування, або ж змінюватиметься за законом,

визначеним з того самого попереднього аналізу технологічного процесу виготовлення деталі.

Крім цього, кількість точок прикладання сили притискання до полки під час формоутворення та їх просторове розміщення потребують додаткового окремого дослідження з огляду на умови забезпечення необхідних якісних показників виготовленої деталі.

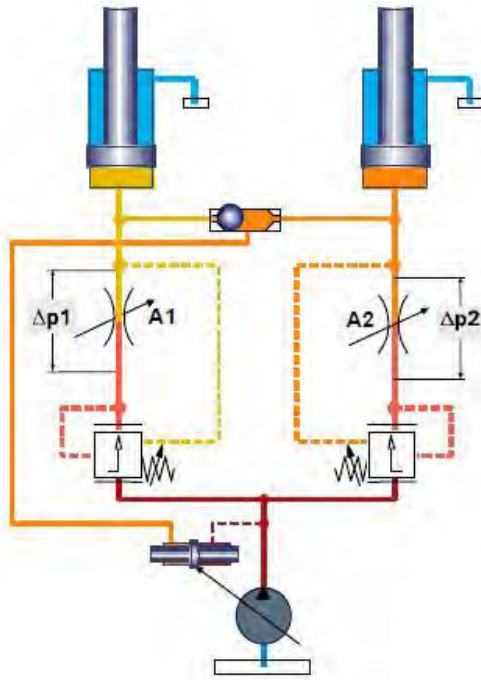


Рис. 14. Принципова схема гідросистеми з LS-керуванням

Висновки

Автоматизація процесу виготовлення товстостілових деталей із конструкційних і спеціальних сталей є актуальним завданням сучасного машинобудування.

Для оцінювання можливості побудови системи автоматизованого керування цим процесом у роботі запропоновано схему узагальненої технології автоматизованого виготовлення таких деталей. Розглянуто основні технологічні особливості кожного з етапів та можливі способи їх автоматизації з використанням сучасного обладнання.

Застосування запропонованої структури, складу та послідовності основних операцій узагальненого технологічного процесу автоматизованого виготовлення товстостінних листових деталей з рифтами на основі його реалізації обраними методами на запропонованому обладнанні дасть змогу побудувати систему автоматичного керування, здатну забезпечити ефективне управління якістю виготовлення зазначених деталей на кожному етапі технологічного процесу.

Тому подальший розвиток досліджень буде присвячено розробленню локальних систем керування обладнанням, яке забезпечує виконання операцій на кожному визначеному в цій роботі етапі технологічного процесу, а також побудові структури та алгоритму загальної системи керування, що синхронізуватиме та контролюватиме весь технологічний процес.

Список літератури

1. Черниш А. А. Удосконалення технології формування великогабаритних товстостілових деталей з елементами жорсткості з обмеженням осередку деформації: дис. к-та техн. наук: 05.03.05. Кременчук, 2017. 164 с. URL: <https://donntu.edu.ua/library/novinki-fondu/novinki-fondu-2018-r>
2. Спосіб штампування ребер жорсткості: пат. 89552 У Україна. № u201411388 ; заявл. 20.10.2014; опубл. 25.04.14, Бюл. № 8. URL: <http://speccounsils.kdu.edu.ua/vidguk/Aref%20Chernysh.doc>
3. Мосьпан Д.В., Драгобецький В.В., Невлюдов І.Ш. До визначення параметрів системи автоматичного керування технологічним процесом вільного формоутворення. Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2022. Вип. 4 (60). С. 33–38.
4. Тітов В.А., Шамарін Ю.С., Долматов А.І. Високошвидкісні методи обробки металів тиском. Київ: КВІЦ, 2016. 204 с. URL: <https://docplayer.net/87096991-Tehnichni-nauki-technical-sciences-naukoviy-zhurnal-issn-herald-of-khmelnytskyi-national-university-hmelnickiy-scientific-journal.html>
5. Добрянський С. С., Малафеев Ю. М., Пуховський Є. С. Проектування і виробництво заготовок. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 353 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/46090/1/Proektuvannia.pdf>
6. Черныш А. А. Формовка прямолинейных рифтов укороченным пуансоном. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2015. Вип. 1/2015 (90). С. 70–74. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2015_1%282%29_12
7. Gorbatyuk S. M., Shapoval A. A., Mos'pan D. V., Dragobetskii V. V. Physical Principles of Manufacturing of Periodic Profile Bars By Vibratory Drawing. *Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya (Izvestiya. Ferrous Metallurgy)*. 2016. Vol. 59, No. 7. P. 479–484. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-479-484

8. Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Shchetynin V.T., Agrat R.G., Shlyk S.V., Gorbatyuk S.M., Markov O.E. New Solution For Plastic Deformation Process Intensification. *METALLURGIST*, 2022. Vol. 65. Issue 09-10. P. 1108–1116. DOI: 10.1007/s11015-022-01253-x
9. Huang D., Li R., Huang L., Ji V., Zhang T. Fretting wear behavior of bulk amorphous steel. *Intermetallics*. 2021. 19 (10). P. 1385–1389. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13061137>
10. Ramesh R., Gnanamoorthy R. Development of a fretting wear test rig and preliminary studies for understanding the fretting wear properties of steels. *Materials and Design*. 2006. № 27(2). P. 141–146. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.09.017
11. Драгобецький В. В., Мороз Н. Н., Троцько О. В. Оптимізація геометричних та технологічних параметрів процесу формозміни листових деталей з раціональним вибором інтенсифікуючих факторів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: «ХПІ», 2009. № 32. С. 38–43. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/59e4a80b-a09e-4117-a88d-d4318054e43d/content>
12. Lutsenko I., Fomovskaya O. et al. Development of a method for determining the optimal control trajectory for the periodic processes. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Vol. 3. P. 59–68. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00900
13. Тришевский О. И. Методика расчета технологических параметров формовки в валках периодически замкнутых гофров на листовых и гнутых профилях. Кузнечно-штамповочное производство. Харьков, 2012. № 1. С. 25–28.
14. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and mining industry*. 2015. No. 1. P. 27–32. URL: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/6%20Puzyr.pdf
15. Попович В., Кондр А., Плешаков Е. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навч. посіб. Львів: Папуга, 2004. 422 с.

References

1. Chernysh A. A. "Improvement of the technology of forming large-sized thick-sheet parts with hardness elements with limitation of the center of deformation". Thesis of the candidate of technical sciences: 05.03.05. Kremenchuk, 2017. 164 p. available at: <https://donntu.edu.ua/library/novinki-fondu/novinki-fondu-2018-r>
2. "Method of stamping stiffeners". Patent 89552 U Ukraine. № u201411388 ; declared 20.10.2014; published 25.04.14, Iss. № 8. available at: <http://speccounsils.kdu.edu.ua/vidguk/Aref%20Chernysh.doc>
3. Mospan D., Dragobetskii V., Nevliudov I. (2022), "To determine the parameters of the automatic control system of the technological process of free forming". Scientific journal Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Issue 4 (60). P. 33–38.
4. V. A. Titov, Yu. Ye. Shamarin, A. I. Dolmatov. "High-speed methods of processing metals by pressure" ["Vysokoshvydkisni metody obrobky metaliv tyskom"]. Kyiv: KVITs, 2016. 204 p. available at: <https://docplayer.net/87096991-Tehnichni-nauki-technical-sciences-naukoviy-zhurnal-issn-herald-of-khmelnyskyi-national-university-hmelnickiy-scientific-journal.html>
5. Dobrianskyi S. S., Malafiev Yu. M., Pukhovskiy Ye. S. "Design and production of blanks" ["Proektuvannia i vyrobnytstvo zahotovok"]. K.: NTUU «KPI», 2014. 353 p. available at: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/46090/1/Proektuvannia.pdf>
6. Chernysh A. A. "Forming rectilinear rifts with a shortened punch". Scientific journal Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Issue 1/2015 (90). 2015. P. 70–74. available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2015_1%282%29_12
7. Gorbatyuk, S. M., Shapoval, A. A., Mospan, D. V., Dragobetskii, V. V. (2016), "Physical Principles of Manufacturing of Periodic Profile Bars By Vibratory Drawing". *Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya (Izvestiya. Ferrous Metallurgy)*. Vol. 59, No. 7. P. 479–484. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-479-484
8. Dragobetskii, V.V., Shapoval, A.A., Shchetynin, V.T., Agrat, R.G., Shlyk, S.V., Gorbatyuk, S.M., Markov, O.E. (2022), "New Solution For Plastic Deformation Process Intensification". *METALLURGIST*. Vol. 65. Issue 09-10. P. 1108-1116. DOI 10.1007/s11015-022-01253-x
9. Huang, D., Li, R., Huang, L., Ji, V., Zhang, T. (2021), "Fretting wear behavior of bulk amorphous steel". *Intermetallics*. 19 (10). P. 1385-1389. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13061137>
10. Ramesh, R., Gnanamoorthy, R. (2006), "Development of a fretting wear test rig and preliminary studies for understanding the fretting wear properties of steels". *Materials and Design*. № 27(2). P. 141-146. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.09.017
11. Dragobetskii V. V., Moroz N. N., Tratsko O. V. (2009). "Optimization of geometric and technological parameters of the process of forming sheet parts with a rational choice of intensifying factors". Bulletin of the National Technical University. KhPI: Collection of scientific papers. Thematic issue: New solutions in modern technologies. No 32. 2009. P. 38–43. available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/59e4a80b-a09e-4117-a88d-d4318054e43d/content>
12. Lutsenko, I., Fomovskaya, O. et al. (2019), "Development of a method for determining the optimal control trajectory for the periodic processes". *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 3. P. 59–68. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00900

13. Tryshevskiy O. Y. (2012), *Metodyka rascheta tekhnolohycheskykh parametrov formovky v valkakh peryodychesky zamknytykh hofrov na lystovykh y hnutykh profyliakh*. Kuznechno-shtampovochnoe proyzvodstvo. Kharkiv. № 1. P. 25–28.

14. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. "Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece". Metallurgical and mining industry. No. 1. 2015. P. 27–32. available at: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/6%20Puzyr.pdf

15. V. Popovych, A. Kondyr, E. Pleshakov (2004), *Tekhnolohiia konstruktivnykh materialiv i materialoznavstvo: navch. posibnyk*. Lviv: Vydavnytstvo «Papuha». 422 p..

Надійшла 15.09.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Моспан Денис Владиславович – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Кременчук, Україна; e-mail: denis.mospan@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5473-7874>

Mospan Denis – Phd (Engineering Sciences), Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics, Kremenchuk, Ukraine.

AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMING DETAILS WITH STRAIGHT RIFTS

The **subject matter** of the article is technological line for the production of thick sheet parts with rifts, made of structural and special steels. The **goal** of the work is analysis and creation of methods of managing basic technological operations at all stages of the technological process of the automated production of such parts. The following **tasks** were solved in the article: formation of models of the main stages of forming parts with rectilinear rifts and control of dynamic properties of selected systems of their implementation. The following **methods** used are – methods of numerical integration and numerical methods of solving differential equations; analytical solution of differential equations based on the D'Alembert principle or by using the Lagrange equation; frequency analysis of transfer functions of individual links, presented in the form of fractional-rational functions. The following **results** were obtained – constructed in the first approximation the composition and sequence of the main operations of the generalized technological process of the automated production of thick-walled sheet parts with rifts; according to the results of the analysis of the process of elastic-plastic change of the shape of the region with many connections, the input and output parameters necessary for building a control model of the specified process were determined; it is determined that for its implementation it is necessary to ensure free deformation of at least 0.25 % of the rift surface area outside of contact with the forming tool, and the necessary technological methods for this are proposed; proposed variants of the technical implementation of the selected technological methods; the results of modeling schemes and modes of operation of the necessary technical equipment are presented. **Conclusions:** The application of the proposed structure, composition and sequence of main operations of the generalized technological process of the automated production of thick-walled sheet parts with cracks, based on its implementation by the selected methods on the proposed equipment, will allow to ensure the effective management of the quality of the production of the specified parts at each stage of the technological process.

Keywords: automation of the technological process; simulation of the main stages of the process and equipment operation modes; automatic control system; frequency characteristics.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Моспан Д. В. Автоматизація технологічного процесу формоутворення деталей із прямолінійними рифтами. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 3 (25). С. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.254.163>

Mospan, D. (2023), "Automation of the technological process of forming details with straight rifts", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (25), P. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.254.163>