

ШТУЦЬ АНДРІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>e-mail: [shtuts1989@gmail.com](mailto:shtuts1989@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Надійність технічних об'єктів є однією з найважливіших їх якісних характеристик. Автоматизовані комплекси штампування обкочуванням (АКШО) широко використовуються в машинобудуванні для виготовлення деталей складної форми. Надійність АКШО є ключовим фактором, що визначає їх ефективність та економічність.

Розробка пристрою автоматичної зміни оснащення шампувально-обкочувального комплексу обумовлена необхідністю підвищення ефективності та автоматизації виробничих процесів у промисловості. Штампування обкочуванням (ШО) є важливою технологією для виробництва деталей з металу, проте процес зміни оснащення (наприклад, інструментів або матриць) може бути довготривалим та ресурсомістким.

Розробка пристрою для автоматичної зміни оснащення може значно поліпшити продуктивність та ефективність виробничих ліній, зменшити час простою обладнання та витрати на ручну працю. Крім того, такий пристрій може підвищити безпеку праці та знизити ризик травматизму серед працівників. Оскільки сучасна промисловість стрімко розвивається і постійно вдосконалює технології виробництва, розробка пристрою автоматичної зміни оснащення для шампувально-обкочувального комплексу є актуальною і важливою завданням. Впровадження такого пристрою може допомогти підприємствам зберегти конкурентну перевагу на ринку та підвищити їхню ефективність та прибутковість.

У статті розглянуто питання надійності автоматизованого комплексу штампування обкочуванням, яке є одним із ключових аспектів сучасного виробництва. Аналізуються фактори, що впливають на надійність таких систем, та шляхи їх підвищення для забезпечення безперебійної роботи виробничих ліній.

Стаття розкриває основні проблеми, пов'язані із збоями обладнання та простоями, які можуть призвести до значних фінансових втрат та втрати репутації підприємства. Проаналізовано вплив таких факторів, як інтенсивність експлуатації, технічне обслуговування, а також впровадження новітніх технологій управління та моніторингу на загальну надійність системи.

У статті запропоновано комплексний підхід до підвищення надійності автоматизованих комплексів штампування обкочуванням. Цей підхід включає в себе оптимізацію режимів роботи, вдосконалення систем технічного обслуговування та діагностики, а також використання передових технологій управління та моніторингу стану обладнання.

Результати дослідження можуть бути корисними для виробництв, які використовують автоматизовані комплекси штампування обкочуванням у своїй діяльності. Вони дозволять підвищити ефективність виробничого процесу, зменшити витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також забезпечити стабільну та безперебійну роботу виробничих ліній.

Ключові слова: штампування обкочуванням, автоматизований комплекс, електропривод, дослідження надійності, технічні об'єкти, оцінка надійності.

SHTUTS ANDRII

Vinnytsia National Agrarian University

## STUDY OF THE RELIABILITY AND OPTIMIZATION OF THE AUTOMATED ROLLING STAMPING COMPLEX

The reliability of technical objects is one of their most important quality characteristics. Automated rolling stamping complexes are widely used in mechanical engineering for the manufacture of parts of complex shape. Reliability of CABs is a key factor that determines their efficiency and cost-effectiveness. The development of a device for automatically changing the equipment of the stamping-rolling complex is due to the need to increase efficiency and automate production processes in industry. Roll stamping is an important technology for the production of metal parts, but the process of changing equipment (for example, tools or dies) can be time- and resource-intensive.

The development of an automatic equipment changer can significantly improve the productivity and efficiency of production lines, reduce equipment downtime and manual labor costs. In addition, such a device can increase occupational safety and reduce the risk of injury among workers.

Since modern industry is rapidly developing and constantly improving production technologies, the development of a device for automatically changing equipment for a stamping-rolling complex is an urgent and important task. The implementation of such a device can help enterprises maintain a competitive edge in the market and increase their efficiency and profitability. The article deals with the reliability of the automated rolling stamping complex, which is one of the key aspects of modern production. Factors affecting the reliability of such systems and ways to increase them to ensure smooth operation of production lines are analyzed. The article reveals the main problems associated with equipment failures and downtime, which can lead to significant financial losses and loss of reputation of the enterprise. The impact of such factors as the intensity of operation, maintenance, as well as the introduction of the latest management and monitoring technologies on the overall reliability of the system was analyzed. The article proposes a comprehensive approach to increasing the reliability of automated rolling stamping complexes. This approach includes optimization of operating modes, improvement of maintenance and diagnostics systems, as well as the use of advanced management technologies and equipment condition monitoring.

The results of the research can be useful for factories that use automated rolling stamping complexes in their activities. They will make it possible to increase the efficiency of the production process, reduce the costs of maintenance and repair, as well as ensure the stable and uninterrupted operation of production lines.

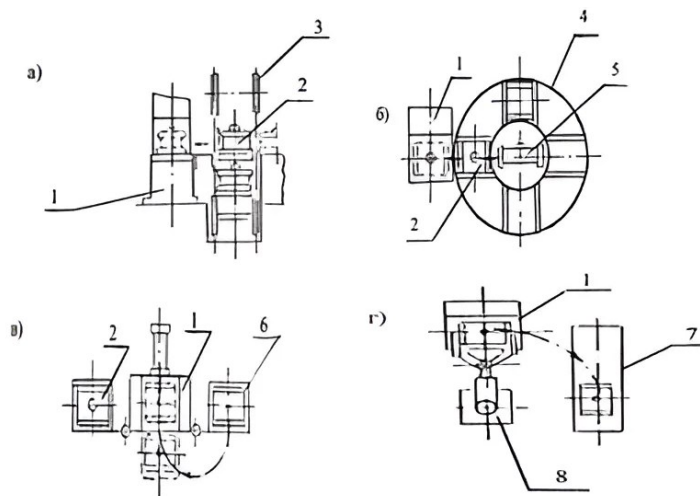
Key words: rolling stamping, automated complex, electric drive, reliability research, technical objects, reliability assessment.

### Постановка проблеми

Тенденції розвитку промисловості шляхом вдосконалення машин обумовлюють необхідність виготовлення деталей складної конфігурації з необхідними експлуатаційними властивостями. З об'ємних деталей номенклатури виробів АПК велику частку складають вісесиметричні деталі типу фланців, кришок, втулок тощо. Специфіка експлуатації подібних деталей в обладнанні АПК вимагає їх підвищеної якості для забезпечення певних службових властивостей деталей, таких як зносостійкість, корозійна стійкість, витривалість та ін.

Аналіз технологічних процесів виготовлення вісесиметричних деталей галузі показав, що вони виготовляються переважно з використанням процесів різання з пруткового, трубного і листового прокату. Для таких процесів характерними є низький коефіцієнт використання металу та висока трудомісткість. Одним із напрямів вирішення відзначеної проблеми є введення в технологічний ланцюг виробництва операції пластичного деформування. Для виготовлення відзначених деталей невеликими серіями найкращі техніко-економічні показники спроможний забезпечити процес штампування обкочуванням (ШО) [1,2]. Аналіз обладнання ШО [2,3,4] показав, що воно на сьогодні не має ще належного рівня автоматизації і технологічної гнучкості, які дозволили б ефективно використовувати його в умовах малосерійного виробництва. Створення такого обладнання слід проводити із забезпеченням мінімального часу і трудомісткості на його переналаштування на інший типорозмір і форму деталі.

За результатами аналізу робіт з розробки ковальсько-пресового обладнання з автоматизованою заміною штампового оснащення нами запропоновані наступні схеми пристроїв (рис. 1) для заміни штампів в комплексах ШО.



**Рис. 1.** Схема пристроїв автоматизованої заміни штампів: а) з магазином штампів; б) з поворотним столом; в) з поворотними кронштейнами; г) з рухомих візком; д) з маніпулятором. 1 – обкочувальний верстат; 2 – штамп; 3 – магазин; 4 – поворотний стіл; 5 – гідроциліндр; 6 – поворотний кронштейн; 7 – конвеєр електричний; 8 – маніпулятор електричний.

1. Магазин штампів встановлюється біля обкочувального верстата (ОВ) (рис. 1а) і містить декілька комірчин зі штампами. Штампи в магазині переміщуються вертикально. Використаний штамп зі стола ОВ видаляють у вільну комірчину, яка зміщується автоматично за рахунок електроприводу, а на рівень стола виставляється комірчина з новим штампом.

2. В системі з поворотним столом (рис. 1б) штамп зміщується на позицію його завантаження в робочу ОВ шляхом повороту стола. Штамп видаляється на вільну позицію штампового стала, після повороту якого новий штамп виставляється на лінію переміщення на стіл ОВ.

3. В системі з поворотними кронштейнами (рис. 1в), один з кронштейнів (лівий) шарнірно закріплений на станині ОВ і призначений для видалення використаного штамп. Другий кронштейн (правий) призначений для подачі попередньо встановленого на ньому нового штамп. Після повороту кронштейну до стола ОВ штамп переміщується в робочу зону.

4. Використання електророботів (рис. 1г) розширює сферу застосування систем автоматизованої заміни штампового оснащення. В ОВ передбачено застосування універсального маніпулятора, який дозволяє здійснювати завантаження-вивантаження заготовок і заміну матриць. Це стало можливим за рахунок використання матриць, уніфікованих за зовнішнім діаметром. Однією з переваг такої системи є можливість накопичення матриць на одній з позицій поворотного накопичувача заготовок.

Надійність є однією з найважливіших характеристик технічних об'єктів. Для розрахунку характеристик надійності об'єкта необхідно мати дані про надійність його складових елементів. Особливо важливою оцінка надійності постає при розробці нових складних технічних об'єктів. До таких об'єктів відноситься автоматизований комплекс штампування обкочуванням (АКШО). Основні елементи даного комплексу представлені на рисунку 2. Важливість даних елементів в забезпеченні надійності системи можна поділити на дві групи: перша група – відмова елементів приводить до часткової відмови всієї системи; друга група - відмова її елементів приводить до повної відмови всієї системи. Таким чином, при відмові елементів першої групи система продовжує виконувати свої функції не в режимі автоматичного управління, а з допомогою електричного пульта. Оцінку можливих відмов елементів АКШО представлено в таблиці 1.

Моделювання АКШО є окремим науковим напрямком в роботах професора В.А. Матвійчука, з розвитку процесів локального деформування [1–3].

**Мета і задачі дослідження**

Метою даної роботи є розробка і обґрунтування пристроїв автоматичної зміни штампового оснащення в комплексах ШО.

**Матеріал і результати дослідження**

В роботі проведена оцінка надійності автоматизованого комплексу штампування обкочуванням. Для цього розглянуто основні відмови складових елементів системи, які за впливом поділено на дві групи. Приймаючи в якості математичної [10,12] моделі функціонування системи, багатомірний марківський випадковий процес в роботі проведена оцінка її надійності шляхом визначення таких ймовірнісних величин, як середній час повної працездатності автоматизованої системи та середній час роботи системи до першої повної відмови.

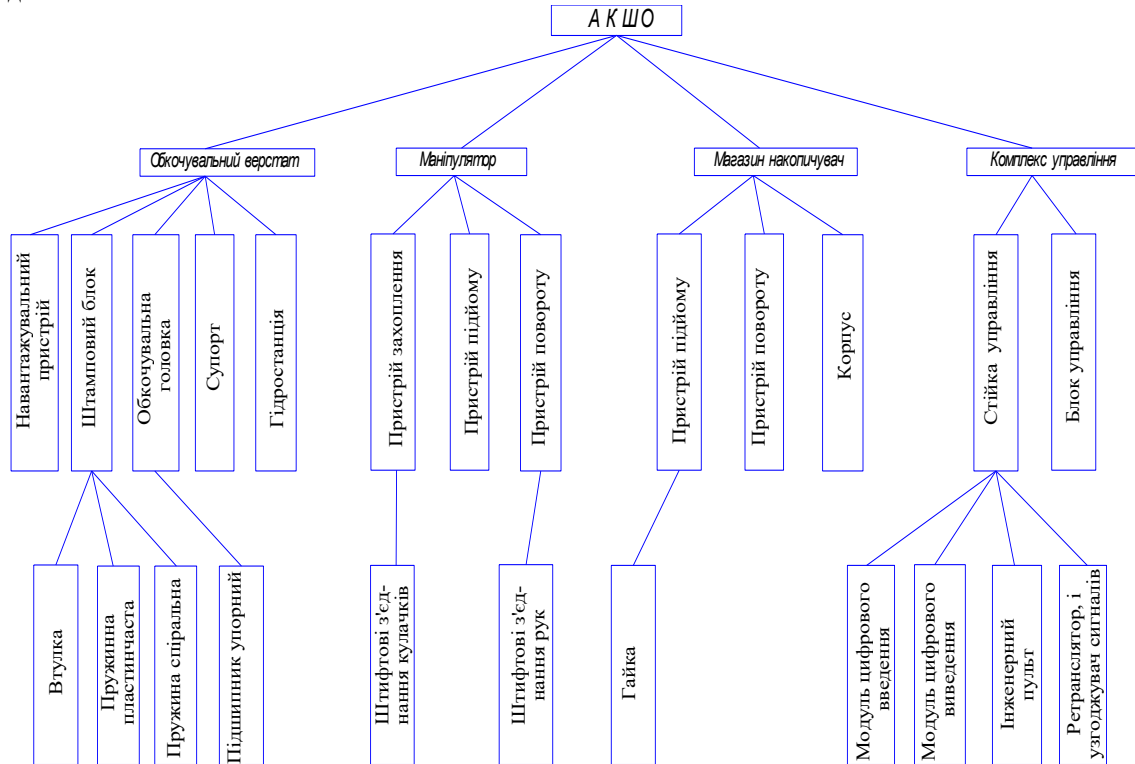


Рис. 2. Схеми зв'язків елементів АКШО, які впливають на його надійність

Отже, якщо відмовив елемент другої групи, то відбувається миттєва відмова всієї системи і відразу розпочинається аварійний ремонт, у результаті якого відновлюється елемент, що привів до зупинки АКШО, а також всі елементи першої групи, що вийшли з ладу до цього часу і призвели до часткової відмови системи. Якщо ж відбулася часткова відмова, то система продовжує функціонувати до початку переналагоджування.

В АКШО передбачене переналагоджування через кожні  $\tau$  годин, якщо до моменту переналагоджування система не вийшла з ладу цілком. Якщо до моменту переналагоджування не відбулося часткових відмов, то інтервал між переналагоджуванням триває  $\Delta\tau$  годин. Якщо ж часткові відмови відбулися, то розпочинається плановий ремонт системи, який триває протягом періоду, що дорівнює сумі часу відновлення всіх елементів системи, які вийшли з ладу [2–6].

Таблиця 1

**Основні відмови в роботі елементів АКШО**

Комплекси	Вузли	Елементи системи і режим їх роботи	Вид відмови	
			Часткова	Повна
	Навантажувальний пристрій	Станина. 5000 год. роботи. Після відмови – відмова всієї системи і заміна		+
		Привод робочий. 5000 год. р. + 8 год. відновлення		+
		Привод виштовхувала. 5000 год. р. + 8 год. відн.		+
		Привод регулювальний. 5000 год. р. + 8 год. відн.	+	
	Штамповий блок	Привод обертання. 5000 год. р. + 8 год. відн.		+
		Штампове оснащення. 500 год. р. + 5 хв. відн.		+

Обкочувальний пристрій		Торцевий шпindel. 3000 год. р. + 2 год. відн.		+
	Обкочувальна головка	Шпindel. 3000 год. р. + 2 год. відн.		+
		Привод регулювальний. 5000 год. р. + 8 год. відн.	+	
		Валок. 500 год. р. + 0,5 год. відн.		+
	Супорт	Ролик. 1000 год. р. + 0,5 год. відн.	+	
	Гідростанція			+
	Ручний пульт управління	Дублює систему управління обкочувальним пристроєм. 5000 год. р. + 8 год. відн.		+
Маніпулятор	Захоплювач	1000 год. р. + 4 год. відн.	+	
	Привод підйому	3000 год. р. + 2 год. відн.	+	
	Привод повороту	3000 год. р. + 2 год. відн.	+	
Магазин накопичувач заготовок	Пристрій підняття	700 год. р. + 2 год. відн.	+	
	Пристрій повороту	3000 год. р. + 2 год. відн.	+	
Магазин накопичувач виробів	Пристрій підняття	700 год. р. + 2 год. відн.	+	
	Пристрій повороту	3000 год. р. + 2 год. відн.	+	
Комплекс управління	Стойка управління	500 год. р. + 2 год. відн.	+	
	Дисплей	5000 год. р. + 8 год. відн.	+	
	Блоки управління	500 год. р. + 8 год. відн. у кожного блока	+	

Припустимо, що час безвідмовної роботи всіх елементів  $\xi_i$  має експоненціальний розподіл з параметрами  $\lambda_1^{(1)} \dots \lambda_m^{(1)}$  для елементів, які призводять до часткової відмови системи, і  $\lambda_1^{(2)} \dots \lambda_n^{(2)}$  для елементів, які призводять до повної відмови системи. Інтенсивність відмов однозначно визначається за середнім часом безвідмовної роботи кожного з елементів:

$$\lambda_i^{(j)} = \frac{1}{E\xi_i^{(j)}} = \frac{1}{\mu_i^{(j)}}, \quad j = 1, 2; \quad i = 1, \dots, m; \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Час відновлення кожного з елементів першої і другої груп також розподілений за експоненціальним законом з параметрами  $\mu_i^{(1)}$  та середнім часом відновлення  $T_i^{(2)}, i = 1, \dots, n$  для елементів першої групи, і параметрами  $\mu_i^{(2)}$  та середнім часом відновлення  $T_i^{(2)}, i = 1, \dots, n$  для елементів другої групи.

Середній час відновлення  $T_i^{(j)} (j = 1, 2)$  вважається відомим [10,11].

Математичною моделлю функціонування даної системи є багатомірний марківський випадковий процес  $\xi(t)$

$$\xi(t) = \{ \xi_1^{(1)}(t), \dots, \xi_m^{(1)}(t); \xi_1^{(2)}(t), \dots, \xi_n^{(2)}(t) \}, \quad (2)$$

де  $\xi_i^{(j)}(t) (j = 1, 2)$  приймають значення 1 і 0, в залежності від того, чи знаходиться  $i$ -тий елемент в працездатному стані у момент  $t$ , чи цей елемент відмовив на момент  $t$ .

Таким чином, якщо всі  $\xi_i^{(j)}$  приймають на момент  $t$  значення  $\xi_i^{(j)} = 1$ , то система на даний момент цілком працездатна. Якщо хоча б одна із величин  $\xi_i^{(1)}, i = 1, \dots, n$  прийняла значення рівне нулю, то система знаходиться в стані часткової відмови. Якщо ж на момент часу  $t$  хоча б одна із величин  $\xi_i^{(2)}, i = 1, \dots, n$  дорівнює нулю, то система знаходиться у стані повної відмови.

Відповідно до можливих станів, в системі передбачається три види ремонтних робіт:

- переналадження системи, яке проводиться через кожні  $T$  годин роботи системи у випадку, якщо за час  $T$  не було ніяких відмов, і триває середній час  $\Delta T$ ;
- плановий ремонт, який проводиться через  $T$  годин роботи у випадку, якщо за час  $T$  відбулася часткова відмова системи, при цьому середній час планового ремонту  $T_1$ ;
- аварійний ремонт, який розпочинається відразу після повної відмови системи і середній час якого становить  $T_2$ ;

Після закінчення переналаджування, планового і аварійного ремонтів система цілком відновлюється і стає працездатною.

Процес  $\xi(t)$  є генеруючим процесом, а моменти регенерації є моментами, які попадають в працездатний стан  $l_0$ . У зв'язку з цим, для визначення стаціонарних ймовірностей знаходження в кожному із станів, достатньо розглянути функціонування системи на одному з періодів регенерації. Позначимо через  $\pi_{i1}^{(1)}, \dots, \pi_{ik}^{(1)}$  стаціонарну ймовірність знаходження системи у стані повної відмови, якщо відмовили елементи з номерами  $i1, \dots, ik (k = 1, \dots, m)$ , а через  $\pi_{i1}^{(2)}, \dots, \pi_{ik}^{(2)}$  - стаціонарну ймовірність знаходження системи у стані

повної відмови, якщо відмовив один із елементів другої групи  $j = 1, \dots, n$  і  $k$  елементів першої групи  $(i_1, \dots, i_k) \in (1, \dots, m), k = 1, \dots, m$ .

В рамках дослідження надійності АКШО важливим є знаходження середнього часу повної працездатності системи, тобто часу до першої часткової чи повної відмови системи. Нехай випадкова величина  $\gamma_{k+1}$  відображає час повної працездатності системи при умові, що відмова відбудеться на  $(k + 1)$ -му інтервалі регенерації; випадкова величина  $\xi$  - час після останнього переналагоджування до першої (любої) відмови [2, 5–7].

Оскільки процес  $\xi_{(t)}$  є генеруючим, то розподіл випадкової величини  $\xi$  не залежить від номера інтервалу, на якому відбудеться перша відмова.

Ймовірність того, що на інтервалі регенерації не відбудеться ні однієї відмови становить

$$p_1 = e^{-\tau(\sum_{i=1}^m \lambda_i^{(1)} + \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(2)})} = e^{-\tau\lambda}, \quad (3)$$

а ймовірність того, що відбудеться хоча б одна відмова

$$q_1 = 1 - p_1 = 1 - e^{-\tau\lambda}, \quad (4)$$

де

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i^{(1)} + \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(2)} = \lambda_1 + \lambda_2. \quad (5)$$

Тоді за формулою математичного очікування отримаємо середній час повної працездатності системи

$$\begin{aligned} E\gamma &= \sum_{k=0}^{\infty} p_1^k q_1 E\gamma_{k+1} = \sum_{k=0}^{\infty} p_1^k q_1 \left[ k(-\tau + \Delta\tau) + E\left(\frac{\xi}{\xi} < \tau\right) \right] = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} p_1^k q_1 \left[ k(\tau + \Delta\tau) + \frac{1}{q_1} \left( -\tau e^{-\lambda\tau} + \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda\tau}) \right) \right] = \\ &\quad \frac{p_1}{q_1} (\tau + \Delta\tau) + \frac{1}{\lambda} - \tau \frac{p_1}{q_1} = \frac{1}{\lambda} + \frac{p_1}{q_1} \Delta\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

При оцінці надійності АКШО важливо також знаходження середнього часу роботи системи до першої повної відмови. Нехай випадкова величина  $\tilde{\gamma}_{k+1}$  відображає часом роботи системи до першої повної відмови.

Випадкова величина  $\tilde{\gamma}_{k+1}$  відображає час роботи системи до її першої повної відмови при умові, що відмова відбулася на  $(k+1)$ -му інтервалі регенерації,

$\xi$  - час після першого переналагоджування до повної відмови системи. При цьому розподіл випадкової величини  $\xi$  не залежить від номера інтервалу регенерації [2,6,7].

Ймовірність того, що на інтервалі регенерації не настане повної відмови, дорівнює

$$p_2 = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i^{(2)} \tau} = e^{-\lambda_2 \tau}. \quad (7)$$

За формулою повного математичного очікування і визначаємо середній час роботи системи до першої повної відмови:

$$\begin{aligned} E\tilde{\gamma} &= \sum_{k=0}^{\infty} p_2^k q_2 E\tilde{\gamma}_{k+1} = \sum_{k=0}^{\infty} p_2^k q_2 \left[ k(\tau + \tilde{T}_1) + E\left(\frac{\xi}{\xi} < \tau\right) \right] = \\ &= \frac{p_2}{q_2} (\tau + \tilde{T}_1) + \frac{1}{\lambda_2} - \tau \frac{p_2}{q_2} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{p_2}{q_2} \tilde{T}_1 \end{aligned} \quad (8)$$

де середня тривалість відновлення  $\tilde{T}_1$  при відсутності повної відмови системи дорівнює [3,7,8,9].

$$\tilde{T}_1 = \frac{1}{(\pi^{(0)} + \pi^{(1)})} (\pi^{(1)} T_1 + \pi^{(0)} \Delta\tau). \quad (9)$$

### Системи оптимізації режимів металообробки для штампування обкочуванням

Загальні положення призначення та області застосування систем оптимізації режимів металообробки

Режими [8, 9, 10] металообробки можна оптимізувати, підбираючи оптимальне поєднання значень швидкості штампування обкочуванням (ШО) і подачі. Під такою оптимізацією розуміється управління режимами металообробки, що дозволяє отримати найбільший народногосподарський ефект з урахуванням всіх істотних зв'язків і обмежень. У загальному випадку принцип оптимальності формулюється так: визначити такі значення пошуку технологічних параметрів і відповідних їм значень регульованих координат електроприводів, які забезпечать максимальне (мінімальне) або гранично досягне значення показника якості процесу металообробки при дотриманні обмежень по необхідній якості продукції і технологічних можливостей обладнання.

Якість функціонування системи металообробки ШО може бути в загальному випадку охарактеризовано функціоналом:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} f(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; z_1, z_2, \dots, z_m) dt \quad (10)$$

де  $x_i(t)$  - вихідні координати;  $u_j(t)$  - керуючі впливи;  $z_k(t)$  - збуджуючі впливи.

При оптимальному управлінні системою функціонал  $J$  досягає максимального (мінімального) значення, характеризуючи найкращу поведінку системи в динаміці (при вирішенні задачі динамічної оптимізації) або найкращі показники в сталому режимі (під час вирішення завдання статичної оптимізації).

При металообробці екстремального значенням функціоналу  $J$  відповідає оптимальне співвідношення між швидкістю знімання припуску і швидкістю зносу інструменту.

В результаті викладення матеріалів даного підpunkту необхідно знати критерії оптимізації режимів металообробки, вмiти застосовувати алгоритми управління і скласти математичний опис систем оптимізації верстатів та приставок.

Слід звернути увагу на принципи побудови автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) і встановити їх відмінність від систем стабілізації технологічних параметрів.

Системи оптимізації режимів металообробки (АСУ МО) призначені для отримання максимальної продуктивності або економічності при виготовленні деталей в межах заданих технічних умов. Виробляючи автоматичний вибір режиму металообробки і керуючи електроприводами головного руху і подач, ці системи забезпечують скорочення машинного часу обробки. Управління режимом металообробки передбачає вибір критерію оптимальності та визначення обмежуючих факторів. Побудова АСУ МО в цьому випадку призначене для пошуку та підтримки екстремального значення обраного критерію оптимальності при допустимих значеннях інших показників.

Підвищення продуктивності і гнучкості виробництва в даний час є найважливішою вимогою. Під гнучкістю виробництва розуміють швидкість оновлення інформації, яку необхідно переробити, щоб з вихідних матеріалів отримати готовий виріб. В АСУ МО виробляється і обробляється автоматичними пристроями частину цієї інформації.

Стойкою тенденцією сучасного верстатобудування, яке витікає із зазначеного вище, є впровадження пристроїв і систем, що забезпечують зниження витрат, а також можливість переходу до обробки деталі іншої форми і інших технологічних характеристик [8, 9, 11, 14].

Застосування АСУ МО економічно доцільно в тих випадках, коли вибір режиму металообробки істотно впливає на її собівартість, на продуктивність (машинний час), наприклад при обробці жароміцних і загартованих сталей, сплавів і тугоплавких металів. Чим вище ступінь автоматизації електро-верстата, (приставки), тим ефективніше на ньому застосування АСУ МО. Особливо актуально застосування АСУ МО в верстатах, оснащених пристроями числового програмного управління (ЧПУ) типу систем автоматизованого проектування (CNC). Завдання побудови АСУ МО в таких верстатах спрощується у зв'язку з можливістю використання вже наявних у них регульованих електроприводів, датчиків і компютерів.

### Висновки

Автоматична заміна оснащення штампуально-обкочувального комплексу дозволяє суттєво скоротити час підготовки і налагоджування, що при частій заміні оснащення у малосерійному виробництві є досить актуальним. Зокрема, застосування автоматизованої системи заміни матриць з допомогою маніпулятора дозволяє скоротити час переналагоджування з 30-40 хв до 2-3 хв.

Отримано залежності для оцінки надійності автоматизованого комплексу штампування обкочуванням шляхом визначення таких ймовірнісних величин, як середній час повної працездатності системи та середній час роботи системи до першої повної відмови.

Таким чином, «Дослідження надійності автоматизованого комплексу штампування обкочуванням» має систематизувати та узагальнити ключові результати дослідження, підкреслити їхню важливість для практики та вказати напрямки подальших досліджень у цій області.

### Література

1. Штупць А.А. Удосконалення процесів штампування обкочуванням на основі моделювання механіки формоутворення заготовок : дисертація. 2024. 271 с.
2. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51-58.
3. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. On the Choice of Stress Invariants in Solving. *Problems of Mechanics. Strength of Materials* N 35 (3), Plenum Publishing Corporation (USA), May - June, 2003, 217-224.
4. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. 2020. Vol. 844. P. 168-181.
5. Aliev I., Zhbankov Y., Martynov S. Forging of shafts, discs and rings from blanks with inhomogeneous temperature field. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (4). 2016. p. 393-400.
6. Матвійчук В. А. Розвиток енерго- і ресурсозберігаючих технологій заготівельного виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4 (119). С. 110-119.
7. Матвійчук В.А., Михалевич В. М., Колісник М.А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням. *Вибрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1(104). С. 81-91.

8. Матвийчук В. А., Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування: Теорія і практика обробки матеріалів тиском : монографія. АТ «Мотор Січ» 2016. С. 339-363.
9. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A., Dobranyuk Y.V. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. Volume 43, Number 6 (2011). P. 591-603.
10. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні. Вінниця : ВНТУ, 2013. 180 с. ISBN 978-966-641-532-8.
11. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Краєвський О. В. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 2(8). С. 56-64.
12. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Bondarenko Y., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2020. p. 440-445.
13. Sheykin S.Y., Grushko O.V., Melnichenko V.V., Studenets S.F., Rostotskyi I.Y., Iefrosinin D.V., Melnichenko Y.V. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products. *Journal of Superhard Materials*, 43 (3). 2021. p. 222-230.
14. Shapoval A., Savchenko I., Markov O. Determination coefficient of stress concentration using a conformed display on a circle of a single radius. *Solid State Phenomena*, 316 SSP. 2021. p. 928-935.
15. Возняк О.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика (частина 1): навч. посіб. Вінницький національний аграрний університет. Вінниця: ТОВ «ТВОПИ». 2021. 280 с.

### References

1. Stuts A.A. Improvement of rolling stamping processes on the basis of modeling of the mechanics of forming blanks. Dissertation 2024 (271) p.
2. Matvijchuk, V., Shtuts, A., Kolisnyk, M., Kupchuk, I., Derevenko, I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51-58.
3. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. On the Choice of Stress Invariants in Solving. *Problems of Mechanics. Strength of Materials* N 35 (3), Plenum Publishing Corporation (USA), May - June, 2003, 217-224.
4. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. 2020. Vol. 844. P.168-181.
5. Aliev I., Zhabankov Y., Martynov S. Forging of shafts, discs and rings from blanks with inhomogeneous temperature field. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (4). 2016. pp. 393-400.
6. Matvijchuk V. A. Development of energy- and resource-saving technologies of procurement production. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. 2022. No. 4 (119). P. 110-119.
7. Matvijchuk V.A., Mikhalevich V.M., Kolisnyk M.A. Evaluation of the deformability of the material of the blanks during direct and reverse extrusion by the rolling stamping method. *Vibrations in engineering and technology*. 2022. No. 1(104). P. 81-91.
8. Matvijchuk V. A. Mikhalevich V. M. Development of processes of local deformation: Theory and practice of processing materials by pressure. *JSC "Motor Sich" Monograph*: 2016. P. 339-363.
9. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A., Dobranyuk Y.V. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. Volume 43, Number 6 (2011), P. 591-603.
10. Mikhalevich V. M., Dobranyuk Yu. V. Modeling of the stress-strain and limit states of the surface of cylindrical samples under end compression. *Vinnitsia: VNTU Monograph.*, 2013. – 180 p. ISBN 978-966-641-532-8.
11. Mikhalevich V. M., Dobranyuk Yu. V., Kraevsky O. V. Comparative study of models of limit plastic deformations. *Herald of mechanical engineering and transport*. 2018. – No. 2(8). P. 56-64.
12. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Bondarenko Y., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2020. pp. 440-445.
13. Sheykin S.Y., Grushko O.V., Melnichenko V.V., Studenets S.F., Rostotskyi I.Y., Iefrosinin D.V., Melnichenko Y.V. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products. *Journal of Superhard Materials*, 43 (3). 2021. pp. 222-230.
14. Shapoval A., Savchenko I., Markov O. Determination coefficient of stress concentration using a conformed display on a circle of a single radius. *Solid State Phenomena*, 316 SSP. 2021. pp. 928-935.
15. Vozniak O.M., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. Modern systems of electric drives. Theory and practice (part 1): teaching. manual Vinnitsia National Agrarian University. Vinnitsia: "TVORY" LLC. 2021. 280 p.