

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**



**АНТОНЕВИЧ ЯРОСЛАВ КАЗИМИРОВИЧ**

УДК 621.74.043.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ З  
ОРГАНІЗАЦІЄЮ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ  
ВИЛИВКІВ У ЗАМКНЕНОМУ РЕЖИМІ**

05.16.04 – Ливарне виробництво

**А в т о р е ф е р а т**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Богушевський Володимир Святославович,**  
Національний Університет України «КПІ» МОН  
України, професор кафедри Фізико-хімічних основ  
технології металів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Селівьорстов Вадим Юрійович,**  
Національна металургійна академія України  
Міністерства освіти і науки України, декан  
Електрометалургійного факультету, м. Дніпро

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Жуков Леонід Федорович,**  
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів, НАН  
України, завідуючий відділом термометрії та фізико-  
хімічних досліджень, м. Київ

Захист відбудеться «11» жовтня 2016 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м.Київ, вул. Політехнічна, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці НТУУ «КПІ» за адресою: м.Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано « 9 » вересня 2016 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доц.



Степанов О.В.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Процес лиття під високим тиском (ЛПТ) – найбільш перспективний спосіб виробництва виливків, що піддається автоматизації, завдяки тому, що все технологічне устаткування повністю механізоване і підготовлене для функціонування у складі автоматизованих систем керування технологічним процесом (АСКТП). Головні його переваги – можливість отримання заготовок з мінімальними припусками на механічну обробку і мінімальною шорсткістю поверхонь, що не оброблюються, забезпечення високої продуктивності й низької трудомісткості виготовлення деталей.

Зміни параметрів металу, що заливається і роботи устаткування призводять до погіршення якості виливків і збільшення кількості повернених виробів. Одночасна стабілізація декількох параметрів неможлива без автоматизації процесу. На підприємствах галузі за відсутності АСКТП значна частина виливків відразу після первинного огляду оператором переплавляється повторно через наявність дефектів, що спричиняє підвищення витрат, зниження продуктивності та зміни параметрів процесу.

Покращити якість виливків повністю в ручному режимі неможливо через велику кількість параметрів, що контролюються, та їх взаємний вплив на перебіг процесу. Передовими закордонними і вітчизняними виробниками постійно створюються та вдосконалюються системи керування процесом. Закордонні системи орієнтовані на високу якість вихідних матеріалів, точно підлаштовані під певний тип машини ЛПТ, мають більш вузькі межі регулювання та налаштувань. Впровадження таких систем неможливе на вже працюючих машинах та недостатньо підлаштоване до вітчизняного виробництва. Вітчизняні ж, як правило, орієнтовані на стабілізацію окремих параметрів процесу лиття незалежно один від одного. Тому постає необхідність розробки комплексної моделі, що працює за єдиним критерієм оптимальності, та створення на її базі замкненої системи керування процесом з мінімальною участю людини при виробництві. Дослідження в даному напрямку з наукової точки зору є актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі фізико-хімічних основ технології металів НТУУ «КПІ» відповідно до ініціативної НДР «Математична модель та система керування машин лиття під тиском», Державний реєстраційний номер 0112U002173.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу лиття під тиском та якості виливків шляхом створення та реалізації моделі та системи керування основними параметрами процесу.

У відповідності до мети вирішувалися наступні задачі:

- порівняльний аналіз існуючих математичних моделей керування процесом у замкнутому режимі;
- дослідження окремого та комплексного впливу параметрів процесу на якість вилівка та визначення шляхів їх регулювання;

- аналіз, розробка і вдосконалення прямих і непрямих методів контролю параметрів технологічного процесу лиття під тиском;
- наукове обґрунтування, дослідження, розробка і реалізація математичної моделі керування процесом, алгоритмів, засобів контролю і регулювання, що підвищують якість і вихід придатного;
- розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом машини лиття під тиском.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес лиття під тиском.

**Предмет дослідження** – математична модель і система керування технологічним процесом лиття під тиском.

**Методи досліджень.** При побудові математичної моделі керування застосовувалися основні положення теорії металургійних процесів і практики ливарного виробництва, теорії автоматичного керування, основи математичного моделювання. У роботі використано стандартні методи хімічного аналізу, металографічних досліджень, електронної мікроскопії та контролю якості.

**Наукова новизна** отриманих результатів:

1. Удосконалено критерій керування технологічним процесом лиття під тиском з мінімізацією кількості повернених виливків і відповідно зниженням вартості самого виливка шляхом здійснення керуючих впливів на основні параметри процесу (температура металу та прес-форми, тиск та швидкість пресування, величина дози металу, час витримки, кількість та склад змащення, зусилля запирання) з корегуванням величини цих впливів за кожним попереднім тактом роботи машини лиття під тиском;

2. Вперше побудовано математичну модель замкнутого циклу виготовлення виливка при литті під високим тиском, що відрізняється сукупністю контурів регулювання та їх поєднання в цілісну систему, яка працює за єдиним оптимальним критерієм, а саме контурів контролю та регулювання температури металу та прес-форми, дозування та корегування величини дози металу, регулювання швидкості прес-поршня, запирання та розмикання прес-форми, вилучення виливка та контролю його якості в автоматичному режимі;

3. Покращено регулювання основних параметрів процесу шляхом підвищення точності контролю, зменшення часу реакції, що дозволило об'єднати контури регулювання в єдину замкнуту систему на всіх стадіях технологічного циклу від підготовки шихтових матеріалів до вилучення готового виливка та контролю його якості.

4. Вперше створено модель побудови температурного поля прес-форми при ритмічній роботі машини ЛПТ, яка враховує, що в процесах акумуляції – деакумуляції теплоти приймає участь тільки частина товщини прес-форми – активний шар.

5. Удосконалено математичну модель теплової обробки шихти в ванні індукційної тигельної печі шляхом врахування вимушених коливань ванни під дією електричного струму та динаміки процесу розплавлення твердої частини в залежності від насипної щільності. Показано, що модель може бути використана

в інших теплових технологічних процесах, в яких шихта складається із твердої і рідкої частини.

**Практичне значення одержаних результатів.** Одержані в роботі наукові результати та закономірності становлять практичний інтерес при створенні та вдосконаленні систем керування технологічним процесом лиття під тиском. Розроблена система дозволяє використання її як для однієї машини, так і для комплексу машин лиття під тиском на підприємствах важкої промисловості для оптимізації виробництва та збільшення виходу придатного; дозволяє підвищувати якість та зручність контролю процесу в цілому, вносити доцільні корективи в значення параметрів процесу безпосередньо в режимі реального часу; система складається з інформаційної та замкненої підсистеми, що підвищує її універсальність та розширює можливості застосування; критерій оптимізації, на якому засновується модель та система керування покращений та обмежений за вхідними параметрами що підвищує точність керування і як наслідок кінцеву якість продукції. Розроблена модель та система керування рекомендована для встановлення як при створенні нових ливарних комплексів так і для переоснащення існуючих підприємств та цехів лиття під тиском.

Результати наукових досліджень передані для використання на НВП Смілянський електромеханічний завод з метою покращення техніко-економічних показників виробництва складових частин електродвигунів методом лиття під тиском, деякі положення дисертації включені до учбових програм Інженерно-фізичного факультету, НТУУ «КПІ».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення та результати дисертаційної роботи, що захищаються, одержані автором самостійно. Проведено літературний огляд, зроблено відповідні висновки, сформульовано мету та задачі дослідження, проведено підготовку зразків та лабораторні досліди. У роботах, що написані у співавторстві, особисто дисертанту належать такі положення: розробка методів і засобів безперервного контролю технологічних параметрів в роботі машини для лиття під високим тиском; розробка і дослідження нового підходу до проблеми створення математичної моделі керування процесом лиття під тиском; критерій керування технологічним режимом ЛПТ; створення моделі керування, що охоплює найважливіші чинники в отриманні якісного вилівка на основі теоретичного обґрунтування і розробки методів отримання достовірної й надійної інформації про хід процесу; розробка системи керування машиною лиття під тиском, що складається з інформаційної підсистеми та підсистеми замкнутого керування циклом.

**Апробація** основних розділів дисертаційної роботи проводилася при обговоренні доповідей автора на наступних науково-технічних, практичних конференціях і семінарах: Міжнародна конференція-виставка “Литво” (2012, 2013, 2014 рр.), м. Запоріжжя; Всеукраїнська конференція “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра” 2010 – 2014 рр., м. Київ; Міжнародна конференція “Автоматика-2012”, м. Київ; – 2012 р.; Міжнародна конференція “Нові матеріали та обладнання для роботи в екстремальних умовах”, 2012, 2013

рр. м. Київ; Міжнародна конференція “Нові ливарні матеріали та технології”, 2012-2014 рр., м. Київ; Міжнародна конференція “Матеріали та технології в обробці металів тиском” 2012, м. Краматорськ; Міжнародна конференція “Інформаційні технології в освіті, науці та техніці” 2012, м. Черкаси.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 25 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 1 авторське свідоцтво на корисну модель, 15 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 107 найменувань. Об’єм складає 173 стор., з них 157 основного тексту, 11 таблиць, 47 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність дисертаційної роботи, сформульовані її мета і задачі, що вирішуються. Також визначені шляхи досягнення поставленої мети, яка полягає у підвищенні ефективності процесу лиття під тиском шляхом створення та реалізації моделі та системи керування основними параметрами процесу, об’єднання їх у цілісну систему керування в замкненому режимі. Визначена наукова новизна та сформульовано наукові та практичні результати, що виносяться на захист.

У **першому розділі** розглянуті різновиди, характеристики та параметри процесів лиття під тиском, обрано об’єкт дослідження – машину лиття під тиском з холодною горизонтальною камерою пресування, як найбільш розповсюджений тип машин на підприємствах України та близького зарубіжжя. Проведено аналіз існуючих математичних моделей, проаналізовані принципи їх побудови та класифікацію. Проаналізовано існуючі схеми та методи виконання технологічних операцій при роботі машини ЛПТ.

Проведений аналіз дозволив зробити наступні висновки:

- пристрої контролю технологічних параметрів процесу недосконалі, й існує можливість мати більш ясну картину протікання фізико-хімічних процесів в системі та покращувати керованість параметрами, знаходячи та встановлюючи нові більш точні та чутливі прилади;
- на вітчизняних підприємствах здебільшого автоматизація ЛПТ знаходиться на досить низькому рівні, а подекуди відсутня зовсім, тому моделювання деяких параметрів роботи машин лиття під тиском, а в кінцевому результаті цілісна автономна автоматична система керування технологічним процесом дає можливість різко підвищити якість виливків
- керування окремими параметрами процесу ЛПТ не підпорядковане єдиному критерію, що в багатьох випадках призводить до втрати якості виливків.

У **другому розділі** описані характеристики устаткування, виливків що досліджувались та контрольно-вимірювальних пристроїв. Наведено методіку опрацювання даних, математичні моделі окремих контурів системи.

Дослідження технологічних закономірностей проводились на автоматизованих машинах лиття під високим тиском А711А07(А711А08), що призначені для виробництва виливків з кольорових металів та сплавів в цехах серійного та масового виробництва. В комплект автоматизованої машини входить машина лиття під тиском, пристрій для заливки металу, маніпулятор для змащування прес-форми, установка для змащування прес-плунжера. Машини можуть виконувати в налаштувальному та автоматичному режимі наступні операції: закривання дверей, змикання прес-форми, заливка металу в камеру пресування, трифазне пресування, розкриття прес-форми, виштовхування вилівка, розкриття дверей, змащування прес-форми, змащування прес-плунжера.

Інформативність контрольованих параметрів оцінювалась за методами регресійного аналізу. Задача відновлення залежностей вектора вхідних параметрів від вектора вихідних параметрів має ту особливість, що відсутність інформації про відновлену залежність заповнюється вибіркою її значень. Таблиця з  $n$  рядків та  $m + 1$  стовпців, де  $i$ -тий рядок інтерпретується як вектор  $(x, y) = (x_1, \dots, x_m, y)$  у  $(n + 1)$ -му просторі, є вихідною базою для використання будь-якого методу регресійного аналізу.

У **третьому розділі** розглянуто структуру та принципи побудови моделі, шляхи впливу на основні параметри процесу, сформульовано критерій оптимальності якості керування, наведені алгоритми контролю та регулювання контурів керування та отримання зворотного зв'язку.

АСКТП машини ЛПТ функціонує в темпі з процесом, тобто в реальному часі (онлайн), що створює підвищені вимоги до швидкості роботи операційного пристрою, особливо в період підпресовки.

Сукупний критерій оптимізації представляємо у формі

$$I = \alpha_1\Pi + \alpha_2З + \alpha_3k \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $\Pi$  – продуктивність, кількість якісних виливків за проміжок часу;  $З$  – затрати на виробництво, грн.;  $k$  – вихід придатного, відношення кількості готових придатних виливків до кількості запресовок;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коефіцієнти, причому  $\alpha_1 < 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 < 0$ .

Права частина формули (1) була представлена через параметри керування, на межі зміни яких накладені технологічні обмеження. Для спрощення запису використано наступні заміни:

$X_1 = m_{Me}$  – кількість металу на один виливок з ливниковою системою (ЛС) та прес-залишком;

$X_2 = t_{Me}$  – температура металу в ємності;

$X_3 = v_{np}$  – швидкість пресування;

$X_4 = \tau_{eum}$  – час витримки металу в прес-формі;

$X_5 = P$  – тиск пресування;

$X_6 = t_{nf}$  – температура прес-форми;

При аналізі складових процесу були висунуті наступні обмеження:

$$\tau_3 V_{dem} < X_1 < \tau_3 (V_{dem} + V_{LC}), \quad (2)$$

де  $\tau$  – тривалість заливки,  $V$  – об’єми деталі та ливникової системи з прес-залишком відповідно,

$$T_{pn} + (\Delta T_k + \Delta T_{np} + \Delta T_l) \leq X_2 < (T_{pn} + (\Delta T_k + \Delta T_{np} + \Delta T_l)) + 20^0 \quad (3)$$

де  $T_{pn}$  – температури роздаточної печі,  $\Delta T$  – теплові втрати в каналі МГД насосу, камері пресування та ливникової системі відповідно.

$$X_3 \leq v_{кр}, \quad (4)$$

де  $v_{en} = \sqrt{2p_{np}/(\rho_m(1-f/F))^2}$  – швидкість впуску металу в форму,

$p$  – тиск пресування,  $\rho$  – густина металу,  $f$  та  $F$  – площа перерізу живильників та вилівка відповідно;  $v_{кр} = 59g^{0,42}(\delta_{жив}/\delta_{вил})^{0,54}$ .

Тут  $g$  – в’язкість,  $\delta$  – характерний розмір перерізу живильників та вилівка відповідно.

$$\tau_1 + \tau_2 \leq X_4, \quad (5)$$

де  $\tau_1 = \delta_0 + \delta_1 t_{роз} + \delta_2 t_{ф}$  – час охолодження деталі ( $\delta$  – коефіцієнти,  $t$  – температури розплаву та форми відповідно);  $\tau_2 = \beta_0 + \beta_1 t_p + \beta_2 l$  – час охолодження прес-залишку ( $\beta$  – коефіцієнти,  $t$  – температура розплаву,  $l$  – довжина прес-залишку)

$$\lambda_{ф} \rho_m g_m^2 l / (4\delta_{вил}) \leq X_5 \leq \rho_m a_m g_m l_{ф} / (a_m \tau_{п} - l_{ф}), \quad (6)$$

де  $\lambda_{ф} \rho_m g_m^2 l / (4\delta_{вил})$  – величина зміни тиску в потоці металу ( $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічних опорів від шорсткості форми);  $\rho_m a_m g_m l_{ф} / (a_m \tau_{п} - l_{ф})$  – підвищення тиску в формі в момент гідравлічного удару;  $a$  – швидкість розповсюдження ударної хвилі в рідкому металі,  $l_{ф}$  – довжина порожнини форми,

$\tau_{п}$  – тривалість перекриття потоку, що дорівнює 0,001 с.

$$T_k > X_6, \quad (7)$$

де  $T_k = (T_m b_m + T_{ф} b_{ф}) / (b_m + b_{ф})$  – температура контактного шару форми ( $b$  – коефіцієнти теплової акумуляції металу і форми відповідно);

Оптимальні значення керуючих впливів  $X_1 \dots X_6$  визначали методом найшвидшого спуску.

В якості критерію керування вибрано коефіцієнт первинного виходу виливків,  $k$ , що дорівнює

$$k = n_{пр} / n_3, k[0 \div 1] \rightarrow \max. \quad (8)$$

де  $n_{пр}$  – кількість придатних виливків,

$n_3$  – загальна кількість виливків.

Критерій цільової функції керування об’єктом можна охарактеризувати якістю продукції – зовнішнім виглядом поверхні вилівка та її поруватістю.



Зовнішній вигляд виливка як сумарний критерій може бути представлений у вигляді виразу, що враховує важливість дефектів

$$y_1(M) = B_1 / (1 + K_T + K_{HP} + K_3 + K_B + K_d + K_C + K_H), \quad (9)$$

де  $y_1(M)$  – сумарний критерій якості виливка, що враховує зовнішній вигляд його поверхні для  $M$ -го циклу, бал;

$B_1$  – критерій якості ідеального виливка без дефектів, бал;  
 $K_T, K_{HP}, K_3, K_B, K_d, K_C, K_H$  – коефіцієнти присутності відповідно тріщин, недопресовки, задернів, вириву, деформації, слідів змазки, незлитин.

Пористість виливка як сумарний критерій якості можна записати у вигляді виразу, що враховує важливість показників, по зонах

$$y_2(M) = B_2 / \left( 1 + \sum_{j=1}^s \frac{1}{1 - K_{MPj}} + \sum_{q=1}^t K_{pq} + \sum_{i=1}^v K_{che} \right) \quad (10)$$

де  $y_2(M)$  – сумарний критерій якості виливка, що враховує його пористість для  $M$ -го циклу, бал;

$B_2$  – критерій якості ідеального виливка без пор, бал;

$K_{MPj}, K_{pq}, K_{che}$  – коефіцієнти, що характеризують відповідно місце розташування в  $j$ -й, розміри в  $q$ -й та число пор в  $i$ -й зонах виливка;

$s, t, v$  – числа зон ділення виливка за ознаками, що характеризують відповідно місце розташування, розміри та число пор.

Причинами виникнення дефектів виливка можуть виступати недотримання різноманітних параметрів процесу. Керування такими параметрами як дозування розплаву, температура розплаву, температура прес-форми, зусилля запирання, швидкість пресування та іншими відіграє визначаючу роль у формуванні якості отриманого виливка. Застосування вказаного критерію цільової функції найраціональніше при автоматичному контролі якості виливків за допомогою ЕОМ.

Аналіз процесу ЛПТ виявив наступні змінні параметри  $X_i$  ( $i \in 1 \dots n$ ), які мають бути включені в математичну модель: температура металу в дозаторі ( $i = 1$ ) і прес-формі ( $i = 2$ ), тривалість витримки металу в камері пресування ( $i = 3$ ) і виливка в формі ( $i = 4$ ), тривалість нанесення змазки (маса змазки) ( $i = 5$ ) і обдувки стисненим повітрям локальних ділянок форми ( $i = 6$ ), швидкість пресування ( $i = 7$ ), піковий тиск підпресування ( $i = 8$ ) і тривалість його збільшення ( $i = 9$ ). Найвагомий і повний компенсаційний параметр процесу – швидкість пресування.

Процес ЛПТ на  $N$ -му такті може бути описаний рівнянням:

$$y(N) = \sum_{i=1}^n h_i(N) x_i(N), \quad (11)$$

де  $y(N)$  – фактичне значення критерію якості виливка;

$h_i(N)$  – фактична оцінка  $i$ -го технологічного параметру процесу;

$x_i(N)$  – можливий компенсувальний вплив за  $i$  – м параметром.

Прогнозовану модель процесу на  $N$  – му такті знаходимо у вигляді:

$$y_*(N) = \sum_{i=1}^n h_i(N-1)x_i(N), \quad (12)$$

де  $y_*(N)$  – прогнозоване значення критерію якості виливка;

$h_i(N-1)$  – фактична оцінка  $i$  – го параметру на попередньому такті.

Уточнення оцінки  $i$  – го параметра проводимо за ітераційним алгоритмом

$$h_i(N) = h_i(N-1) + \frac{y(N) - y_*(N)}{\sum_{i=1}^n x_i^2(N)} x_i(N). \quad (13)$$

Підтримання заданої якості виливка засновано на принципі компенсації збурень технологічних параметрів, що з'являються на фіксованому такті роботи машини ЛПТ.

Знаючи компенсуючі можливості параметрів, що впливають на якість виливка й їх значення в даному циклі, розрахуємо величину компенсаційного впливу

$$y_{**}(M) = h_1(M-1)x_1(M) + h_2(M-1)x_2(M) + \dots + h_i(M-1)x_i(M), \quad (14)$$

де  $y_{**}(M)$  – значення критерію якості, яке отримується при підстановці в рівняння моделі значень технологічних параметрів на  $M$ –му циклі до такту пресування;

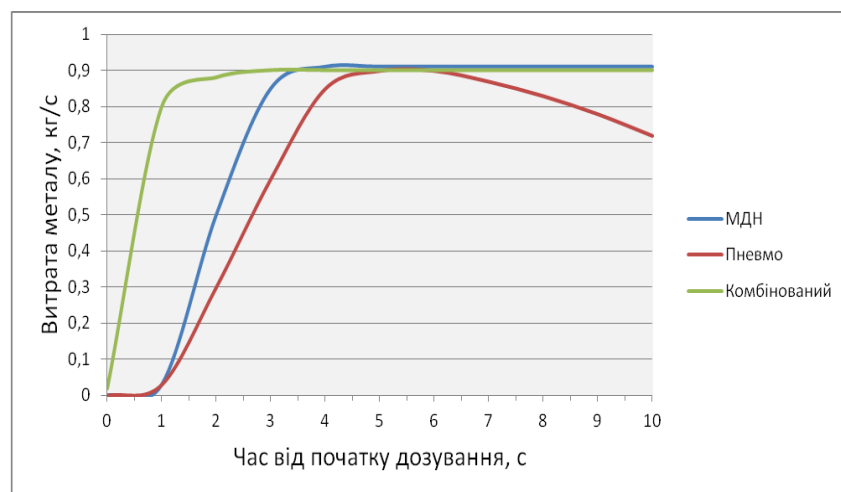
$h_1(M-1), h_2(M-1) \dots + h_i(M-1)$  – оцінки фактичних значень параметрів для такту пресування на попередньому циклі.

Для найточнішого описання процесу проведено ретельний аналіз всіх контурів системи. Розглянуто принципи, алгоритми та системи керування окремими операціями та характеристиками процесу в контурах: приготування розплаву необхідної температури, дозування розплаву, температурних параметрів форми, зусилля запирання прес-форми, швидкості пресування, допоміжних операцій та контролю якості виливків.

Проведений порівняльний аналіз дозаторів розплаву дозволив визначити та вирішити існуючі недоліки шляхом поєднання пневматичного дозатора та МДН. Комбіноване дозування дозволяє підтримання рівня металу на постійному рівні біля носка ємності, а дозування виконувати безпосередньо МДН.

Також запропоновано технічне рішення, яке дозволяє в якості мірної ємності використовувати прес-камеру машини ЛПТ. Винайдений пристрій визначає дозу металу в прес-стакані в момент різкого гальмування прес-поршня при заповненні металом всього перерізу ємності. На контрольовану величину дози металу не впливають порушення процесу заповнення прес-форми (недоливи, вихід металу із роз'ємна прес-форми), що сприяє підвищенню точності дозування. Температурні параметри процесу ЛПТ умовно можна розділити на процеси, які протікають у плавильному агрегаті, та безпосередньо в

прес-формі. Промислова апробація пристрою дозволяє збільшити вихід придатного на 0,5% за рахунок зменшення маси прес-залишку.



**Рис.1.** Характер зміни витратних характеристик різних дозаторів з часом дозування

індукторами. Запропонований алгоритм дозволяє змінювати ступінь нагріву силою електричного струму в нагрівальній печі, який ступінчасто керується тиристорним трьохфазним регулятором напруги за допомогою сухих контактів по схемі трипозиційного регулятора з зоною нечутливості  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . В ланцюжку керування тиристором підключаються чи закорочуються два резистори, в результаті чого забезпечується три ступеня регулювання: нагрів відсутній (обидва резистори підключені), слабкий нагрів (закорочений один резистор) і повний (закорочені обидва резистора).

**Таблиця 1.** Алгоритм керування температурою металу в дозаторі.

| Температурний діапазон          | Значення температури металу, з урахуванням |                             | Ступінь нагріву |        |
|---------------------------------|--|-----------------------------|-----------------|--------|
|                                 | попереднього виміру $t_1$                  | поточного виміру $t_2$      | Слабкий         | Повний |
| $t_2 \geq t_{\text{макс}}$      | -  | -                           | -               | -      |
| $t_2 \leq t_{\text{мін}}$       | -  | -                           | +               | +      |
| $t_{\text{макс}} > t_2 > t_3$   | -  | $t_2 - t_3 \geq \Delta t_1$ | -               | -      |
| $t_{\text{макс}} > t_2 > t_3$   | $t_2 - t_1 \geq \Delta t_2$                | $t_2 - t_3 < \Delta t_1$    | -               | -      |
| $t_{\text{макс}} > t_2 > t_3$   | $t_2 - t_1 < \Delta t_2$                   | $t_2 - t_3 < \Delta t_1$    | +               | -      |
| $t_3 \geq t_2 > t_{\text{мін}}$ | $t_2 - t_1 \geq \Delta t_2$                | $t_3 - t_2 \leq \Delta t_1$ | -               | -      |
| $t_3 \geq t_2 > t_{\text{мін}}$ | $t_2 - t_1 < \Delta t_2$                   | $t_3 - t_2 \leq \Delta t_1$ | +               | -      |
| $t_3 \geq t_2 > t_{\text{мін}}$ | -  | $t_2 - t_3 \leq \Delta t_1$ | +               | +      |

температури металу відповідно,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  – уставки відхилення температури металу від заданої та перепаду температури металу по часу відповідно.

Сутність алгоритму полягає в знятті показників температури, їх порівняння із заданими значеннями, визначення уставок за показниками

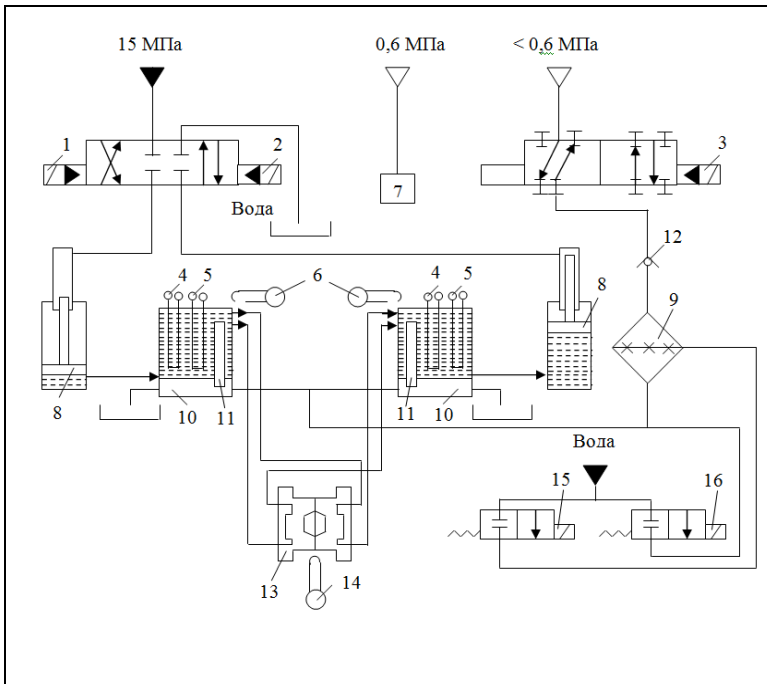
Досліджено фактори, що впливають на температуру металу. До них можна віднести характеристики печі, втрати тепла металом при його транспортуванні до заливного вікна, охолодження рідкого металу, а потім і затверділого вилівка в порожнині прес-форми, та ін.

Нагрівання металу в дозаторі проводиться

Алгоритм керування температурою металу в дозаторі реалізовано мікроконтролером в якості регулятора (табл. 1).  $t_{\text{мін}}$ ,  $t_{\text{макс}}$  – відповідно мінімально та максимально допустимі температури металу в дозаторі,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  – значення заданої і двох послідовних замірів

попереднього виміру та коректування їх шляхом увімкнення двоступінчастого нагріву. Якщо в колонці ступінь нагріву відсутні позначки, то нагрів не потрібен.

Теплові умови формування виливків в порожнині прес-форми також є одним з найважливіших параметрів процесу, так як мають великий вплив на структуру металу кінцевого виливка, його поруватість, цілісність, тощо. Для згладжування коливань температури, розроблено установку термостатування прес-форми, структурна схема якої наведена на рисунку 3.



**Рис. 2.** Структурна схема установки термостатування

охолоджується водою за допомогою теплових труб 11. Для запобігання руйнування теплообмінника при різкому пароутворенні холодоагенту спочатку електромагнітами 3 і 15 подається водо-повітряна суміш, яка поступово з включенням електромагніта 16 переводиться на водяний компонент (електромагніти 3 і 15 при цьому відключаються).

Наявність повітря в магістралі контролюють за допомогою реле тиску газу 7. Тепловий режим термостата коректується за показниками терморпарі 14, встановленої в прес-формі.

Випробування системи регулювання температури прес-форми показало можливість зменшення кількості браку на 0,5% та підвищення продуктивності машини ЛПТ на 1 %.

В основу технічного рішення контролю зусилля запирання покладено непрямий контроль за величиною тиску масла в гідравлічному циліндрі замикання. Ідентифікація характерних ділянок на кривій зміни тиску масла в гідравлічному циліндрі замикання дозволяє однозначно інтерпретувати

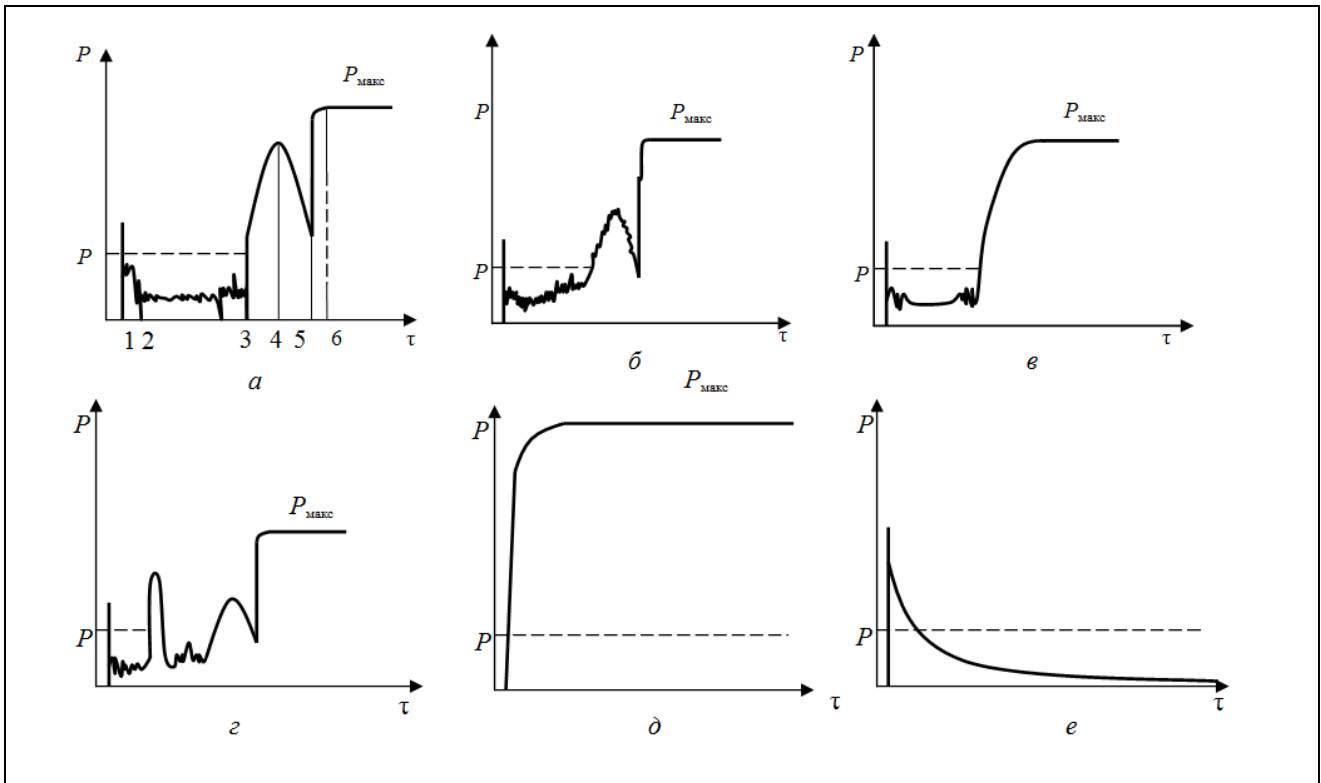
Температура прес-форми регулюється періодичним прокачуванням через теплообмінні канали в прес-формі 13 високотемпературної робочої рідини. Температура рідини регулюється в двох теплообмінниках 10, кожен з яких знаходиться в режимі нагріву або охолодження. Теплоносій перекачується насосом відповідного теплообмінника.

Термостатуюча рідина до заданої температури нагрівається двома електронагрівачами (ТЕН) 4, 5 і контролюється терморпарі 6 типу ТХК. Термостат 10

правильну настройку механізму запирання. Зусилля запирання контролюється тільки при закритій прес-формі.

Для визначення правильності спрацьовування механізму запирання контролювали тиск в циліндрі запирання. Встановлено, що поведінка кривої тиску в ході запирання (рис. 3) повністю характеризує процес.

Запропоновано пристрій, що здійснює контроль зусилля запирання прес-форми в машині лиття під тиском з більш високою надійністю, так як цей сигнал формується тільки при замкненій прес-формі.



*Рис. 3. Криві зміни тиску в гідроциліндрі механізму замикання в період змикання прес-форми  $\tau$ :  $P$  і  $P_{\text{макс}}$  – тиск в гідроциліндрі відповідно порогове і максимальне значення, що забезпечуються насосами машини ЛПТ.*

Контроль зусилля запирання прес-форми за характером зміни тиску в циліндрі замикання дозволяє автоматично з високою надійністю визначити шуканий параметр. При цьому діагностується як нормальний режим механізму замикання, так і аварійний з аналізом причин відмови. Графіки характерні для таких випадків: а – процес при правильній роботі механізму запирання, б – те ж, але з меншим зусиллям запирання, в – настройка механізму на неприпустимо велике зусилля запирання, г – сталося передчасне наростання тиску до моменту змикання двох половин прес-форми, така ситуація можлива при пошкодженні механізму замикання, д – свідчить про те, що шток гідроциліндра не почав рух, е – несправність гідравлічної частини машини.

Використання описаного алгоритму дозволяє виключити вихлюпування металу при пресуванні, що збільшило вихід придатного на 0,3% та продуктивність машини на 0,5%.

Застосовано новий підхід до регулювання такого важливого технологічного процесу як *швидкість прес-поршня*. За відомою величиною швидкості пресування на основі напівемпіричних залежностей можна визначити такі параметри процесу, як тривалість заповнення порожнини форми і швидкості впуску металу у форму. Оптимальне заповнення металом прес-форми забезпечується його введенням в прес-камеру з постійним прискоренням і подальшою запресовкою з постійною швидкістю.

Управління швидкістю прес-поршня здійснюється по пройденому ним ефективному шляху  $L$ , м, що визначається за формулою

$$L = (n + \Delta n_1)L^*, \quad (15)$$

де  $n$  – число імпульсів, що надходять з датчика ходу прес-поршня;

$\Delta n_1$  – поправка;

$L^*$  – шлях, що пройдений щільною лінійкою між двома послідовними імпульсами, м.

Поправку до числа імпульсів  $\Delta n_1$  визначають залежно від маси, температури і в'язкості металу за формулою

$$\Delta n_1 = [1 + \beta_1 m/m_n - \beta_2 (t - t_n) + \beta_3 (\vartheta - \vartheta_n)]/L^*, \quad (16)$$

де  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коефіцієнти;

$m, m_n$  – відповідно фактичне і нормоване значення дози металу, кг;

$t, t_n$  – відповідно фактичне і нормоване значення температури металу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\vartheta, \vartheta_n$  – фактичне і нормоване значення кінематичної в'язкості металу,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Випробування системи керування контуром пресування показали надійне виключення гідравлічного удару наприкінці запресування без урахування коливань порції металу та його властивостей.

При відсутності безперервного інструментального контролю температури металу в печі для отримання якісних виливків, виникає необхідність прогнозування температурного режиму об'єкта за математичною моделлю, що враховує як тепловий стан ванни, так і втрати теплоти на нагрів футерівки.

Процес теплової обробки металошихти в ванні ІТП, лімітуюча ланка якого – зовнішній теплообмін, протікає при початкових умовах, що враховують температуру загрузки і розплав, їх масу, насипну щільність загрузки, яка забезпечує ефективну поверхню контакту з розплавом на границі розділу фаз, теплофізичні характеристики робочих тіл, питому потужність печі й т.д.

Процес теплової обробки загрузки відбувається з використанням ентальпії перегріву ЗРМ і частково теплоти плавлення металу згідно балансу

$$\beta(\varphi)m[c(t_l - t_n) + \vartheta] = m_0[c_p(t_{кр.} - t_l) + \mu\vartheta], \quad (17)$$

де  $\beta(\varphi)$  – масова частка твердої металошихти  $\varphi$  – го виду, що розплавляється в момент завантаження у ванну;

$m, m_0$  – маса загрузки і залишку рідкого металу (ЗРМ), кг;

$c, c_p$  – середня питома теплоємність твердого і рідкого металу, Дж/(кг·К);  
 $t_l, t_{к.р.}$  – температура ліквідуса заправки середнього хімічного складу і кінцева температура рідкого металу, °С;

$t_{п}$  – середня початкова температура шихти в момент її завантаження у ванну, °С;

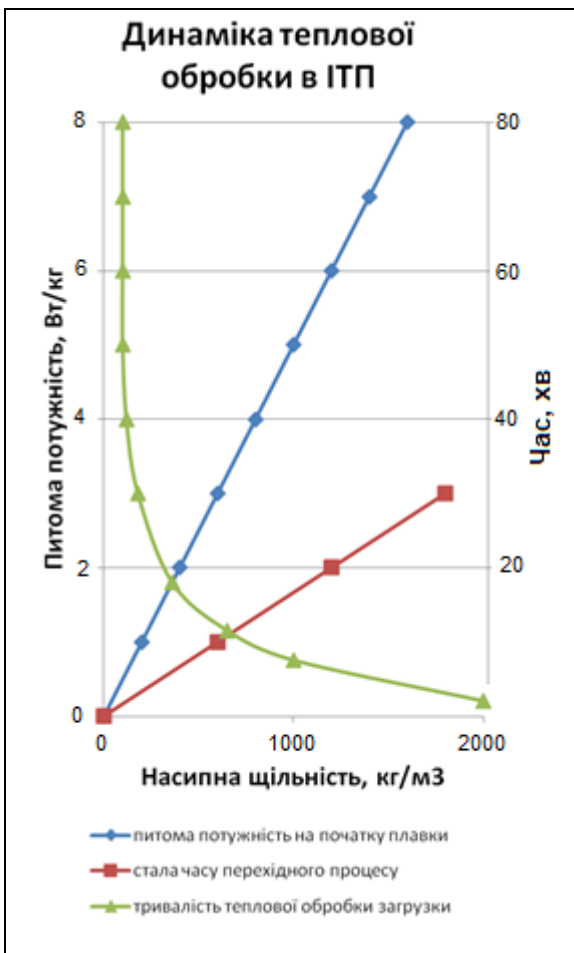
$\vartheta$  – питома теплота плавлення металу, Дж/кг;

$\mu$  – масова доля ЗРМ, що віддає теплоту плавлення на обробку заправки.

В процесі плавки в ІТП між ванною рідкого металу та твердими тілами (заправка, футерівка тигля) відбувається теплообмін при граничних умовах третього роду на вогневій поверхні.

На основі реальних даних отримуємо

$$t_p - t|_{x=0} = \lim_{\frac{\lambda}{\alpha} \rightarrow 0} \left( -\frac{\lambda}{\alpha} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) = 0, \quad (18)$$



**Рис. 4.** Розрахункові залежності, що характеризують динаміку теплової обробки в ІТП алюмінію різної насипної щільності.

Як видно з рис. 4, при одній і тій самій загрузці середня швидкість теплової обробки шихти зменшується зі збільшенням його насипної щільності приблизно в 2 рази при послідовному

тобто температура сприймаючої поверхні твердого тіла по ходу плавки прагне до температури металу. Отже, гранична умова третього роду перетворюється в більш просту граничну умову першого роду.

Основний режимний параметр системи – вимушена швидкість зміщення частинок робочого тіла.

Коливання ванни знижують опір переносу теплоти. Розрахунок показує, що додатний вклад в процес теплопереносу в ванні від гідродинамічного осцилюючого ефекту складає 6,2 %, що дає можливість збільшити на 1,6 % масову долю твердої заправки, що переробляється.

Рівняння теплообміну між ванною та поверхнею шматків можна записати спрощеним диференціальним рівнянням першого порядку з постійними коефіцієнтами

$$\frac{mc_y}{60\lambda_p HF} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} + t = t_{к.р.}, \quad (20)$$

яке характеризує процес динаміки нагріву, розплавлення та перегріву заправки з інерційним запізненням, хв.

Як видно з рис. 4, при одній і тій самій загрузці середня швидкість теплової обробки шихти зменшується зі збільшенням його насипної щільності приблизно в 2 рази при послідовному

переході з одного виду загрузки на іншу (20, 10 і 5 °С/хв.). При верхньому обмеженні питомої корисної потужності ІТП до 200 Вт/кг в початковий період (20 – 25 % тривалості плавки) загрузка обробляється в основному теплотою, що акумульована ЗРМ.

На основі створеного математичного опису теплової обробки загрузки в ІТП розроблено алгоритм прогнозування температури металу в рамках АСКТП плавки, який показав високу збіжність з експериментальними даними і забезпечив точність отримання розплаву заданої температури не нижче 1 %. Стандартне відхилення температури металу зменшилось на 4,7 °С, що дозволило значно покращити якість керування і ТЕП процесу.

*Температурне поле прес-форми* знаходимо з умови не наскрізного одномірного нагріву напівобмеженої плоскої стінки при граничних умовах першого роду у вигляді осцилюючого функціоналу

$$\begin{cases} \partial(\Delta t) / \partial(\Delta \tau) = a_{\phi} \partial^2(\Delta t) / \partial x^2; (\Delta \tau > 0; 0 \leq x \leq \infty); \\ \Delta t|_{x=0} = \Delta t_*|_{x=0} \cos(\pi + 2\pi \Delta \tau / \tau_{\text{ц}}) \\ \partial(\Delta t) / \partial x|_{x \rightarrow \infty} = 0 \\ \Delta t|_{x \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

де  $\Delta t$  – поточне значення періодичної складової температури прес-форми по ходу ливарного циклу, °С;

$\Delta \tau = \tau - n\tau_{\text{ц}}$  – поточний час ливарного циклу, що відраховується від моменту впуску металу в порожнину прес-форми, с;

$\tau$  – поточний час, с;

$n$  – кількість ливарних циклів;

$\tau_{\text{ц}}$  – тривалість ливарного циклу, с;

$a_{\phi}$  – температуропровідність матеріалу прес-форми, м<sup>2</sup>/с;

$x$  – лінійна координата прес-форми в напрямі нормалі до поверхні сполучення виливка і форми, м;

$\Delta t|_{x \rightarrow 0} = 0,5(t_k - \bar{t})$  – амплітуда коливань температури на контактній поверхні протягом ливарного циклу, °С;

$\bar{t}$  – значення незмінної температури прес-форми, °С.

Розв'язання системи (23) має вигляд

$$\Delta t = \Delta t_*|_{x=0} \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{Fo_x}}\right) \cos\left(\pi + 2\pi \frac{\Delta \tau}{\tau_{\text{ц}}} - \sqrt{\frac{\pi}{Fo_x}}\right) \quad (24)$$

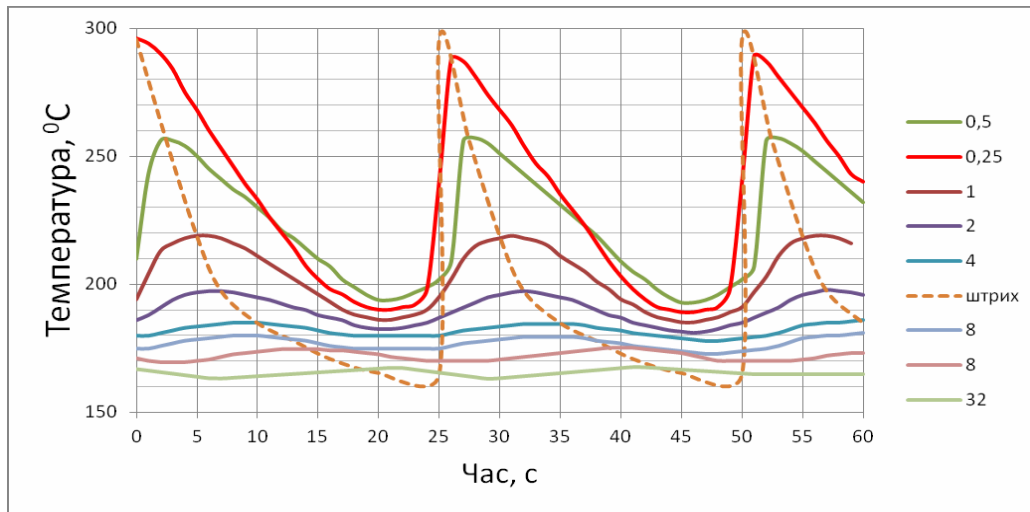
де  $Fo_x = a_{\phi} \tau_{\text{ц}} / x^2$  – критерій Фур'є, що варіюється в просторовій координаті.

Аналіз виразу (24) показує, що в будь-який момент циклу розподіл температури в шарі, що прилягає до контактної поверхні, набуває форми хвилі, що коливається відносно неперіодичної складової температурного поля. Амплітуда періодичної частини зменшується з глибиною по експоненціальному закону, що визначається множителем  $\exp\left(-\sqrt{\pi / Fo_x}\right)$ . Частота температурних



коливань по товщині прес-форми співпадає з частотою коливань граничної умови, а фаза відстає від фази коливань температури на границі в міру віддалення від неї шару, що розглядається.

Температурні градієнти в приграничному шарі прес-форми змінюють свій знак.



**Рис. 5.** Експериментальне температурне поле прес-форми при ритмічній роботі машини ЛПТ: вертикальні пунктирні лінії ( $\tau_{\text{ч}} = 0$ ) – моменти впуску металу в порожнину прес-форми; нахилені пунктирні лінії – траєкторії температурної хвилі; цифри біля кривих – відстані від контактної поверхні прес-форми, мм.

Контроль якості виливків може бути здійснений безпосередньо на дільниці виробництва виливків. Можливе встановлення маніпулятора з механічним захватом, що працює від програмного контролера, і виконує наступні операції: вилучення відливки; її охолодження з одночасним виміром об'єму (якщо об'єм виливка менше розрахункового, то вона зразу переноситься у тару браку); зважування виливка; рентгеноскопію; обрубку ливників і облою; передача виливка на укладальник продукції.

Таким чином запропоновано технічні рішення для всіх контурів системи, що дозволяють отримувати в режимі он-лайн інформацію про перебіг процесу, передавати дані до обчислювального комплексу та оперативно керувати параметрами процесу, відповідно показникам якості виливка на попередньому такті.

У **четвертому розділі** представлено принципи побудови системи замкненого керування, розроблено дворівневу структуру технічного забезпечення замкненої системи керування, наведені технічні засоби та засоби обчислювальної техніки, функціональні можливості та вимоги до них. Розроблено та представлено склад АСКТП машиною лиття під тиском.

Передача керуючому обчислювальному комплексу (КОК) функцій автоматизації технологічного процесу значно підвищує функціональні можливості АСКТП, якість інформації, що отримана, і ефективність автоматизації процесу в цілому.

АСКТП повинна виконувати інформаційні й керуючі функції. Інформаційні функції:

– автоматичний збір і первинна обробка інформації, зокрема вимірювання параметрів, фільтрація вимірів, перевірка інформації на достовірність, масштабування;

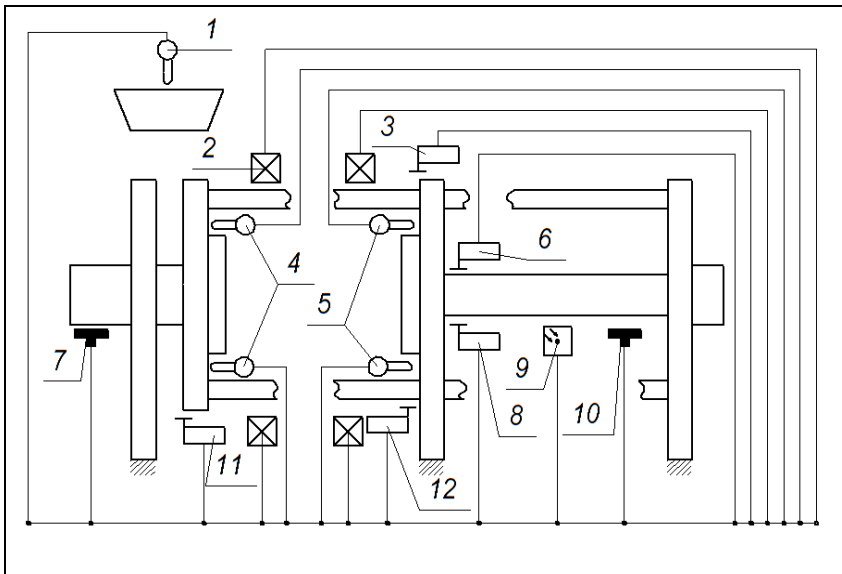
– оперативне відображення технологічних параметрів, сигналізація про вихід параметрів за критичні межі, видача значень параметрів у АСК верхнього рівня й оператору.

Керуючі функції:

– замкнуте керування процесом, зокрема порівняння поточних значень

параметрів зі заданими, визначення керуючих діянь, видача їх на виконавчі механізми, а також повне керування циклом машини по заданій циклограмі;

– замкнуте керування процесом у напівавтоматичному режимі (виконуються визначена кількість тактів керування машиною за циклограмою, для подальшої роботи необхідна команда оператора-ливарника).



**Рис. 6.** Структурна схема автоматизації машини ЛПТ, що оснащена інформаційно-вимірною системою.

Система керування

вирішує наступні задачі: термостатування сплаву в заливальній установці; розрахунок і регулювання дози сплаву; регулювання температури робочої рідини у гідросистемі, тиску робочої рідини машини ЛПТ; розрахунок і регулювання тривалості кристалізації відливки й прес-залишку; контроль положення і регулювання швидкості прес-поршня при запресовці; регулювання тиску і тривалості підпресовки, змикання форми й зусилля закривання; програмне керування циклом машини ЛПТ, маніпулятора знімання виливків й змашувальника.

Розроблена інформаційна АСК призначена для роботи в інформаційно-порадчому режимі, при якому комплекс технічних засобів в реальному масштабі часу виробляє і видає оперативному персоналу інформацію про контрольовані параметри процесу й їх вихід за межі, що визначені технологічним режимом. Контроль технологічних параметрів (рис. 6) проводиться стандартними датчиками, сигнали яких через нормуючі перетворювачі, що розміщені у спеціальному пульті оператора (13), поступали на вхід обчислювального

пристрою (14). Температура у двох точках рухомої (4) й нерухомої (5) частин пресформи вимірювалась термометричними термометрами ТХК-529 серії Метран-200, температура металу в роздаточній печі – електричним термометром ТХА-0515 (1). Тиск в гідроциліндрі запирання (7) і пресування (10) вимірювався перетворювачем тиску ПДЛ-060 із сталою часу  $s \times 10^{-3}$ , зусилля натягнення кожної колони механізму запирання – силувимірювальним тензорезисторним датчиком ДСТБ-С-060 (2). Для контролю положення і швидкості прес-поршня в циліндрі пресування (9) використовується фотоелектричний датчик ДФ1-У4. Крім того, для реалізації контролю повного циклу роботи МЛПТ використовуються сигнали від кінцевих вимикачів (3, 6, 8, 11, 12): “Змикання прес-форми”, “Рух прес-форми вперед”, “Закінчення першої фази руху прес-поршня”, “Розкриття прес-форми” і “Плита відійшла”.

Промислові роботи в АСКТП комплексу ЛПТ виконують транспортні й технологічні операції. Транспортні операції: видалення виливка із прес-форми, перенос виливка до пристрою контролю повноти вилучення, доставка виливка на стенд контролю, укладання виливка у штамп пресу, завантаження виливка у тару або на конвеєр. Технологічні операції: очищення і змащення прес-форми з допомогою пристроїв, що установлені на руці робота, установка арматури у прес-форму, охолодження виливка в ємності з водою або під розпиленням струменем води.

В автоматичній системі передбачено використання маніпулятора з механічним захватом, що працює від програмного контролера, і виконує наступні операції: вилучення виливка; його охолодження з одночасним виміром об'єму (якщо об'єм виливка менше розрахункового, то він одразу переноситься у тару браку); зважування виливка; рентгеноскопію; обрубку ливників і облою; передача виливка на укладальник продукції.

### **ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ**

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі, що полягала в підвищенні ефективності роботи машини лиття під тиском шляхом створення системи замкненого керування, яка охоплює всі технологічні параметри на основі теоретичного обґрунтування і розробки методів отримання достовірної інформації про хід процесу і реалізації моделі в АСКТП машиною лиття під тиском.

1. За результатами досліджень розроблено критерій оптимізації комплексу ЛПТ, що поєднує в собі три фактори: продуктивність, витрати на виробництво і коефіцієнт первинного виходу виливків, а також низку обмежень з керуючими впливами. Задача оптимізації вирішена в напрямку знаходження таких значень керуючих впливів на температурні параметри процесу, дозування металу, швидкість пресування, зусилля запирання, при яких цільова функція досягає мінімальних значень. Задача оптимізації вирішена методом найшвидшого спуску.

2. Теоретичні розрахунки та експериментальні параметри температурного поля прес-форми показують, що тепловий режим об'єкта дослідження при ритмічній роботі машини ЛПТ квазісталий з періодично змінною

теплопровідністю. В процесах акумуляції – деакумуляції теплоти бере участь тільки частина товщини прес-форми – активний шар, для покращення температурного режиму прес-форми та подовження її експлуатаційного часу запропоновано пристрій регулювання температури, що відрізняється від існуючих вузьким інтервалом температур до 5 °С, а також підтриманням сталої температури форми в період технічних перерв в роботі.

3. Розроблено систему керування машиною ЛПТ, що забезпечує охоплення всіх технологічних операцій виробництва виливків, а саме підтримання необхідної температури розплаву в печі методом диференційного увімкнення індукторів, точного дозування при подачі порції металу в камеру пресування враховуючи та запобігаючи намерзанню металу на стінки каналу (зворотній зв'язок – величина прес-залишку), змикання прес-форми контролюючи натягнення на колонах, запресування та допресування, тверднення вилівка в прес-формі, вилучення вилівка, контроль якості вилівка, очистка та змащення прес-форми.

4. Створено та описано математичну модель теплової обробки шихти в ванні ІТП, що забезпечує високу точність отримання розплаву заданої температури. Модель може бути використана в інших теплових технологічних процесах, в яких шихта складається із твердої і рідкої частини. На основі моделі розроблено алгоритм керування температурою ІТП і включено в систему керування машиною ЛПТ.

5. Розроблено інформаційну систему для отримання якомога повніших даних про перебіг процесу, значення основних параметрів процесу, що вимірюються прямими та опосередкованими методами контролю із застосуванням сучасного обладнання.

6. Створено замкнуту систему керування технологічним процесом ЛПТ, яка мінімізує участь оператора в перебігу процесу, в режимі он-лайн отримує дані від інформаційної системи, опрацьовує їх, та з допомогою керуючих впливів змінює параметри, приводячи їх до оптимальних величин, тим самим підвищує кількість придатних виливків.

7. Випробування системи та її складових частин показали покращення техніко-економічних показників процесу і якості виробів. Система дозволяє здійснити регулювання з вищою точністю, що приводить до збільшення продуктивності за рахунок зниження повернення виливків на 15 %, збільшення виходу придатного на 0,5 %, що дає очікуваний економічний ефект близько 200 тис. грн/рік при потужності цеху 100 тонн кольорового литва на рік за рахунок зменшення фонду заробітної плати, енерговитрат, та раціонального використання ресурсів.

8. Розроблено систему керування допоміжними операціями комплексу ЛПТ. Оснащення системи датчиками дози металу, об'єму вилівка і масою прес-залишку дозволяє в автоматичному режимі відбракувати пошкоджені відливки, а також зупиняти цикл виготовлення відливок при неповному їх вилученні з прес-форми.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Богушевский В.С., Антоневи́ч Я.К. Автоматизация технологического процесса литья под давлением // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 4. – С. 29 – 33.

*Здобувачем проаналізовано можливості підвищення якості при виготовленні деталей методом ЛПТ шляхом розробки та впровадження АСКТП.*

2. Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. Тепловая работа пресс-формы машины литья под давлением // Металл и литье Украины. – 2012. – № 6. – С. 7 – 9.

*Здобувачем досліджені теоретичні аспекти зміни температурного поля прес-форми в процесі циклічної роботи машини ЛПТ.*

3. Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. Прогнозування температурного режиму ванни плавильної печі // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 2. – С. 108 – 113.

*Здобувачем досліджено сутність процесів, що протікають при нагріванні металу в тигельній індукційній печі та їх перебіг, створено модель прогнозування температурного режиму ванни рідкого металу.*

4. Богушевский В.С., Антоневи́ч Я.К. Регулирование скорости пресс-поршня машин литья под давлением // Металл и литье Украины. – 2013. – № 4. – С. 27 – 29.

*Здобувачем запропоновано алгоритм контролю та регулювання швидкості переміщення прес-поршня за пройденим шляхом.*

5. Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. Система керування машинами лиття під тиском // Наукові праці національного університету харчових технологій. – 2013. – № 48. – С. 10 – 16.

*Здобувачем запропоновано принципи побудови та структуру системи керування машинами лиття під тиском.*

6. Богушевский В.С., Антоневи́ч Я.К., Антоневи́ч О.О. Разработка гибкого участка литья под давлением // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2014. – № 1. – С. 10 – 18.

*Описано схему та принцип роботи гнучкої автоматичної ділянки лиття під тиском.*

7. Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К. Система управления машиной литья под давлением // Вестник ГГТУ им. Сухова, Гомель, Республика Беларусь, № 2(57) 2014. – С. 3 – 7.

*Здобувачем розроблено замкнуту систему керування машиною лиття під тиском яка включає в себе інформаційну АСК та здатна функціонувати в автоматичному режимі.*

8. Богушевський В.С., Антоневи́ч Я.К., Антоневи́ч О.О. Контроль усилия запираания пресс-формы литья под давлением // Металл и литье Украины. – 2015. – №4. – С. 26 – 29.

*Розроблено систему контролю зусилля пресування за тиском робочої рідини в циліндрі запирання, що дозволяє визначити та ідентифікувати характерні ділянки зміни тиску та аварійні ситуації.*

9. Богушевський В.С., Антоневич Я.К., Антоневич О.О. Розробка гнучкої автоматичної ділянки лиття під тиском // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2015. – № 5. – С. 64 – 72.

*На базі розроблених інформаційних АСКТП комплексу лиття під тиском спроектована автоматична система з координацією в реальному масштабі часу на гнучкій ділянці технологічного процесу ЛПТ.*

10. Пат. №85552 Україна, МПК (2013) F28C3/04/ Спосіб регулювання температури прес-форми машини лиття під тиском // Богушевський В.С., Антоневич Я.К.; заявник та патентовласник Нац. Техн. ун-т України «КПІ». – зареєстровано 25.11.2013, бюл. № 22, 2013.

*Здобувачем запропоновано засоби регулювання температури прес-форми шляхом прямого та реверсного прокачування термостатичної рідини через канали прес-форми.*

11. Антоневич Я.К. Сучасний стан та перспективи розвитку процесу лиття під тиском // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. Збірник матеріалів конференції, Київ, 2012. – с. 48 – 54.

*Здобувачем проаналізовано вітчизняні та закордонні розробки у сфері автоматизації лиття під тиском.*

12. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Пристрій регулювання температури прес-форми / Матеріали V МНТК “Нові матеріали і технології в машинобудуванні”, 28-29.05.2013, Київ. – С. 124 – 126.

*Здобувачем запропоновано схему пристрою для регулювання температури прес-форми в машині лиття під тиском.*

13. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Інформаційна АСУ машинами лиття під тиском // “Матеріали для роботи в екстремальних умовах-4”, Матеріали МНТК. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2012. – С. 206 – 210.

*Здобувачем спроектовано схему автоматичної системи керування машинами лиття під тиском.*

14. Антоневич Я.К. Принципи побудови та перспективи розвитку АСКТП машин лиття під тиском // Матеріали МНТК «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», 19-20 квітня 2012 р., НТУУ «КПІ», 2012. – С. 113 – 114.

*Здобувачем проаналізовано існуючі системи керування та запропоновано рішення для застосування алгоритмів для конкретних задач ливарного виробництва.*

15. Антоневич Я.К. Комп’ютерне керування машиною лиття під тиском // Матеріали МНТК «Інформаційні технології в освіті, науці та техніці (ІТОНТ-2012)»: Черкаси, 5-7 квітня 2012 р. – У 2 т. – ЧДТУ, 2012. – С. 56 – 57.

*Здобувачем досліджено перспективи використання ЕОМ для обробки інформації, отриманої в процесі ЛПТ.*

16. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Система керування машинами лиття під тиском // Матеріали міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2012», Київ, 26-28 вересня 2012. – К.: НУХТ, 2012. – С. 151 – 152.

*Здобувачем описано принципи роботи та схему системи керування машиною лиття під тиском.*

17. Антоневич Я.К. Управління дозуванням розплаву в процесі лиття під тиском // Матеріали ІХ міжнародної науково – практичної конференції: «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», 2013. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 31 – 35.

*Здобувачем розроблено схему контролю та регулювання величини дози металу, описано технологічну схему пристрою керування дозою розплаву в ЛПТ.*

18. Антоневич Я.К. Управление скоростью пресс-поршня в машинах литья под давлением // Материалы ІХ международной научно-практической конференции «Литье – 2013», Запоріжжя. – С. 20 – 22.

*Здобувачем запропоновано алгоритм керування швидкістю прес-поршня машин ЛПТ.*

19. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Інформаційна АСУ машинами лиття під тиском // Матеріали ІІ МНП конференції “Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика, экология”, Киев, 19 - 21.11.2012 г. – С. 35 – 36.

*Здобувачем наведено схему роботи інформаційної системи, яка виконує функції збору, первинної обробки, перетворення та передачі інформації про перебіг процесу в систему керування вищого рівня.*

20. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Пристрій регулювання температури прес-форми // Матеріали V МНТК “Нові матеріали і технології в машинобудуванні“, 28-29.05.2013, Київ. – С. 124 – 126.

*Здобувачем запропоновано алгоритм та схему пристрою, що дозволяє здійснювати регулювання температури прес-форми лиття під тиском та підтримувати температуру в період технологічних перерв.*

21. Богушевський В.С., Антоневич Я.К. Пристрій вимірювання і корекції дози металу в машині лиття під тиском // Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції "Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра", Київ, 2014. – С. 68 – 72.

*Здобувачем розроблено схему контролю величини дози металу за шляхом, що проходить прес-поршень та відповідно величиною прес-залишку.*

22. Богушевський В.С., Антоневич Я.К., Антоневич О.О. Устройство измерения и коррекции дозы в машине литья под давлением // X МНПК ЛИТЬЕ 2014, 27-29 мая, Запорожье, 2014. – С. 23 – 24.

*Здобувачем наведено принципову схему та описано алгоритм роботи пристрою для виміру та корекції дози металу в машині ЛПТ.*

23. Богушевський В.С., Антоневич Я.К., Антоневич О.О. Система керування машиною лиття під тиском // XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні

системи, методи моделювання та оптимізації», Кременчук, КрНУ, 2014. – С. 223 – 224.

*Здобувачем описано функції та механізм роботи замкненої автоматичної системи керування технологічним процесом лиття під тиском.*

24. Богушевський В.С., Антонець Я.К. Критерій оптимального управління машиною лиття під тиском // Матеріали шостої Міжнародної НТК конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» 20-21.05.2014 р. – С. 144 – 146.

*Здобувачем розроблено оптимальний критерій керування технологічним процесом ЛПТ, що поєднує в собі продуктивність, вихід придатного та затрати на виробництво.*

25. Антонець Я.К. Система автоматизації машин лиття під тиском // 5-та науково-практична конференція молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні», Київ, ФТІМС НАН України, 14 - 15 травня 2014 р. – С. 12 – 14.

*Проаналізовано існуючі системи автоматичного керування машин лиття під тиском.*

## АНОТАЦІЯ

Антонець Я.К. Удосконалення технології лиття під тиском з організацією автоматичного керування якістю виливків у замкненому режимі – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2014.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності виробництва деталей методом лиття під тиском шляхом дослідження технологічних особливостей процесу з використанням автоматичного керування в замкнутому режимі.

В дисертаційній роботі вирішені наступні задачі: досліджено існуючі математичні моделі та системи керування процесом лиття під тиском, показано їх недоліки; удосконалений критерій керування технологічним процесом лиття під тиском з мінімізацією бракованих виливків і відповідно зниження вартості самого виливка шляхом здійснення керуючих впливів на основні параметри процесу, з коректуванням величини цих впливів за кожним попереднім тактом роботи машини лиття під тиском; побудовано математичну модель замкненого циклу виготовлення виливка при литті під тиском з використанням сучасних методів математичного моделювання, що відрізняються сукупністю контурів регулювання та їх поєднання в цілісну систему; покращено регулювання основних параметрів процесу шляхом підвищення точності контролю, зменшення часу реакції, що дозволило об'єднати контури регулювання температури металу та прес-форми, швидкості пресування, зусилля запирання,



тиску пресування, навколо машинними операціями в єдину замкнуту систему на всіх стадіях технологічного циклу; створено замкнуту систему керування технологічним процесом ЛПТ, яка мінімізує участь оператора в процесі.

Розробки передані для використання на ПАТ НВП «Смілянський електромеханічний завод».

**Ключові слова:** лиття під тиском, автоматизація, критерій, математична модель, система керування, замкнене керування.

### АННОТАЦІЯ

Антоневич Я.К. Усовершенствование технологии литья под давлением с организацией автоматического управления качеством отливок в замкнутом режиме – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2014.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности производства деталей методом литья под давлением путем исследования технологических особенностей процесса с использованием автоматического управления в замкнутом режиме.

Научная новизна работы заключается в получении новых научно обоснованных результатов для решения актуальной задачи, заключающейся в разработке математической модели и средств управления технологическим процессом литья под давлением.

В диссертационной работе освещены следующие вопросы. Исследованы существующие математические модели и системы управления процессом литья под давлением, рассмотрены их достоинства и недостатки усовершенствован критерий управления технологическим процессом литья под давлением с минимизацией бракованных отливок и соответственно снижением стоимости отливки путем осуществления управляющих воздействий на основные параметры процесса, с коррекцией величины этих воздействий по предыдущим тактам работы машины литья под давлением. Построена математическая модель замкнутого цикла изготовления отливок при литье под давлением с использованием современных методов математического моделирования. Она отличается совокупностью контуров регулирования и их сочетанием в целостную систему, а именно: контуров контроля и регулирования температурой металла и пресс-формы, дозировки и корректировки величины порции металла, регулирования скорости пресс-поршня, запирающего и размыкания пресс-формы, изъятия отливки и контроля ее качества в автоматическом режиме. Нашла дальнейшее развитие модель температурного поля пресс-формы при ритмичной работе машины ЛПТ, которая учитывает, что в процессах аккумуляции – деаккумуляции теплоты участвует только часть толщины пресс-формы - активный слой. Усовершенствована математическая

модель тепловой обработки шихты в ванне ИТП путем рассмотрения вынужденных колебаний ванны под действием электрического тока с учетом динамики процесса расплавления твердой части в зависимости от насыпной плотности шихты. Улучшено регулирование основных параметров процесса путем повышения точности контроля, уменьшения времени реакции, что позволило объединить контуры регулирования температуры металла и пресс-формы, скорости прессования, усилия запирающего, давления прессования, околос машинными операциями в единую замкнутую систему на всех стадиях технологического цикла от подготовки шихтовых материалов до съема готовой отливки и контроля ее качества. Создана замкнутая система управления технологическим процессом ЛПД, получает данные от информационной системы в режиме реального времени, обрабатывает их и с помощью управляющих воздействий изменяет параметры, приводя их к оптимальным величинам, тем самым повышая количество годных отливок.

Разработки переданы для использования на ПАТ НПП «Смелянский электромеханический завод».

**Ключевые слова:** литье под давлением, автоматизация, критерий, математическая модель, система управления, замкнутое управление.

## SUMMARY

Antonevich Yaroslav K. Improving of die-casting technology with development of automatic management of castings quality in enclose mode – manuscript.

Dissertation for getting degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.16.04 - Foundry. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2014.

The dissertation is devoted to improving the efficiency of production parts by die-casting process by investigation the characteristics of the process using automatic control in closed mode.

The dissertation highlights the following issues: the existing mathematical models and process control die-casting, shown their shortcomings; improved criterion of die-casting process control minimizing defective castings and consequently reduce the cost of casting through control actions on key process parameters, adjusting the magnitude of these effects for each of the tact of the die-casting machine; A mathematical model of the closed loop manufacturing castings in injection molding using modern methods of mathematical modeling, different set of circuits of regulation and their combination into a coherent system; improved regulation of the main parameters of the process by increasing the precision control, reduction of reaction time, which made it possible to combine the contours of temperature control and metal molds, pressing speed, effort, locking, compaction pressure around of machine operations into a single closed system at all stages of the cycle; created a closed system process control, which minimizes human intervention in the process.

Developments transferred for use at JSC NPP "Smila Electromechanical Plant".

**Keywords:** die-casting, automation, criterion, mathematical model, control system, a closed control.