

# СТУДЕНТСЬКИЙ ВІСНИК DDMA

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ (ДДМА)**

**СТУДЕНТСЬКИЙ  
ВІСНИК  
ДДМА**

**ТЕМАТИЧНИЙ ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

Виходить 1 раз на рік

Засновано у грудні 2002 р.

**Краматорськ  
ДДМА  
2019**

УДК 621 + 669 + 004 + 330

**Студентський вісник ДДМА** : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – 118 с.

**ISBN 978-966-379-956-8**

У збірнику представлені статті, присвячені теоретичним і експериментальним дослідженням студентів з питань: створення і застосування прогресивних технологій; інформаційних технологій; механізації і автоматизації виробничих процесів; економічної теорії і практики; моделювання, розрахунків і проектування складних технічних систем. Збірник буде корисним для студентів та аспірантів технічних ЗВО, інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, машинобудівних та металургійних підприємств.

### *Редакційна рада*

Ковальов В. Д.	доктор технічних наук, професор, ректор ДДМА, голова ради;
Авдеєнко А. П.	кандидат хімічних наук, професор;
Алієв І. С.	доктор технічних наук, професор;
Акімова О. В.	кандидат економічних наук, доцент;
Єлецьких С. Я.	доктор економічних наук, професор;
Кассов В. Д.	доктор технічних наук, професор;
Клименко Г. П.	доктор технічних наук, професор;
Ковалевський С. В.	доктор технічних наук, професор;
Макаренко Н. О.	доктор технічних наук, професор;
Марков О. Є.	доктор технічних наук, професор;
Миرونенко Є. В.	доктор технічних наук, професор;
Тарасов О. Ф.	доктор технічних наук, професор;
Турчанін М. А.	доктор хімічних наук, професор;
Федорінов В. А.	кандидат технічних наук, професор;
Фесенко А. М.	кандидат технічних наук, доцент.

*Адреса редакції:* 84313, Донецька обл., м. Краматорськ,  
вул. Академічна, 72, каб. 1322,  
e-mail: [herald@dgma.donetsk.ua](mailto:herald@dgma.donetsk.ua), [nis@dgma.donetsk.ua](mailto:nis@dgma.donetsk.ua)

*Телефон:* (0626) 41-69-42, 41-67-88

*Факс:* (0626) 41-63-15

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради ДДМА, протокол № 11 від 27.06.2019 р.**

**ISBN 978-966-379-956-8**

© Донбаська державна машинобудівна академія, 2019

© Donbass State Engineering Academy, 2019

# РОЗДІЛ 1

# МАШИНОБУДУВАННЯ



---

УДК 621.9

Берус С. М. (ТМ-17-1м)

## ЗНЯТТЯ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ РОЛИКУ РОЛЬГАНГУ

*Для зменшення втрат на тертя і підвищення зносостійкості, розширення діапазону експлуатаційних режимів роботи ролика рольганга і збільшення його довговічності застосовується технологія нанесення композиційного покриття на поверхні сполучення «шийка ролика - вкладки підшипника». Виникнення внутрішньої напруги в ході формування композиційного покриття може призводити до мимовільного відшаровування композиту в процесі експлуатації. Для зняття внутрішніх напружень ролик в зборі піддається віброобробці на резонансній частоті.*

*To reduce frictional losses and increase wear resistance, extend the range of operating modes of roller roller work and increase its durability, the technology of applying a composite coating on the surface of the coupling "cervical roller - bearing insert" is used. The emergence of internal stress during the formation of composite coating can lead to involuntary layering of the composite during the operation. For removal of internal stresses, the roller in the collection is subjected to vibration processing at the resonant frequency.*

В сучасних ринкових умовах основною метою для виробництва роликів рольгангу на підприємствах машинобудівної галузі є:

- забезпечити конкурентоспроможність виробу;
- скоротити термін і вартість виготовлення;
- підвищити якість;
- зменшити виробничі витрати.

Параметри якості, як правило, визначаються виходячи з інтересів виробника, а параметри конкурентоспроможності - з інтересів споживача. Забезпечити необхідні параметри конкурентоспроможності продукції можна за умови забезпечення виробником необхідних експлуатаційних якостей виробу і показників надійності (безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність). Тобто, виробнику необхідно виявити найбільш вразливі і слабкі елементи конструкції виробу та впровадити у виробництво методи, які забезпечать високі експлуатаційні показники та показники надійності зазначених елементів.

Найбільше навантаження під час роботи ролика рольганга лягає на підшипниковий вузол, тому однією з основних задач, які необхідно вирішити, – забезпечити оптимальні умови для роботи цього вузла. Для визначення заходів, які забезпечать оптимальні умови роботи підшипникового вузла, застосовуються теорії і методи удосконалення виробництва на основі аналізу технології виготовлення деталей ролику рольгангу, складання виробу і вивчення його умов експлуатації тощо (рис. 1).

На основі комплексного аналізу вищенаведених умов визначаються зони найбільш ймовірного зносу деталей ролику рольгангу та приймається рішення щодо вдосконалення конструкції ролику рольганга (рис. 2).

Використання композиційних матеріалів дозволяє спростити та покращити конструкцію, заощадити дорогі кольорові метали та мастила, зменшити трудомісткість технічного обслуговування та ремонту, зменшити втрати на тертя та підвищити зносостійкість, розширити діапазон експлуатаційних режимів роботи обладнання, збільшити довговічність та інші показники [1].

Однак, виникнення внутрішньої напруги в ході формування адгезійного контакту під час нанесення композиту внаслідок процесів хімічного або фізичного структурування компонента, а також через термічні напруження, може призвести до мимовільного відшарування композиту в процесі експлуатації. Це обумовлено тим, що внутрішня напруга спрямована проти сил адгезійного зчеплення і залежність адгезійної міцності системи від внутрішніх напружень має складний характер [3].

Мета роботи – для забезпечення достатньої адгезійної міцності і довговічності роботи ролика рольганга шляхом впливу на поверхні тертя-ковзання сполучених деталей ролика вібрацій резонансної частоти домогтися зниження внутрішніх напружень в шарі композиту.

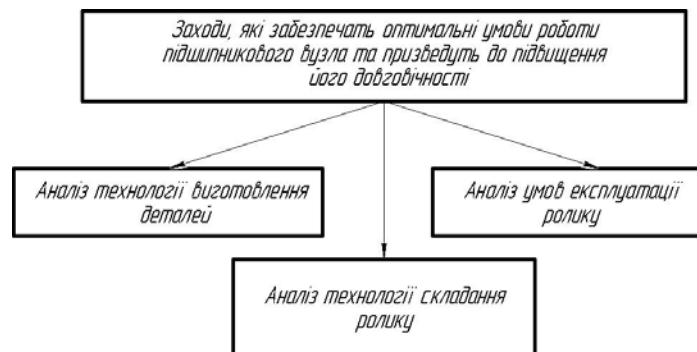


Рис. 1. Визначення заходів, які забезпечать оптимальні умови роботи підшипникового вузла ролику рольганга

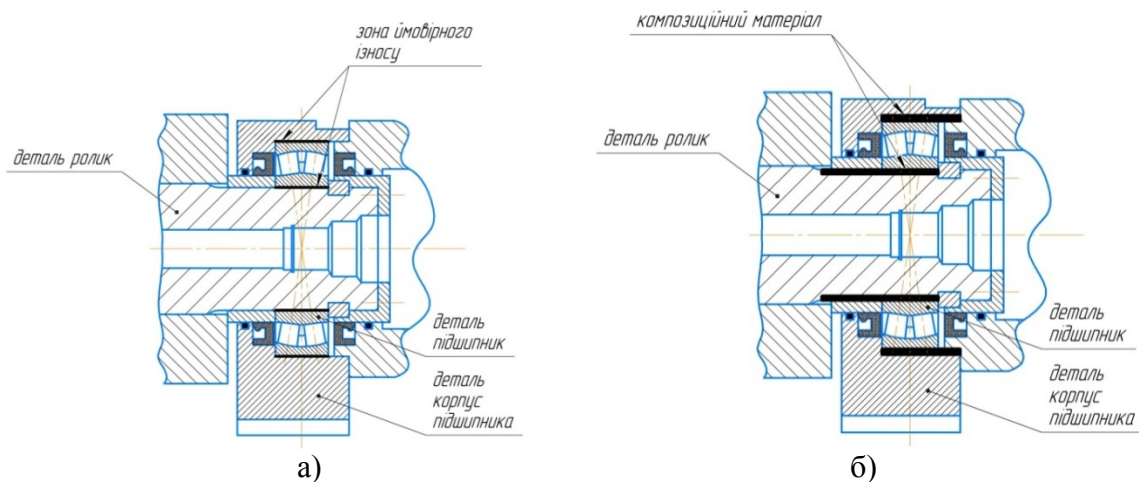


Рис. 2. Підшипниковий вузол ролику рольганга:

а – визначення зони найбільш ймовірного зносу; б – схема вдосконаленої конструкції

Для зняття внутрішньої напруги у ряді випадків використовується віброобробка, яка економічніше термічної обробки приблизно в 10 разів, так як вона має такі переваги [2]:

1. Необхідне для віброобробки обладнання є універсальним для різних конструкцій, компактним і мобільним;
2. Вартість устаткування, а також витрати на його обслуговування і догляд за ним відносно невеликі;
3. Процеси зняття напружень протікають швидко;
4. Метал і поверхня деталей після обробки не зазнає помітних фізико-механічних ушкоджень (немає окалини, шлаку, кольорів мінливості і т. п.).

На теперішній час для зняття залишкових напруг в металі можна застосовувати технологію низькочастотної віброобробки на резонансних частотах (НВО). Технологія застосовується на підприємствах машинобудування, судноремонту та ін. Перевагою НВО є зниження напруження у всій конструкції цілком, що дозволяє повністю або частково відмовитися термічної обробки [3].

На відміну від дорогої термічної обробки, яку можна застосувати не в будь-якій ситуації, НВО, не змінюючи структури металу при малих енерговитратах, здатна з високим ступенем ефективності знизити залишкові напруги у виробках.

Для проведення експерименту використовувалася збірна конструкція, що імітує штучне створення внутрішніх напружень при нанесенні на деталь композиційного матеріалу. Схема конструкції представлена на рис. 3.

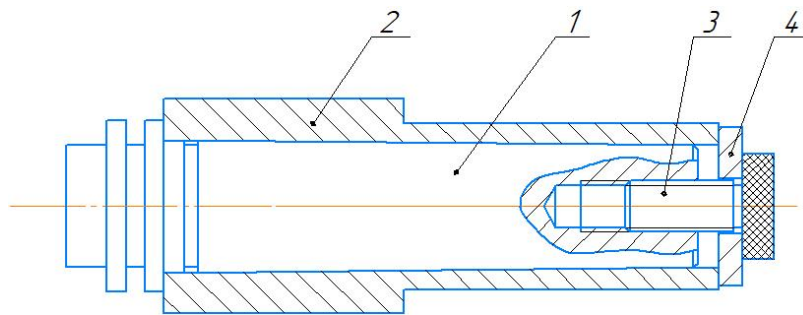


Рис. 3. Схема експериментальної збірної конструкції:  
1 – оправка конусна; 2 – втулка конусна; 3 – гвинт; 4 – шайба

Відповідно до схеми, штучне створення внутрішніх напружень реалізується завдяки створенню натягу у з'єднанні деталей 1 та 2 під час їх затяжки гвинтом 3.

Установка для проведення обробки з застосуванням методу НВО складається з випромінювача та приймача, що встановлюються на експериментальних деталях, та які підключені до звукової карти персонального комп'ютеру. Управління завданням коливань на випромінювачі здійснюється за допомогою генератора сигналу. Аналіз результатів вимірювань частот коливань, які знімаються з приймача, фіксуються за допомогою програмного аналізатору спектру.

На рис. 4 зображений етап вимірювання власних коливань деталі 1, на рис. 5 – схеми встановлення випромінювача та приймача для вимірювання власних коливань деталей 1 і 2 та деталі 1 і 2 разом у зборі.

Під час проведення експерименту із результатів вимірювання виключаються спектр власних коливань звукової карти.

Перший етап проведення експерименту – фіксація спектру власних коливань (з нульовим зусиллям зажиму та без обробки):

1. деталі 1 – FS1\_0;
2. деталі 2 – FS2\_0;
3. деталі 1\_2 (у зборі) – FS12\_0.



Рис. 4. Схема установки

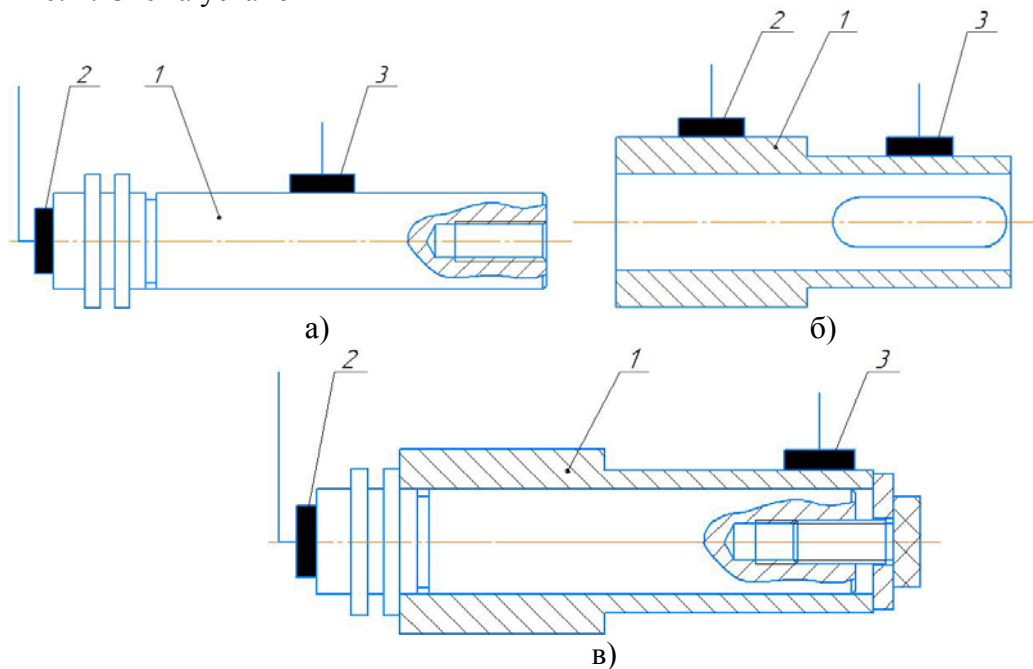


Рис. 5. Схема встановлення випромінювача (поз. 2) та приймача (поз. 3) для вимірювання власних коливань деталей:

а – деталі 1; б – деталі 2; в – деталей 1 та 2 у зборі

Другий етап проведення експерименту – фіксація спектру власних коливань деталі 1\_2 під навантаженням (під навантаженням та без обробки):

1. з зусиллям 1 – FS12\_1;
2. з зусиллям 2 – FS12\_2.

На кожному етапі було отримано спектр амплітудно-частотних характеристик, аналіз яких показав, що амплітудно-частотні характеристики мають ряд проміжних резонансних частот («кишень»).

Третій етап проведення експерименту – фіксація спектру коливань деталі 1\_2 після обробки:

1. вібраціями широкополосного спектру («білий шум») – FS12\_обр;
2. вібраціями з частотою 7062 Гц– FS12\_обр1;
3. вібраціями з частотою 18777 Гц– FS12\_обр2;
4. вібраціями з частотою 9474 Гц– FS12\_обр3;
5. вібраціями з частотою 8613 Гц– FS12\_обр4;
6. вібраціями з частотою 9302 Гц– FS12\_обр5.

Результати фіксації амплітудно-частотних характеристик експериментальної моделі приведені на рис. 6.



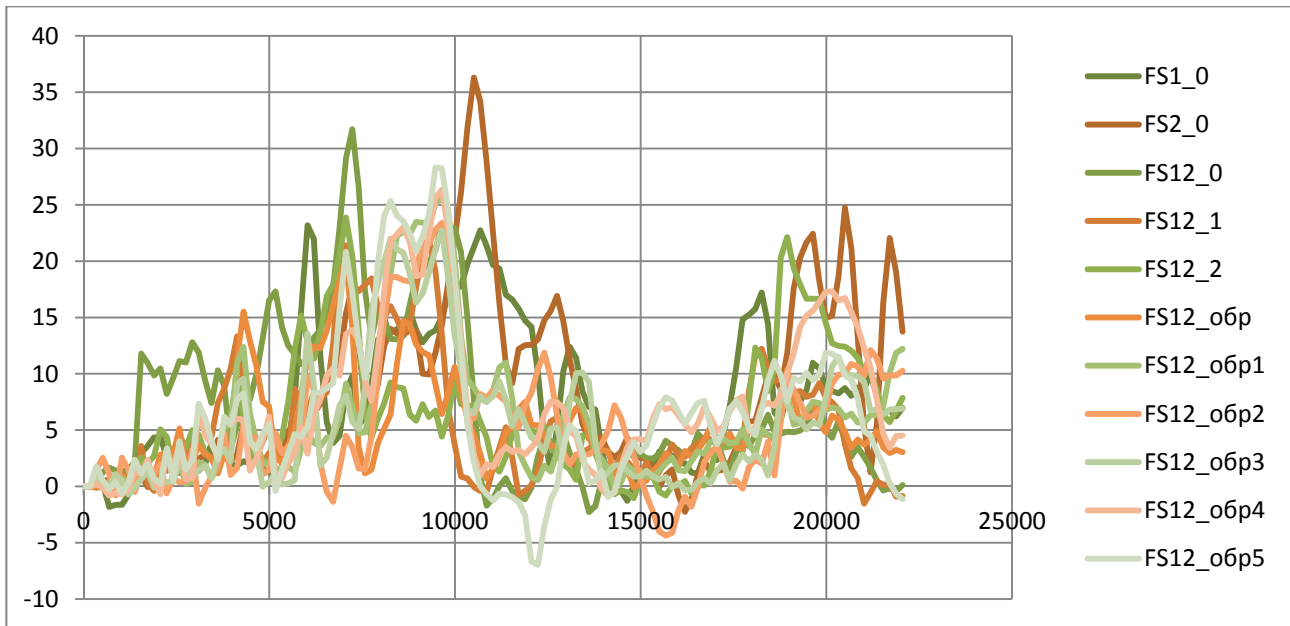


Рис. 6. Результати проведення експерименту з обробки деталей методом НВО

Після обробки деталі 1\_2 вібраціями широкополосного спектру («білим шумом») амплітуда коливань зменшилася, розмір внутрішніх залишкових напружень деталі 2 знизився на 15 %.

Обробка деталі 1\_2 на інших резонансних частотах відповідно до отриманих результатів підтвердила теоретичні припущення щодо зменшення розміру внутрішніх залишкових напружень деталі 2 після обробки деталі 1\_2 методом НВО.

### ВИСНОВКИ

Після обробки деталі 1\_2 методом НВО амплітуда верхніх частот коливання зменшується, нижніх частот зростає. У деталі 2 відбувається перерозподіл внутрішніх напружень з більших значень до менших, що свідчить про зменшення напруженого стану композиційного покриття ролику рольганга. За результатами проведення експерименту рекомендується проводити обробку ролику рольгангу за принципом широкополосного спектру коливань протягом 60–90 хвилин.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тулинов А. Б. Новые композиционные материалы в ремонтном производстве / А. Б. Тулинов, А. Б. Гончаров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2003. – № 11. – С. 46–49.
2. Артур Дж. Мак-Ивли. Анализ аварийных разрушений. – Москва: Техносфера, 2010. 416 с.
3. Бафаев Д. Х. Эффективность применения композиционного материала в подшипниках опор валков / Д. Х. Бафаев, Ш. Х. Бехбудов // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – № 4. – С. 31-36. – URL: <https://moluch.ru/th/8/archive/68/2560/> (дата звернення: 17.09.2018).

Стаття надійшла до редакції 12.12.2018 р.



УДК 621.9

Камишна А. В. (ТМ-17-1зм)

## МЕТОД ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ШЛЯХОМ ОБРОБКИ ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ІМПУЛЬСНИМИ РОЗРЯДАМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

*У статті запропоновано метод зміцнення робочих поверхонь деталей машин за допомогою наведення високовольтних розрядів електричного струму, що виникає між електродом та виробом при досягненні пробійної відстані. Результатом є підтвердження впливу високорозрядної обробки на робочу поверхню.*

*The article proposes a method of strengthening the working surfaces of machine parts by pointing high-voltage discharges of electric current between the electrode and the product when the breakdown distance is reached. The result is a confirmation of the effect of high-discharge machining on the work surface.*

Актуальною задачею вирішення проблеми підвищення міцності робочих поверхонь виробів, є процес зміцнення на основі впливу на робочі поверхні деталей машин високовольтних розрядів електричного струму.

Аналіз методів забезпечення заданих властивостей поверхонь виробів дозволяє виявити деякі особливості тенденцій цієї галузі: для забезпечення певних вимог роботи інструменту і деталей (довговічність, зносостійкість та ін.) пред'являються досить жорсткі вимоги до якості і фізико-механічних властивостей виробів [1].

В основі підвищення зносостійкості і втомної міцності деталей лежить вплив на робочу поверхню деталей і елементи кристалічної решітки металу шляхом застосування різних видів обробок.

У багатьох випадках стає нераціональним використання дорогих матеріалів. Зміцнення шляхом цементації, азотування, термічної обробки, застосування електромеханічної, іоноплазмової обробки, є ефективними, але досить енергоємними та металоємними процесами [2, 3].

В основу методу, що розглядається, поставлено задачу вдосконалення відомих способів для зменшення енергетичних витрат, металоємності обладнання, та підвищення продуктивності його реалізації.

Мета: запропонувати метод зміцнення робочих поверхонь деталей машин за допомогою наведення високовольтних розрядів електричного струму, що виникає між електродом та виробом при досягненні пробійної відстані та експериментально дослідити його.

Одним з варіантів вдосконалення існуючих способів [4], запропонований нижче, є застосування високовольтних розрядів електричного струму, які виникають на відстані пробійної здатності між електродом та поверхневим шаром деталі.

Пропонований варіант обробки поверхневого шару деталі є мало витратним, а саме пристрій створення високовольтного розряду та методика виконання зміцнення конкретних робочих поверхонь [5].

Поставлена задача вирішується за рахунок впливу на робочі поверхні високовольтного розряду струму в діапазоні 15...25 кВ., коли між електродом і виробом, при досягненні пробійної відстані, збуджується електричний розряд, в результаті якого відбувається розігрів і зміна властивостей поверхні зміцнюваного інструменту [6].

Приклад здійснення методу: за допомогою пристосування, яке складається із блоку живлення та високовольтного перетворювача «Розряд 1», на електрод подається розряд струму напругою у діапазоні 15...25 кВ, спрямований на відстані 3, 5, 7 мм безпосередньо на робочу поверхню деталі впродовж 2...6 хвилин.

Дані проведення експериментальної обробки наведені в табл.1. Для проведення експерименту по зміцненню було обрано налаштування частоти обертання зразка в шпинделі токарного верстата та відстань від електрода до поверхні деталі.

Вихідні дані та результати проведення експерименту

Но- мер	Частота обертання шп, хв	Відстань, мм	Час обробки 2 хв		Час обробки 4 хв		Час обробки 6 хв	
			Ra, мкм	НВ, МПа	Ra, мкм	НВ, МПа	Ra, мкм	НВ, МПа
2	12,5	3	5,9	201,9	4,2	225,8	4,2	239,4
4	20	3	6	233,8	3,2	229,2	5,1	231,5
5	16	3	5	230,3	3,6	228,1	4,3	237,2
1	12,5	5	6,5	225,8	4,7	231,5	3,8	232,6
6	20	5	5,5	239,4	3,3	237,2	3	233,8
9	16	5	4,7	222,4	5	222,4	4	242,9
3	16	7	5,3	245,1	3,3	225,8	5,4	233,8
7	20	7	5,3	216,7	5	229,2	3,1	239,4
8	12,5	7	4	226,9	3	233,8	3,4	233,8

За отриманими результатами, було побудовано графіки. На рис. 1 та рис. 2, представлені графіки, які дають можливість побачити, при якому відношенні частоти обертання зразка та відстані при часі 2 хв. та 6 хв. між електродом та зразком відбувається підвищення твердості поверхні.

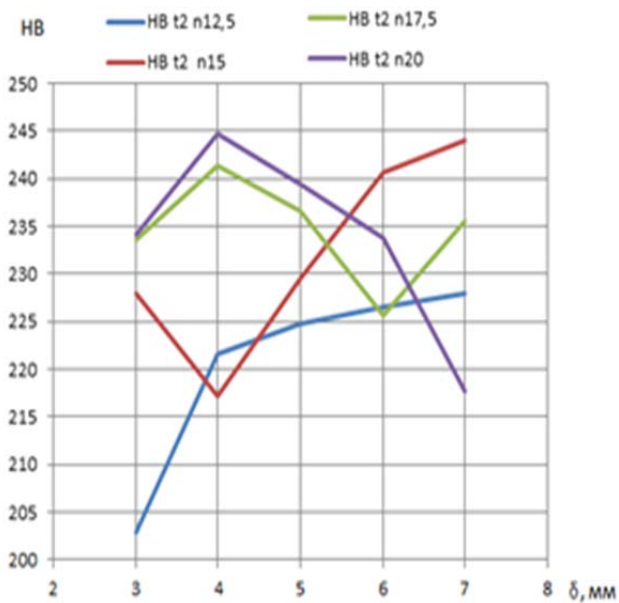


Рис. 1. Значення твердості поверхонь зразка після обробки 2 хв.

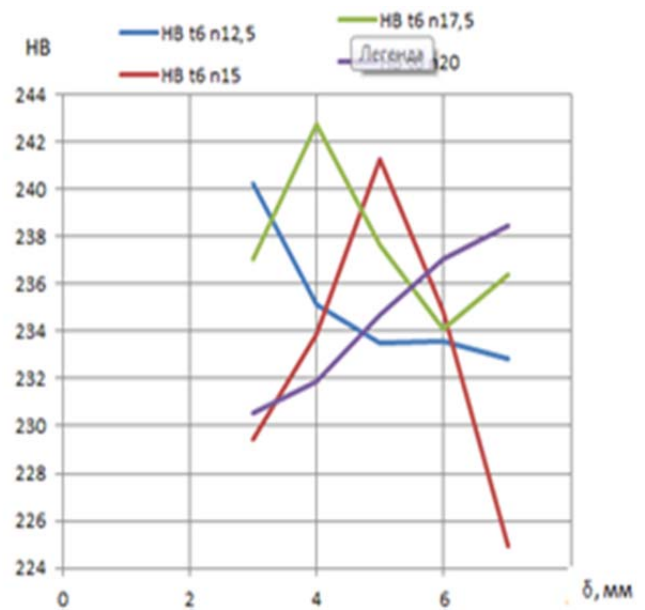


Рис. 2. Значення твердості поверхонь зразка після обробки 6 хв.

На рис. 3 та рис. 4, представлені графіки, які дають можливість побачити при якому відношенні частоти обертання зразка та відстані при часі 2 хв. та 6 хв. між електродом та зразком відбувається необхідна зміна зносостійкість робочих поверхонь, а саме зменшення шорсткості.

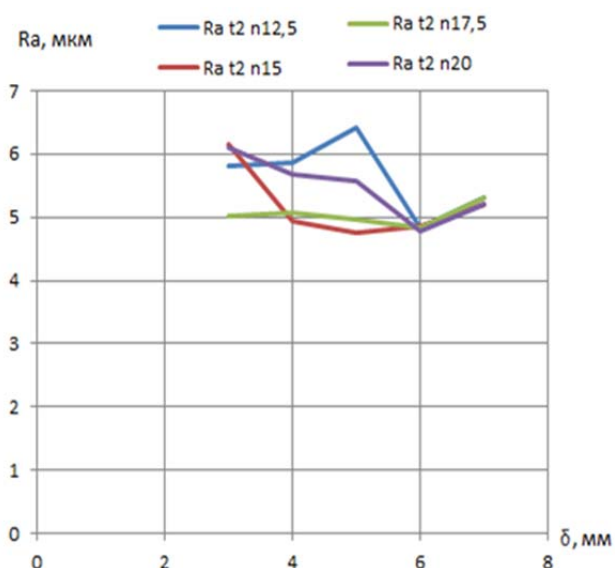


Рис. 3. Значення шорсткості поверхонь зразка після обробки 2 хв.

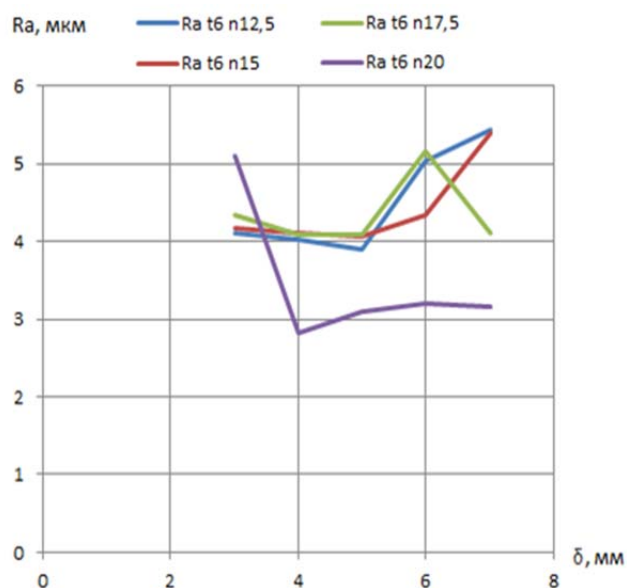


Рис. 4. Значення шорсткості поверхонь зразка після обробки 6 хв.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, при вдалому узгодженні параметрів, спостерігаємо максимальний ефект. Технічним результатом є підтвердження впливу на робочі поверхні деталей за короткий проміжок часу, використовуючи нескладне обладнання, підвищуючи продуктивність та знижуючи енергетичні витрати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалевський С. В. Исследование механизмов формирования упорядоченности рабочих поверхностей деталей машин / С. В. Ковалевский, И. Н. Стародубцев // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 2 (27). – С. 43–47.
2. Михайлюк А. И. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении / А. И. Михайлюк, Р. П. Житару // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 5. – С. 49–56.
3. Лазаренко Б. Р. Прохождение электрического тока через электролиты / Б.Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1978. – № 1.
4. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова ; Иван. гос. хим.-техн. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.
5. Орешко А. Г. О структуре короны, токопрохождении и пробое в высоковольтном разряде // Вопросы атомной науки и техники. – 2003. – № 4. – С. 265–269.
6. Пат. С21D 1/00, С21D 7/13 Україна. Спосіб зміцнення кінцевого інструмента малого діаметра розрядами електричного струму високої напруги / С. В. Ковалевський, Є. Ю. Євсюков. Заявл. 10.01.2017 ; опубл. 10.07.2017.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2018 р.

УДК 621.982:669.295

Кравцов И. Д. (ТМ-17зм)

## ДИАГНОСТИКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

*В статье представлен обзор проблем и методы их решения применительно к центробежным насосным агрегатам (ЦНА). Предложен вибрационно-акустический метод диагностики ЦНА. Показаны его достоинства для неразрушающего контроля ЦНА в эксплуатации. Представлены результаты анализа узла ротора насоса с учетом диагностических признаков. Предложены мероприятия конструкторского и технологического характера, в частности, даны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности рабочего колеса ЦНА.*

*The article presents an overview of the problems and methods of their solution in relation to the centrifugal pumping unit of the CPA. A vibration-acoustic method for the diagnosis of CPA is proposed. Showing its advantages for non-destructive testing of the CPA in operation. The results of the analysis of the pump rotor assembly are presented, taking into account diagnostic features. Design and technological measures have been proposed, in particular, recommendations have been made for improving the operational reliability of the CPA impeller.*

Горнодобывающие производства во многом определяется системой эксплуатации и ремонта насосно-компрессорного оборудования. В настоящее время большинство предприятий применяют затратную систему планово-предупредительных ремонтов. При использовании этой системы предприятие несет прямые потери, связанные с проведением ремонтов, в которых нет необходимости, с частым ухудшением качества работы агрегата после ремонта, внезапными отказами оборудования в межремонтный период, приводящими к тяжелым материальным и экологическим последствиям.

Основными причинами аварий на предприятиях угольных шахт являются: неудовлетворительное состояние: оборудования; технологической дисциплины; организации и проведения ремонтных, газоопасных, огневых работ.

Около 80 % механического оборудования водоотлива горно-добычных шахт составляют центробежные насосные агрегаты (ЦНА). В связи с этим техническое состояние водоотливной установки во многом определяется техническим состоянием ее насосного агрегата [1].

Для внедрения прогрессивной системы обслуживания оборудования по его техническому состоянию, защиты от аварий необходимо использовать объективные средства контроля и диагностики. В современных технических средствах диагностики используются различные методы: анализ временной реализации, трендов параметров, анализ спектра, функций распределения и др. [2]. Существует большой потенциал в совершенствовании вибрационной диагностики для повышения точности диагностики агрегатов в условиях априорной неопределенности режимов их работы и применения различных алгоритмов их применения [2]. Важным аспектом является обеспечение максимального быстродействия систем, которое определяется длиной выборки вибрационно-акустического сигнала [2].

Поэтому исследование, разработка и внедрение систем диагностики и мониторинга технического состояния машинного оборудования потенциально опасных производств, прежде всего на горно-добычных шахтах Украины, являются актуальными.

Анализ надежности оборудования водоотливной установки показал, что доля отказов технологических установок из-за ЦНА составляет более 60 %. [1].

Таким образом, при использовании вибрационной диагностики при эксплуатации можно предотвратить отказ оборудования выявив проблему по параметрам амплитудно-частотной характеристики спектра вынужденных колебаний агрегата и, как следствие, предотвратить аварию на шахте.

Как известно, динамические силы, приводящие к возникновению и распространению вибрационно-акустических процессов, возникают из-за взаимодействия деталей и узлов механизма в процессе вращения ротора ЦНА [2].

Как правило, это контактные взаимодействия поверхностей деталей машины, повторяющиеся с частотой кратной частоте вращения ротора. Кроме того, некоторые дефекты, подшипников качения или фундамента и опор агрегата, приводят к возникновению гармонических составляющих спектра вибросигнала некратных частоте вращения ротора машины. Однако, частота гармоник спектра вибросигнала, появление которых вызвано различными дефектом агрегата, как правило, зависит от частоты вращения ротора машины, определяющей динамику вибрационно-акустических процессов.

Одним из распространенных дефектов центробежного насосного агрегата, приводящим к повышенной вибрации корпуса машины на частоте вращения ее ротора, является дисбаланс ротора. Дисбаланс ротора машины может быть вызван различными причинами. Одна из причин является прогиб ротора. В секционных насосах ротор состоит из: вала и набором рабочих колес с направляющими аппаратами. Вал из-за его длины и большого количества деталей получает большую нагрузку, впоследствии которой он может прогнуться, появится дисбаланс ротора. Таким образом, В данной статье рассмотрен узел ротора насоса, а именно рабочие колеса.

Опыт эксплуатации шахтных насосов показывает, что наиболее интенсивному износу подвержены рабочие колеса, в связи с этим правильный выбор материалов и конструкции детали дает возможность увеличить срок службы и надежность всего агрегата. Поэтому в целях увеличения наработки на отказ рабочих колес обязательно учитывать особенности эксплуатации в шахтных условиях. Коррозия металлов в шахтных водах – результат электрохимических реакций, особенно при наличии гальванической пары. Многочисленные причины коррозии в шахтных насосах затрудняют анализ процесса износа рабочих колес в сложных условиях рудничного водоотлива. Влиянию электрохимической коррозии на рабочие колеса насосов мало уделено внимания в горной литературе, нет каких-либо рекомендаций. Однако из опыта эксплуатации известно, что присутствие в шахтной воде растворов серной и соляной кислот, а также ионов хлора, и особенно сульфатов тяжелых металлов, оказывает разрушающее действие на металл рабочих колес насоса.

Наряду с коррозией причиной быстрого износа рабочих колес являются высокие скорости движения жидкости в самом колесе и в зазорах уплотнений. При конструировании рабочего колеса насоса выбирают наиболее эффективную форму, профиль и количество лопаток, исходя из задачи, иметь минимальные гидравлические потери и максимальный КПД. Особое значение имеет правильный выбор материала для изготовления рабочих колес. При этом учитывают физико-химический состав шахтных вод, литейные свойства материала, условия его механической обработки, запас прочности, и то, что основные напряжения в рабочем колесе создаются центробежными силами [3].

Целью работы является повышение надежности эксплуатации насосного агрегата ЦНА, увеличение ресурса работы и ремонтной технологичности центробежных насосных агрегатов путем оценки и прогнозирования технического состояния по трендам параметров вибрации корпуса, и технологическому рассмотрению отдельных узлов – рабочего колеса и крышки всасывания насоса.

Задачи исследования:

- 1 Анализировать вибрационную диагностику как метод контроля оборудования ЦНА
2. Исследовать закономерности изменения трендов вибрационных параметров в процессе эксплуатации технического состояния ЦНА.
3. По результатам исследований разработать способы и алгоритмы для оценки и прогнозирования технического состояния ЦНА по трендам вибрационных параметров.
4. По эксплуатационным показателям проанализировать и выбрать прогрессивный материал изготовления рабочего колеса
5. Выбрать оптимальный способ изготовления рабочего колеса ЦНА

Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по трендам вибрационных параметров.

Вибрационная диагностика – эффективный метод неразрушающего контроля, который основан на анализе целого комплекса параметров вибрации с целью определения состояния оборудования.

Основные преимущества метода контроля на основе вибрационной диагностики:

- колебательные силы возникают в месте появления дефекта
- вибрация в силу своей природы содержит очень большой объем диагностической информации;
- проводить диагностику можно прямо на месте, причем без разборки и остановки оборудования.

Анализ возможных методов неразрушающего контроля в рабочих условиях на первое место ставит вибрационный контроль, т.е. измерение частотных спектров вибрации и их сравнение с "эталонными" величинами, которые устанавливают текущее техническое состояние и позволяют оценить динамику контроля, а также прогнозировать остаточный ресурс центробежных насосов. [1]

В настоящее время в практике вибрационной диагностики наибольшее распространение имеют способы диагностики по параметрам вибрационной скорости и вибрационного перемещения, которые обеспечивают более надежный контроль и диагностику состояния оборудования.

Традиционно устройства интегрирования сигналов выполнялись в виде электронных схем, но в связи с развитием микропроцессорной техники, уменьшением ее стоимости, габаритов, энергетических показателей и увеличением ее производительности возникает необходимость использования численных методов интегрирования сигнала для получения оценок вибрационных параметров из оцифрованного сигнала вибрационного ускорения.

Для применения алгоритмов интегрирования в системах контроля и мониторинга необходимо обеспечить их работу в условиях ограниченной длительности сигнала. Это связано с использованием последовательно-параллельной архитектуры систем, имеющей значительно меньшие затраты при реализации многоканальных систем по сравнению с параллельной. Период мониторинга в таких системах прямо пропорционален длительности измеренного сигнала и числу измерительных каналов, измеряемых последовательно. Для минимизации периода мониторинга при неизменном числе каналов необходимо минимизировать длительность измеряемого сигнала.

Основными требованиями, которые предъявляются к датчику, являются следующие: - высокая информативность; - простота установки и снятия; - повторяемость результатов диагностики при перестановках датчика.

Высокая информативность предполагает, что способ и место установки датчика на насосе обеспечивает как широкий частотный диапазон вибрационно-акустического сигнала, так и чувствительность к изменению его технического состояния. Для обеспечения последнего требования место установки датчика должно выбираться как можно ближе к диагностируемому узлам и находиться в зоне действия максимальных суммарных сил.[2]

Рассмотрим схему на рис. 1 установки датчиков диагностики.

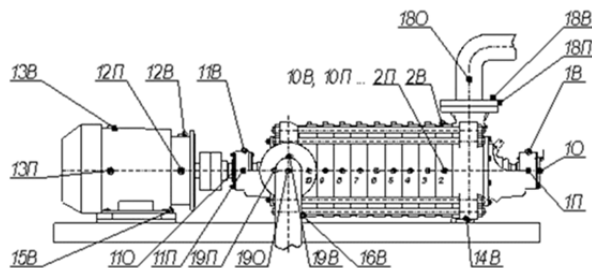


Рис. 1. Точки установки пьеза-акселерометров, где:

- П – направление установки пьеза-акселерометра для замера поперечных колебаний;
- В – направление установки пьеза-акселерометра, для замера вертикальных колебаний;
- О – направление установки пьеза-акселерометра для замера осевых колебаний

Вибрационный мониторинг собственно центробежного корпусно-секционного насоса осуществляется в точках 1В...11О, 14В, 16В, 18П, 19П. В первую очередь проверяется состояние подшипников по уровню ударных импульсов генерируемых ими, измерение которого обеспечивается применением специального датчика на его резонансной частоте. Спектральный анализ вибрации позволяет отслеживать кинематические несовершенства насосного агрегата, в оперативном порядке определять и устранять их.

Использование оборудования для измерения вибрации в планово-предупредительном техническом обслуживании и ремонте предполагает изучение динамики процесса вибрации отдельных частей оборудования. Вид на рис. 2 может быть использован для записи данных вибрации на период регламентного осмотра. Скачкообразное изменение являются признаком ближайшего отказа оборудования. Также есть возможность обнаружить увеличение вибрации и принять все меры по их устранению прежде, чем они достигнут опасного уровня.

Схема вибрационной диагностической установки приведена на рис. 3.

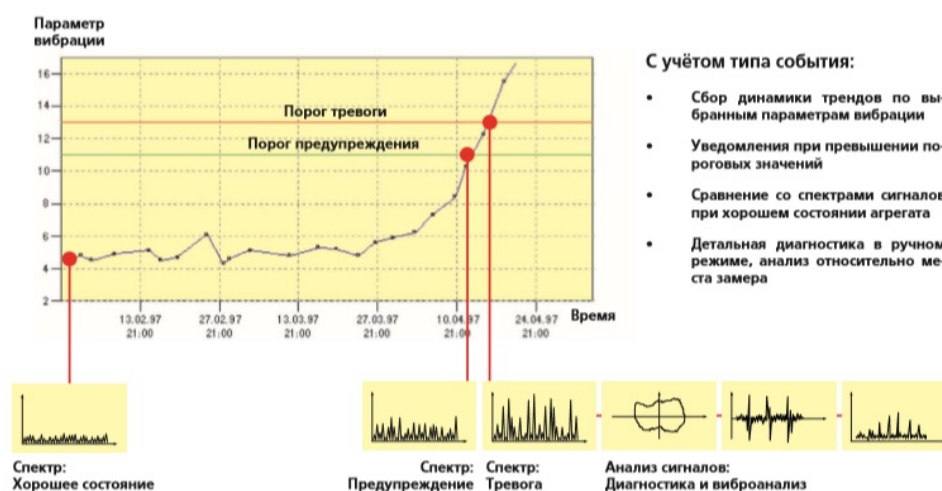


Рис. 2. Определение трендов состояния насосного агрегата

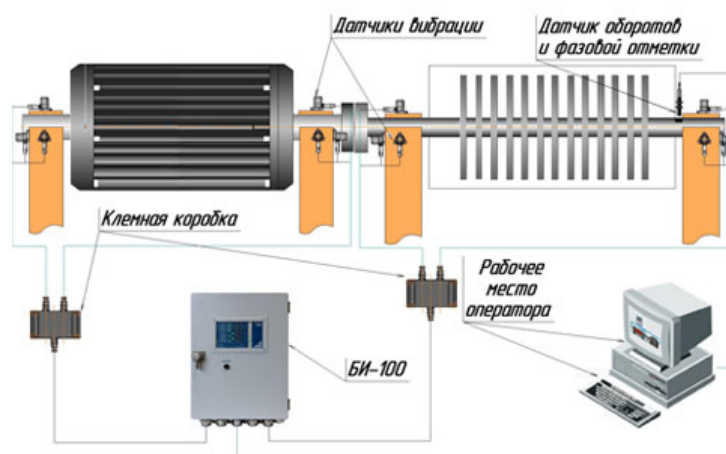


Рис. 3. Схема вибрационной диагностической установки

Таким образом, вибрационная диагностика оборудования позволяет производству своевременно обнаруживать проблемы связанные непосредственно с агрегатом и предотвращать отказ и дальнейшие аварии на производстве.

Анализ рабочего колеса ЦНА (рис. 4).

Рабочее колесо является важнейшим узлом в конструкции центробежного насоса. Основное его назначение заключается в передаче энергии от вращающего вала к жидкости. Иначе говоря, рабочее колесо является генератором центробежной силы, с помощью которой и создается давление,двигающее поток жидкости. Как правило, рабочее колесо состоит



из следующих основных элементов: передний или ведущий диск; задний или ведомый диск; крыльчатка, состоящая из лопастей, которые находятся между дисками, лопасти крыльчатки насоса, имеют изогнутость в сторону, которая противоположна направлению движения рабочего колеса. Цельнометаллическая конструкция детали в отличие от сварной обеспечивает равномерный износ поверхности и не имеет нагруженных зон.



Рис. 4. Рабочее колесо ЦНА(с левой стороны – металл, с правой – полимер)

Основным фактором, определяющим ресурс работы рабочего колеса в условиях эксплуатации, является сопротивление коррозии, гидроабразивному износу и явлению кавитации [3].

Изначально основным материалом изготовления рабочих колес для центробежного насосного агрегата использовался серый чугун. Для сравнительной оценки износостойкости материала рабочего колеса проанализировав литературу [4], в основе которой были исследованы и испытаны многие полимерные материалы химической промышленности: СЧ-20-40, СТ, нержавеющая сталь, алюминий, полиэтилен низкого давления чистый (ПЭНДч) и наполненный сажей (ПЭНДн), полипропилен (ППЛ), чистый поликарбонат (ПКБч), пентапласт (ПТП), полиформальдегид (ПФА), фенолит (РСТ), стеклонаполненный капрон (КС-30/9). Отличительной особенностью исследования являлось определение эффективности действия коррозионных повреждений на относительную износостойкость металлов и полимеров. Величина износа определялась путем взвешивания образцов до и после испытания на аналитических весах по известному удельному весу и площади пятна эрозии.

Результаты сравнительных испытаний в виде относительной износостойкости  $i_m$  различных материалов по отношению к износостойкости  $i_{сч}$  серого чугуна, обычно применяемого для изготовления рабочих колес шахтных насосов, выраженные в логарифмической координате, приведены на рис. 5.

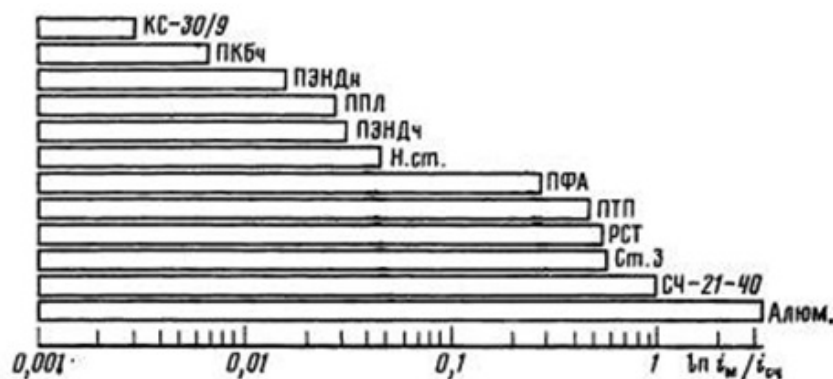


Рис. 5. Гистограмма сравнительной стойкости материалов при испытании свободным абразивом

Из гистограммы следует, что наибольшим сопротивлением гидроабразивному износу отличается стеклонаполненный капрон КС-30/9, чистый поликарбонат, полиэтилен низкого давления, полипропилен. Износостойкость этих материалов выше относительной износостойкости не только черных металлов – стального литья, чугуна, но и нержавеющей стали [4].

Приведенные выше результаты исследования износостойкости и технологичности изготовления показали преимущества полимерных материалов перед традиционно применяемыми стальным и чугунным литьем. Однако одним из условий успешной замены стали и чугуна полимерными материалами является достаточный запас прочности колеса.

Таким образом, удельная энергия деформации удовлетворительно коррелирует с износостойкостью испытанных материалов, как при кавитационном, так и при абразивном воздействии, что позволило рекомендовать полимерные материалы в качестве критерия для выбора материала деталей шахтных насосов.

Замена стальных или чугунных колес более легкими пластмассовыми позволяет уменьшить площадь сечения и, следовательно, облегчить несущий вал ротора, что является одним из путей повышения производительности насоса и снижения материалоемкости в целом.

Преимущества использования полимерных рабочих колес:

- высокая коррозионная стойкость и чистота полимерных проточных каналов, низкая адгезия и немагнитные свойства материала, а также отсутствие возможности образования гальванических пар обеспечивают снижение скорости отложения солей не менее чем в 3 раза по сравнению с металлическими рабочими органами, а также уменьшают вероятность засорения неабразивными механическими примесями.

- высокая точность изготовления и малый вес полимерных рабочих колес (в 4–5 раз меньше металлических), обеспечивают высокую сбалансированность вращения вала во всем диапазоне регулируемых частот двигателя, что позволяет уменьшить износ радиальных пар трения.

- малый вес ротора, в 2,5 раза меньше, чем у ЦНС с металлическими рабочими колесами, обеспечивает уменьшение пусковых токов и плавный пуск двигателя.

- высокая чистота проточных каналов, низкая адгезия и высокая коррозионная стойкость материала рабочих органов обеспечивают уменьшение температуры нагрева пластовой жидкости, что способствует снижению вероятности выпадения солей в осадок.

## ВЫВОДЫ

Поскольку производственный процесс шахты зависит от непрерывного откачивания пластовых вод, использование вибрационной диагностической установки и микропроцессорных ручных приборов, является необходимым средством для предотвращения отказа и аварий дорогостоящего оборудования водоотливной установки центробежного насосного агрегата.

Применение современных полимерных материалов при производстве рабочих органов насоса ЦНС позволяет снизить скорость коррозии и солеотложения. Использование полимерных колес позволяет повысить жесткость вала до величины, соответствующей необходимой отстройке, сравнительно небольшим увеличением площади поперечного сечения.

Низко-адгезионные ЦНС по сравнению с металлическими насосами в традиционном исполнении позволяют сократить эксплуатационные затраты, количество ремонтов, а также увеличить наработку оборудования на отказ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойченко Сергей Николаевич. Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по спектральным параметрам вибрации : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. – Омск, 2006. – 169 с. РГБ ОД, 61:07-5/509

2. Костюков Алексей Владимирович. Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по трендам вибропараметров : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. – Омск, 2006. – 203 с. РГБ ОД, 61:07-5/1517

3. Рабочие колеса насосов из полимерных композиций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spb-sovtrans.ru/polimernye-kompozicii/963-rabochie-kolesa-nasosov-iz-polimernyh-kompoziciy.html> (30.08.2016).

4. Выбор и обоснование полимерных композиций шахтных насосов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://spb-sovtrans.ru/polimernye-kompozicii/962-vybor-i-obosnovanie-polimernyh-kompoziciy-shahtnyh-nasosov.html> (30.08.2016).

Статья поступила в редакцию 15.12.2019 г.

УДК 621.9

Нос Р. С. (ТМ-17-1зм)

## АВТОМАТИЧНА ГНУЧКА СИСТЕМА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГІДРОЦИЛІНДРІВ

*У статті розглянуто основні шляхи вирішення проблеми низької продуктивності та гнучкості традиційних механоскладальних систем. Показані переваги гнучкості автоматичних систем заготівельного процесу, механообробки, складання гідроциліндрів і типових механізмів. Запропоновано автоматичну гнучку систему для виробництва гідроциліндрів, із застосуванням МБЛЗ для отримання заготовок, сучасного механообробного обладнання, механізмів з паралельною кінематикою та спеціальним переналагоджуваним оснащенням.*

*The article describes the main ways to solve the problem of low productivity and flexibility of traditional mechanical Assembly systems. Advantages of flexibility of automatic systems of procurement process, machining, Assembly of hydraulic cylinders and typical mechanisms are shown. The proposed automatic bending system for the production of hydraulic cylinders, using the continuous casting machine for producing blanks, modern machining equipment, mechanisms with parallel kinematics and special perevalochny equipment.*

Життєвий цикл виробу в значній мірі залежить від технологічності його конструкції при виготовленні та експлуатації. Конструкція виробу, в першу чергу, повинна бути підготовлена до конкретних умов: технології, обладнання, технічного оснащення та організації процесу [1].

Для підвищення гнучкості автоматизованого виробництва необхідно підлаштовуватися під жорстку конкуренцію на світовому ринку, необхідно в короткий проміжок часу і з мінімальними затратами мати змогу пере налаштувати обладнання для виготовлення виробів [2].

В цеху № 16, який забезпечує випуск деталей для гідроциліндрів різних типорозмірів, були виявлені такі проблеми:

- нерациональне використання ресурсів (заготівельний процес);
- не достатній рівень виробничої системи підприємства;
- не достатній рівень гнучкості виробництва.

Метою даної роботи є розробка автоматичної гнучкої системи для виробництва гідроциліндрів типу НК-40-36.

Для отримання заготівлі корпусу гідроциліндру використовується поковка. Коефіцієнт використання матеріалу складає усього 0,66. Багато матеріалу уходить у стружку на механообробних операціях. Також заготівля поковка додає ускладнення на механообробний процес. У отриманій заготівлі Ф 410 необхідно на механообробних операціях зробити отвір Ф 236 мм.

Застаріле обладнання не забезпечує підвищену гнучкість і автоматизацію виробництва гідроциліндрів. Також застарілі верстати змушує поділяти технологічний процес на багато операцій на різних верстатах. Складання гідроциліндру виконують на спеціалізованих стендах. Переналагодження таких стендів під різні розміри виробів займає багато часу, а в деяких випадках переналадити їх не можливо. Для гнучкого автоматизованого виробництва така схема складання не підходить. Для вирішення перерахованих проблем розроблений перспективний технологічний процес.

Для отримання заготовки пропонується МБЛЗ (рис. 1) – машина безперервного лиття заготовок. МБЛЗ дозволяє отримувати заготівлі для усіх деталей гідроциліндру з високим коефіцієнтом використання матеріалу 0,9. Такий метод отримання заготівлі дозволить скоротити технологічний процес виготовлення гідроциліндру. Машина безперервного лиття заготовок забезпечує гнучкість і автоматизацію виробництва. До МБЛЗ додається декілька кристалізаторів (7) для окремих деталей гідроциліндру. Для отримання заготівлі корпусу гідроциліндру використовується метод без-центрового отримання заготівлі.

До проміжного ковша 1 додається декілька розливних отворів з стопорними механізмами 2 для розливу металу для отримання заготовель різних деталей [3, 4].

З використанням новітніх верстатів з ЧПК більшість операцій можливо виконувати на одному верстаті з ЧПК у автоматичному режимі. Вибраний токарно-фрезерний верстат з ЧПК дозволяє об'єднати фрезерні, токарні, свердлильні операції. Це в багато разів скорочує допоміжний час обробки деталей.

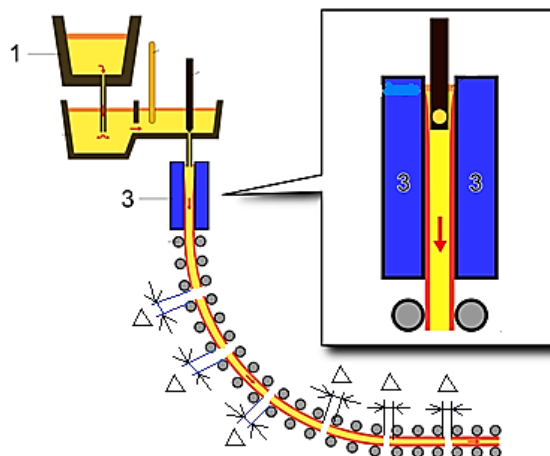


Рис. 1. Схема МБЛЗ

Основними частинами автоматичного складання є:

- завантаження і попередня орієнтація деталей;
- транспортування деталей в зону складання;
- базування і остаточна (взаємна) орієнтація;
- виконання з'єднання;

Автоматична складання пред'являє ряд особливих вимог до конструкції виробу і його елементів. Не виконання цих вимог може призводити до зниження якості отриманих виробів, невиправданих витрат праці, коштів, матеріалів, часу і часто робить неможливим автоматизацію складальних процесів [4,5].

У кожному конкретному випадку число і зміст виконуваних операцій і переходів складального процесу обумовлено конструкцією деталей і виробу або складальної одиниці. Істотний вплив на надійність і якість автоматичного складального процесу надають функціональні елементи деталей і складальних одиниць, що беруть участь у складальному процесі і взаємодіють з орієнтувальними, транспортними та виконавчими складальними механізмами автоматичного складального обладнання [5–8].

На підставі аналізу існуючих автоматизованих ліній складання, розроблена автоматизована лінія для гідроциліндрів типу НК4036 (рис. 2). Оскільки у механоскладальному цеху повинні складатися подібні гідроциліндри, різних типорозмірів, розроблено автоматизовану лінію, яка дає змогу провести складання усіх вироблених деталей. Така система в короткий проміжок часу переналаджується під різні складальні вироби. Автоматична лінія механоскладання, що враховує зауваження, які наведені вище до елементів виробництва гідроциліндрів різних типів, повинна працювати наступним чином.

Для гідроциліндрів типу НК3036 орієнтування для операцій складання є відносно простим і може виконуватися на призматичних підставках 3,8 з електричним хватом. Підставка 8, має ключову роль у цій схемі. Вона виконує орієнтування корпусу гідроциліндру і дає змогу надати орієнтир при закріпленні болтами, корпусу 9 з кришками 2,12. Закріплення корпусу з кришками виконується пневматичним гайковим ключем зі змінними насадками 5. Подача болтів до насадки 5 здійснюється із бункеру 6, бункер має декілька відділень для різних за діаметром і довжиною болтів.

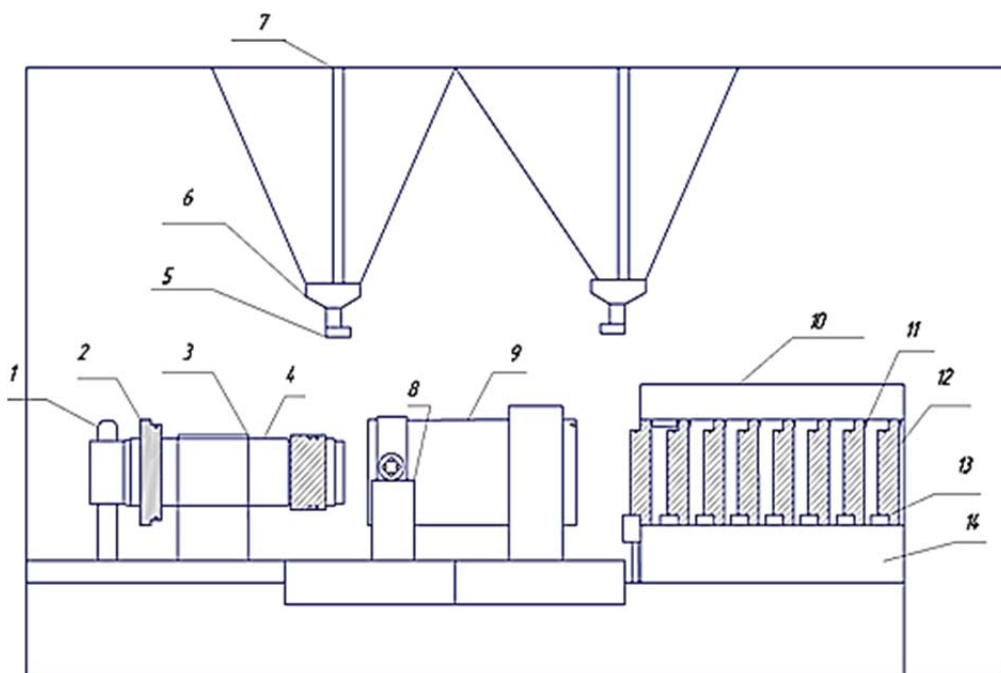


Рис. 2. Схема автоматизованого складання гідроциліндру

Робоча платформа з інструментом представляє собою маніпулятор з паралельною кінематикою. До платформи закріплюються три телескопічні штанги. Така конструкція штанг дозволяє маніпуляторам охоплювати велику робочу зону. Такі механізми з паралельною кінематикою дозволяють розширити гнучкість механоскладального виробництва, вони підлаштовуються під різно-номенклатурний ряд деталей які необхідно складати. Також дані механізми з паралельною кінематикою можливо використовувати для різного роду операцій, наприклад таких, як зварювання деталей, використовувати різноманітний набір складальних інструментів і пристосувань, хватів, штовхачів і ін..

Шток 4 встановлений на призматичну підставку 3 яка задає йому орієнтацію для попадання штоку 4 у отвір корпусу 9. Зусилля для запресування штоку з плунжером 4 здійснює штовхач 1. Штовхач 1 одягається у отвір штоку 4 і надає заданого зусилля для запресування, коли плунжер штоку 4 починає входити у отвір корпусу 9, підставка 3 розводиться і убирається, таким чином хромоване покриття штоку 4 не ушкоджується від сил тертя при запресуванні. Стенд для випробування має проміжний склад, так як випробування тиском тривають 3-4 хвилини.

Надалі, перспективний технологічний процес передбачає наступні дії. Складений гідроциліндр відправляється на малярну дільницю, де проводиться фарбування, упаковка і відправка готового виробу.

Керування і контроль гнучкої автоматичної механоскладальної лінії забезпечує – УОК (управляючий обчислювальний комплекс), рис. 3.

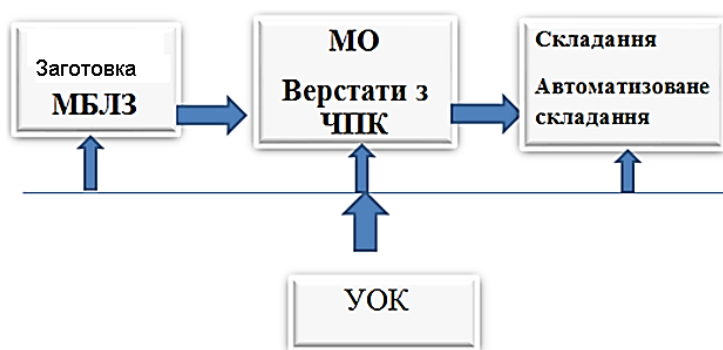


Рис. 3. Блок-схема розробленого виробництва гідроциліндру

Автоматизована лінія складається із декількох підготовчих складальних відділень. Перше підготовче відділення це мийка і сушка корпусу гідроциліндру. Мийне підготовче відділення знаходиться на конвеєрі автоматичної лінії. Після миття і сушки гідроциліндр відправляється по конвеєру на загальне складання. Паралельно миттю корпусу шток 4 складається з плунжером на окремій стрічці конвеєру.

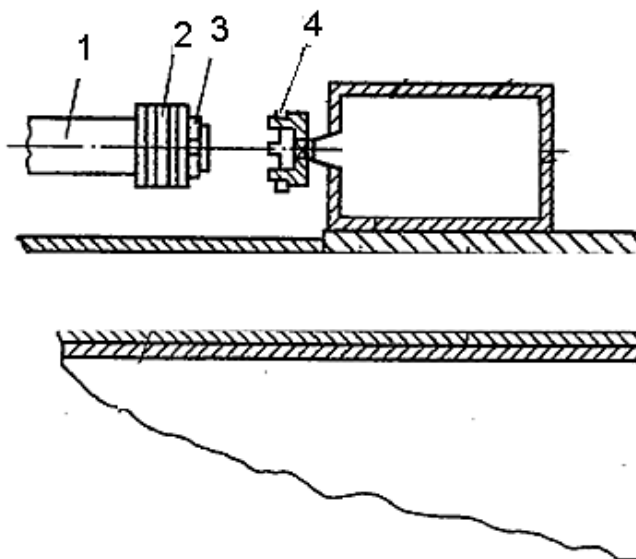


Рис. 4. Підготовче складальне відділення

На підготовчому складальному відділенні який зображений на рис. 4, на шток 1 приєднується плунжер 2, який закріплюється гайкою 3, закріплюючим механізмом 4.

## ВИСНОВКИ

Розроблена схема автоматичного виготовлення гідроциліндрів відноситься до гнучкої системи виробництва. Представлений технологічний процес отримання деталей гідроциліндрів дає змогу виготовлювати гідроциліндри різної конфігурації, з швидким переналагодженням під різні типи розміри деталей. Це дозволяє значно скорочується штучний час складання виробів, за рахунок автоматизації механоскладального комплексу скорочуються кошти на зарплатню. Розроблену систему можливо переналаджувати при зміні складальних виробів і легко переналаджувати її для нових виробів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корсаков В. С. Автоматизация производственных процессов / В. С. Корсаков. – М. : Высш. шк., 1978. – 295 с.
2. Кузнецов М. М. Автоматизация производственных процессов. / М. М. Кузнецов. – М. : Высшая школа, 1978. – 430 с.
3. Малов А. Н. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов / А. Н. Малов, Ю. В. Иванов. – М. : Машиностроение, 1974. – 368 с.
4. Малов А. Н. Загрузочные устройства для металлорежущих станков / А. Н. Малов. – М. : Машиностроение, 1972. – 480 с.
5. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб. для вузов / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов, А. Г. Схиртладзе и др.; под ред. Н. М. Капустина. – М. : Высш. шк., 2004. – 415 с.
6. Волчкевич Л. И. Автоматизация производственных процессов : учеб. пособие / Л. И. Волчкевич. – М. : Машиностроение, 2005. – 380 с.
7. Формування реконфігурованої структури ділянок у механо-складальних цехах на основі мобільних верстатів-роботів / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – № 1(40). – С. 69–72
8. Yoram Koren The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems / Yoram Koren. – 2010. – 422 p.

УДК 621.9

Орленко М. В. (ТМ-17-1зм)

## ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЗРАЗКІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*У статті викладено підхід до виявлення дефектних виробів як за наявністю дефектів неоднорідності металу, так і по розмірам. Запропоновано акустичний метод на основі аналізу спектрів власних коливань деталі. Надані результати нейромережевого моделювання досліджуваного зразка. Результати випробувань дозволяють організувати не тільки приймальний, а й поопераційний контроль, включаючи перші операції. Це дозволить виключити непродуктивні операційні витрати.*

*Approach is stated in article to discovery fault product as on presence defect denseness metal that and on size. The acoustic method is offered on base of the analysis spectrum own fluctuation of the detail. The presented results neural network modeling of the under investigation object. The test results allow to organize not only the reception, but also the operational control, including the first operation. This will help to eliminate unproductive expenditures.*

Актуальність проблеми полягає в тому, що в машинобудівному виробництві для забезпечення якості, надійності і взаємозамінності виробів на виконання лінійних і куткових вимірювань, використовується до 25 % трудових ресурсів [1–2].

Для контролю номенклатурного ряду деталей в машинобудівному виробництві використовуються методи вибіркового контролю, які не дають гарантію якості всієї партії деталей, хоча і використовуються руйнівні і неруйнівні методи. Проте вони потребують більше часу та використання спеціального обладнання на виконання замірів та підтвердження якості великогабаритних деталей. Використання вказаних вище методів контролю в виробництві не дають змоги провести автоматизацію застарілого виробничого процесу [3, 4].

Виявлення порушень суцільності або однорідності макроструктури, відхилень хімічного складу деталей є важливим етапом розвитку машинобудівного виробництва [5].

В статті запропоновано метод експрес діагностики для виявлення виробів, які не відповідають технічним вимогам [6].

Метою роботи є дослідження акустичної дефектоскопії зразків деталей машин, а також підхід до виявлення дефектних виробів як за наявністю дефектів неоднорідності металу, так і по розмірам.

Для повного контролю виготовлення деталі валок, починаючи від заготівлі до фінальної обробки, пропонується впровадження запропонованого способу для комплексної діагностики ультразвуковим контролем з нейромережевою моделлю.

Завдяки запропонованому способу можливо діагностувати брак деталей ще на стадії заготівлі швидко без руйнівного контролю і з високою точністю. Далі на стадії механообробки дає можливість контролювати лінійні і діаметральні розміри деталі. Це також дає можливість проводити активний контроль виготовлення деталі, що дозволяє проводити автоматизовану обробку із високою точністю [7, 8].

З допомогою ультразвуковому впливу ми матимемо повну характеристику деталі, для того щоб розшифрувати ці значення і використовувати їх для діагностики необхідно навчити нейромережеву модель відрізнити годні деталі від бракованих. Ця модель дозволить визначати діапазон придатних і не придатних деталей [9].

Ультразвук добре поширюється в деяких матеріалах, що дозволяє використовувати його для ультразвукової дефектоскопії виробів з цих матеріалів. Останнім часом має розвиток напрямок ультразвукової мікроскопії, що дозволяє досліджувати підповерхневий шар матеріалу з хорошою роздільною здатністю [10].

Для ультразвукового контролю необхідно набрати базу даних спектральних характеристик деталей на різних стадіях їх виготовлення. Таким чином це дає змогу вести контроль деталей на всій стадії виготовлення.



База спектрального аналізу деталей набирається з годних (еталонних деталей) і дефектних деталей (рис. 1). Чим більше буде база даних тим більше характерних дефектів буде виявлено і поділено по категоріям. Це дає змогу виявляти у чому полягає виникнення браку. Це може бути як знос інструменту, знос верстату, неправильні режими тощо [10, 11, 12].

Після набору бази даних їх застосовують для навчання нейромережевої модель. Ця модель проходить навчання і після навчання вона може точно виявляти браковані деталі. І цей процес буде тривати секунду відміно від традиційних методів контролю.



Рис. 1. Отримані дані з програми аналізатору спектру

У якості зразків були взяті чотири валки, 3 були годні, один був з дефектом. Був знятий спектральний аналіз з усіх зразків (рис. 2). На деталь посилається сигнал в діапазоні частот від 0 Hz до 20kHz (білий шум). Для отримання показників використовується програма аналізатор спектру. Отриманні спектри оцифровують та зводять до таблиці EXCEL (рис. 3).

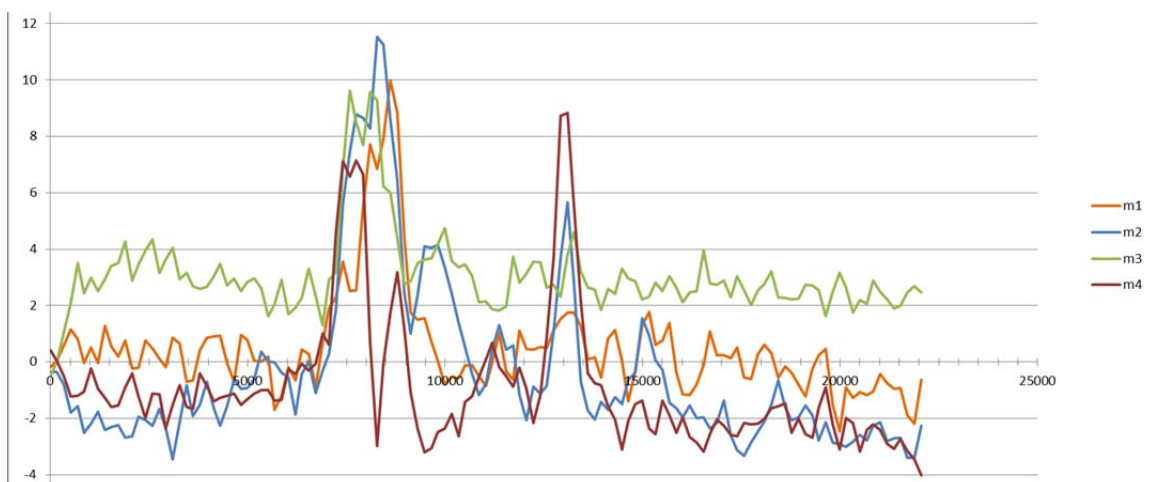


Рис. 2. Акустичні характеристики зразків

NeuroPro опрацьовує дані тільки в форматах DB (таблиці СУБД Paradox) і DBF (таблиці СУБД FoxPro і dBase). У світі найбільш поширений формат DBF. Для цього ми підготуємо файл excel і перетворюємо його у dbf формат (рис. 4). Отриманні данні необхідно зформувати для роботи з програмою NeuroPro 0.25 (рис. 5). Ця програма призначена для створення нейромережевої моделі (рис. 6).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18
1	Vhod					689,1	861,3	1033,6	1205,9	1378,1	1550,4	1722,7	1894,9	2067,2	2239,5	2411,7	2584	2756,3	2928,5
2	m1	-0,18	0,03	0,58	1,16	0,81	-0,04	0,51	-0,03	1,28	0,55	0,19	0,77	-0,24	-0,21	0,77	0,48	0,11	-0,17
3	m2	-0,35	-0,35	-0,81	-1,79	-1,56	-2,52	-2,18	-1,76	-2,4	-2,31	-2,23	-2,69	-2,64	-1,94	-2,07	-2,25	-1,67	-2,33
4	m3	-0,47	0	1,03	2,1	3,31	2,45	2,98	2,51	2,94	3,42	3,51	4,27	2,88	3,43	3,96	4,34	3,16	3,64
5	m4	0,42	0,03	-0,5	-1,21	-1,2	-1,05	-0,24	-0,96	-1,27	-1,59	-1,55	-0,9	-0,41	-1,21	-2	-1,12	-1,14	-2,37

Рис. 3. Формування даних для створення нейронної мережі

Виточка  $L = 2,75$  мм;  $H = 0,95$ ;  $D = 28,35$ . Канавка знаходиться на  $L = 27,40$  мм від торця. Вихідні дані зразків для дослідження впливу браку на спектрограму:

L, мм	d1, мм	d2, мм	d3, мм
200,10	Ø30,01	Ø30,23	Ø30,19
200,05	Ø30,23	Ø30,20	Ø30,17
199,95	Ø30,22	Ø30,24	Ø30,28
201,00	Ø30,25	Ø30,32	Ø30,29

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	
1	0,01	0,01	-1,15	-0,78	0,14	0,96999	-1,14	-0,70999	1,27	1,12	-1,55	0,06	0,32999	0,89999	0,79999	0,7			
2	0,01	0,01	0,96999	1,43	3,6	6,59	4,56	1,11	3,53	6,10	0,54	2,42	1,54	0,73	2,25				
3	-0,01	-0,01	-1,72	-2,43	-2,99	-3,89	-5,23	-2,59	-2,5	-3,45	-3,18	-2,37	-1,76	-0,28	-1,75				
4	0	0	0,58	0,36999	0,33	0,21	0,5	0,73999	1,05	1,02	-0,73999	0,92	1,42	0,93999	0,96999	0,38			
5	0,00999	0,01999	-0,14999	-0,20999	0,96999	2,65	0,78999	-0,61999	1,63	2,66	-2,43	1,49	2,32	0,999	1,62				
6	-0,00999	-0,00999	-3,56	-2,1	0,03	2,67	-1,65	-2,68	1,65	5,67	-3,51	0,04999	1,05	-0,03	2,86				
7	0	0	-1,52	-1,36	0,49	3,31	0,03	-2,75	0,76999	5,28	-3,06	0,18999	1,3	-1,87	1,58				
8	0	0	1,26	-0,02	0,78999	3,48	-1,94	-1,61	2,33	3,66	-2,56	1,29	1,58	-0,2	3,29				
9	0,01	0,01	-0,04	0,25	1,22	3,26	-1,6	-0,60999	2,61	1,29	-2,35	0,43999	0,25	0,98	1,73				
10	0,00999	0,00999	-0,43	0,41	1	3,06	0	-0,34	1,64	3,59	-0,78	0,1	-0,85999	-0,6	0,68				
11	0,00999	0,00999	0,29	-3,01	-1,67	1,84	-1,51	-2,9	1,31	3,1	-3,3	-0,68999	1,1	2,88	1,38				
12	0,01999	0,01999	0,64	0,58999	2,46	-1,77	-2,11	-1,09	3,53	4,41	-2,36	0,78	1,18	2,21	1,41				
13	0	0	-0,00999	-0,88	-0,01	4,38	-1,82	-1,69	2,33	3,41	-1,13	-0,81999	1,17	2,52	-0,24				
14	0,00999	0,00999	-0,17	0,07	0,32999	0,56	0,54999	-0,51999	-0,21999	0,04999	-1,18	0,23	-0,31	0,39	1,16				
15	0	0	0,03999	-1	0,89	5,14	-2,72	-2,28	3,45	3,11	-1,61	1,31	3,08	3,73	1,28	0,48			
16	0	0	-0,87	-1,89	0,75999	3,03	-2,78	-0,89	2,23	1,86	0,03	1,15	2,16	0	0,95999				
17	0	0	3,96	1,36	1,45	5,17	4,63	0,84	3,71	7,08	1,26	2,17	4,23	5,74	3,55				
18	-0,00999	-0,00999	-0,12	-0,78	1,83	5,24	-1,51	-3,18	1,56	3,97	-2,96	-1,08	0,62	1,91	1,4				
19	0	0	2,11	1,38	2,96	5,45	1,4	-1,13	2,89	3,44	1,02	0,53999	2,28	2,37	0,4				
20	0,01	0,01999	2,61	0,33999	1,11	4,85	2,64	-1,67	1,19	2,88	1,24	1,48	3,09	3,12	2,76				
21	0,00999	0,00999	2,43	0,29	1,23	3,41	-3,38	-1,28	2,53	3,51	-2	1,5	1,37	1,84	1,31				
22	-0,00999	-0,00999	-0,08999	-0,03999	1,14	3,78	0,62999	-0,19999	3,29	4,79	-0,32999	1,49	1,89	1,66	1,52				
23	0	0	0,78	-0,2	1,36	3,44	-0,84	0,06	2,57	2,59	-0,62	2,07	0,90999	1,72	0,90999				
24	0,01	0,01	-0,32999	-1,51	-0,03	2,36	-4,05	-2,62	1,82	3,37	-3,26	0,5	-0,72999	-0,54999	1,55	-0,1			
25	0,01	0,01	0,32999	-2,2	-1,4	1,46	-0,76999	-2,69	0,07999	1,76	-3,13	-1,39	-0,71999	-1,87	-0,01				
26	-0,01	-0,01	0,18999	-0,37999	1,31	3,27	2,15	1,34	3,27	5,93	-0,59	0,89	0,90999	0,15	1,47				
27	-0,01	0	0,59999	-1	0,03	3,36	1,21	-1,3	2,4	6,03	-0,28	0,95	1,82	1,21	1,37				
28	0,00999	0,00999	0,65999	0,76999	0,76	4,95	0,82999	-2,1	1,22	4,82	-0,67	1,02	1,88	0,74	1,54	-0,1			
29	0	0	0,46999	-0,58999	-0,68999	3,53	1,55	0,46999	4,32	4,14	0,56999	1,43	1,53	1,75	0,75				
30	0,01	0,01	0,53	0,21999	0,67	4,32	3,2	-0,45	3,94	6,39	2,17	3,08	3,21	2,85	3,11				
31	0	0	1,75	0,12999	1,24	5,05	2,63	-0,80999	3,55	5,95	2,27	1,65	3	3,14	1,89				
32	0	0	0,75	-0,54	0,84999	4,09	0,17	-1,47	1,86	4,29	-1,86	0,18	0,96999	1,37	0,90999				
33	0	0	-13,97	-7,5	-3	-3,99999	-2,23	-1,88	0,78999	3,14	-2,48	-0,62999	0,7	0,37999	0,68999	-0,71			
34	0,01	0	1,62	-1,07	0,68	4,73	-0,56999	-2,34	3,89	4,53	-0,79	1,2	3	2,18	0,96				
35	-0,01	0,01	0,82999	-0,62	0,01	2,13	-1,58	-1,52	2	2,46	-0,36999	-0,01999	0,73999	1,54	-0,29999				
36	-0,00999	-0,00999	0,75	-1,3	0,56	2,94	-1,57	-1,1	2,98	4,57	-1,77	1,12	0,26	2,21	1,66				
37	0	0	1,41	-1,57	0,02	2,55	-1,34	-0,57	2,13	4,83	-2,01	1,1	1,57	1,49	2,52				
38	0	0	-0,00999	-2,93	-2,95	-0,78	3,88	-2,13	-3,88	2,93	6,19	-2,19	1,13	1,28	1,36	5,17			
39																			
40																			

Рис. 4. Отримані дані у dbf форматі

	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	Y
Vhod	517,9	861,3	1033,6	1205,9	1378,1	1550,4	1722,7			21188,7	21360,9	21533,2	21705,5	21877,7	22050		
m1	1,81	-0,04	0,51	-0,03	1,28	0,55	0,19			-0,76	-0,95	-0,92	-1,89	-2,19	-0,62	1,00	
m2	-2,56	-2,52	-2,18	-1,76	-2,4	-2,31	-2,23			-2,8	-2,71	-2,67	-3,41	-3,4	-2,27	1,00	
m3	2,51	2,45	2,98	2,51	2,94	3,42	3,51			2,22	1,89	2	2,46	2,69	2,47	1,00	
m4	-1,12	-1,05	-0,24	-0,96	-1,27	-1,59	-1,55			-2,91	-3,09	-2,73	-3,16	-3,46	-4,01	0,00	

Рис. 5. Створення нейронної мережі та завантажена база даних спектральних характеристик зразків

№	Y	Прогноз сети	Ошибка
1	1	1,027946	-0,02794576
2	1	1,007216	-0,007216454
3	1	1,033814	-0,03381395
4	0	0,01274186	-0,01274186
		Правильно:	4 (100%)
		Неправильно:	0 (0%)
		Всего:	4
		Ср.ошибка:	0,02042951
		Макс.ошибка:	0,03381395

Рис. 6. Результат тестування чотирьох зразків навченою нейронною мережею

Нейронна мережа поділяє валки на два типи, придатні і не придатні. Придатні валки навчена мережа прогнозує як одиницю, а не придатні цифрою близькою до нуля. Нейронна мережа чітко поділяє не придатний валок від придатного, якщо набрати валки базу даних з різних видів дефектів валків при їх виготовленні, можливо чітко поділяти їх по різних дефектах. Такий метод діагностики можливо використовувати для різноманітних деталей, різноманітної конфігурації [13, 14].

Для перевірки навченої нейронної мережі було підготовано декілька тестових вибірок з двох зразків 1 та 4 валків. Змінюючи послідовність зняття характеристик в першому випадку 1,1,4,1 та внесення в NeuroPro 0.25 для перевірки отримали результат (рис. 7, 8). В іншому випадку при перестановці вхідних параметрів, тобто розташуванню спектральних акустичних характеристик в такій черзі 1,4,1,1, було отримано безпомилкове визначення непридатного зразка в обох випадках, що дає підстави у якості та точності побудованої та навченої нейронної мережі на зібраній базі спектральних акустичних характеристик робити правильні висновки при контролі вибірки деталей з партії [16, 17, 18].

№	NOMER	Прогноз сети	Ошибка
2	1	1,036239	-0,03623939
3	1	1,039138	-0,03913772
4	4	3,858953	0,1410465
5	1	0,9605726	0,0394274
		Правильно:	3 (75%)
		Неправильно:	1 (25%)
		Всего:	4
		Ср.ошибка:	0,06396276
		Макс.ошибка:	0,1410465

Рис. 7. Результат перевірки спектральних характеристик валків 1, 1, 4, 1 навченою нейронною мережею

	NOMER	Прогноз	сети	Ошибка
1	1	1,036239		-0,03623939
2	4	3,858953		0,1410465
3	1	1,039138		-0,03913772
4	1	0,9605726		0,0394274
5				
6				
7				Правильно: 3 (75%)
8				Неправильно: 1 (25%)
9				Всего: 4
10				Ср.ошибка: 0,06396276
11				Макс.ошибка: 0,1410465
12				

Рис. 8. Результат перевірки спектральних характеристик валків 1, 4, 1, 1 навченою нейронною мережею

## ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження довели можливість комплексної діагностики, основуючись на аналізі акустичних спектрів власних коливань зразків. В ході проведення випробувань доведено те, що навчена за допомогою бази даних нейромережева модель має змогу з високою точністю проводити діагностику з виявлення якісної характеристики кожної з деталей, а саме проводити відбраковку контрольованих деталей ще до їх поломки. Це дозволить виключити непродуктивні операційні витрати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. Звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности. – 1966. – 519 с. – ISBN 978-5-458-49876-0.
2. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике / И. А. Викторов. – М. : Наука, 1966.
3. Голямина И. П. (ред.). Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М. : Советская энциклопедия, 1979.
4. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику (2-е издание) / Г. С. Горелик. – М. : Физматлит, 1959.
5. Исакович М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М. : Наука, 1973.
6. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / Б. З. Каценеленбаум. – М. : Изд-во АН СССР, 1961.
7. Лэмб Г. Динамическая теория звука / Г. Лэмб. – М. : ГИФМЛ, 1960.
8. Морз Ф. Колебания и звук. М.-Л. : ГИИТЛ, 1949.
9. Мэзон У. (ред.) Физическая акустика. Том 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. М. : Мир, 1966.
10. Поль Р. В. Механика, акустика и учение о теплоте / Р. В. Поль. – М. : ГИИТЛ, 1957.
11. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука / С. Н. Ржевкин. – М. : МГУ, 1960.
12. Ржевкин С. Н. Задачи по теории звука / С. Н. Ржевкин. – М. : МГУ, 1976.
13. Римский-Корсаков А. В. Электроакустика / А. В. Римский-Корсаков. – М. : Связь, 1973.
14. Розенберг Л. Д. (ред.) Физика и техника мощного ультразвука. Том 3. Физические основы ультразвуковой технологии / Л. Д. Розенберг. – М. : Наука, 1970.
15. Руденко О. В. Теоретические основы нелинейной акустики / О. В. Руденко, С. И. Солуян. – М. : Наука, 1975.
16. Рэлей (Стретт Дж. В.) Теория звука. Том 1-2 (2-е изд.) – М. : ГИИТЛ, 1955.
17. Сапожков М. А. Электроакустика / М. А. Сапожков. – М. : Связь, 1978.
18. Фурдуй В. В. Электроакустика / В. В. Фурдуй. – М.-Л. : ГИИТЛ, 1948.
19. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. – Л. : Судостроение, 1972.
20. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука / В. А. Шутилов. – Л. : ЛГУ, 1980.

УДК 621.789

Стукалова О. В. (ТМ-17М)

## РОЗРОБКА НОВОГО СПОСОБУ ВІБРОСТАБІЛІЗАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

*Розглянуті питання підвищення ефективності вібраційної стабілізації залишкових напружень у зварюваних конструкціях за рахунок використання полічастотного режиму динамічного навантаження.*

*The problems of improving the efficiency of vibrational stabilization of residual stresses in welded structures by using the poly-frequency mode of dynamic loading are considered.*

Виробничий досвід показав, що у корпусних конструкцій, виготовлених з простих маловуглецевих сталей і які мають безпосередньо після зварювання досить високу точність розмірів, після подальшої механічної обробки або вилежування протягом двох–трьох тижнів змінювалася межа допусків, і вони вимагали додаткової обробки. Основною причиною таких змін була наявність залишкових напруг [1, 2].

Зміни геометричних розмірів інтенсифікуються під впливом монтажних, транспортних та експлуатаційних навантажень, а також з підвищенням температури.

Для збільшення стабільності геометричних розмірів зварних конструкцій їх часто піддають загальній термічній обробці (відпустці), що вимагає великих енергетичних витрат.

Актуальною задачею вирішення проблеми покращення точності є процес зняття залишкових напружень за допомогою вібростабілізаційної обробки на резонансних частотах тому що цей процес є менш енергоємним, але в більшості випадків проводиться на резонансних частотах всього корпусу.

Вібраційну обробку здійснюють за допомогою збудження в конструкції низькочастотних механічних коливань.

По енергоємності вібростабілізація в десятки разів нижче термічної обробки, а по продуктивності значно перевершує її. Приблизно на порядок знижуються капітальні витрати.

Вібраційній обробці піддають конструкції не тільки з вуглецевих сталей, але і виготовлені з алюмінієвих і титанових сплавів. Широко використовують віброобробку чавунних і сталевих виливків [1, 3, 4].

Незважаючи на наявність багатьох розрізнених публікацій з проблеми вібраційної обробки узагальнююча література з цієї тематики практично відсутня [2, 5, 6].

Мета статті – запропонувати метод більш ефективної вібростабілізації за рахунок проведення одночасної обробки окремих частин корпусної деталі на власних резонансних частотах.

Приклад здійснення методу: за допомогою пьезодатчиків, та програмного забезпечення «Signal Generation» відтворюючого білий шум, сигнал перетворюючись у механічні коливання впливає на корпус заготовки (рис. 1). Для фіксації резонансних коливань використовується програмне забезпечення «Spectrum Analyzer». Аналізатор перетворює механічні коливання у цифровий сигнал резонансних частот окремих частин корпусної деталі.

Сигнал білого шуму послідовно передається на окремі частини корпусу (рис. 1 б, в, г, д). Пропущений через апаратну частину, білий шум, буде нести в собі сигнал апаратної частини яка складається з комп'ютера, підсилювача і датчиків, і відбитий сигнал корпусу. В процесі фіксації спектру, фіксуються всі наведення апаратної частини, тому необхідно із загального сигналу відняти сигнал апаратної частини.

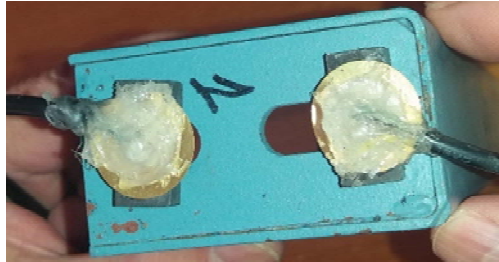
Графік амплітудно-частотних характеристик спектрів пластин у напруженому стані 1 показує, що резонансні частоти у кожної пластини індивідуальні, незважаючи на збіг деяких допоміжних.



Експериментальний стенд (рис. 1, а) зроблений таким чином, що він може відновлювати напружений стан. За допомогою болтових з'єднань можна створювати кілька напружених станів на одному експериментальному стенді.



а



б



в



г



д

Рис. 1. Експериментальний стенд:  
а) заготовка; б) поверхня 1; в) поверхня 2; г) поверхня 3; д) поверхня 4

Після створення напруженого стану 2 і послідовної обробки пластини на 2-х резонансних частотах протягом 5–10 хв, спостерігаються зміни амплітуди в результаті чого видно, що знижуються залишкові напруги (рис. 3).

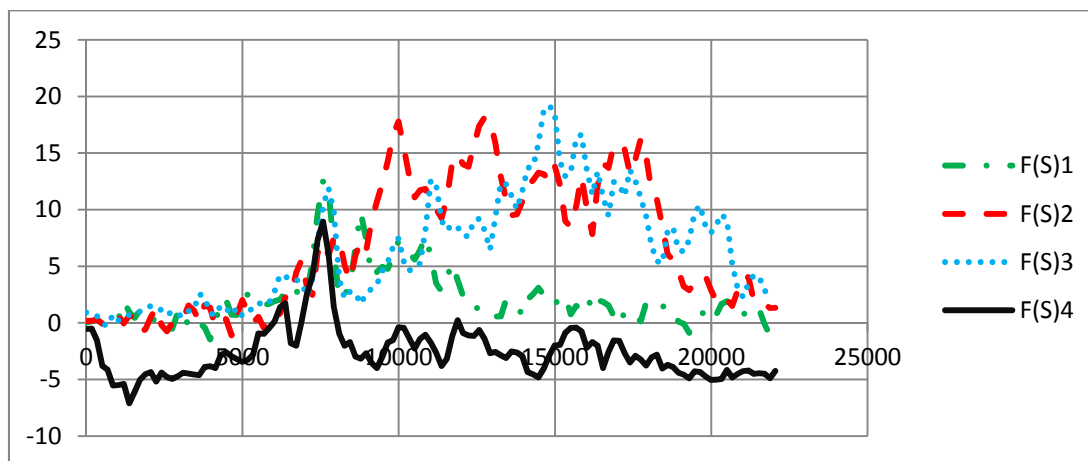


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики спектрів пластин у напруженому стані 1

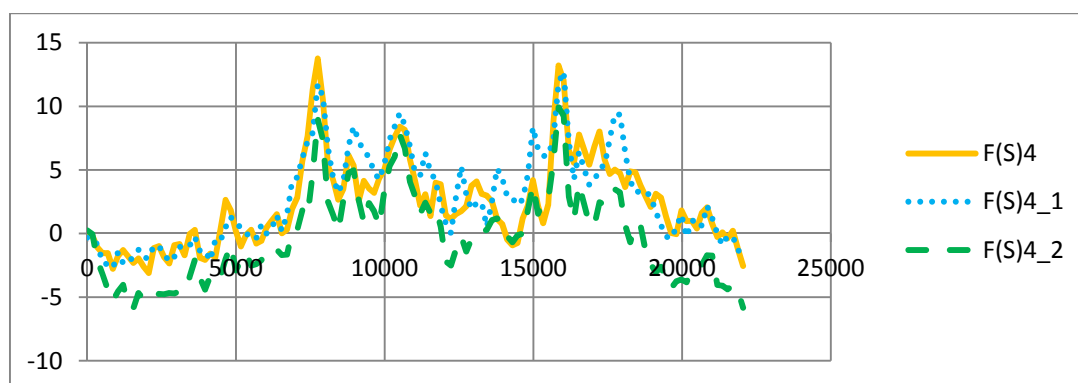


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики спектрів пластини 4 у напруженому стані 2 після обробки на резонансних частотах.

## ВИСНОВКИ

Полічастотна одночасна обробка усіх частин корпусних деталей надає змогу значно скоротити необхідний час впливу вібрації та зменшити амплітуди остаткових напружень.

Технічним результатом є підвищення точності за рахунок вібраційної стабілізації остаткових напружень у корпусних деталях, що підвищує продуктивність та знижує енергетичні витрати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ризванов Р. Г. Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений / Р. Г. Ризванов, А. М. Файрушин, Д. В. Каретников // *Литье и металлургия : научно-производственный журнал*. – 2012. – № 3 (67). – С. 337–342.
2. Семенов В. М. Исследование влияния термической и вибрационной обработки на деформации сварных конструкций / В. М. Семенов, А. Ю. Денщикова, С. В. Подлесный // *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2010. – № 2 (19). – С. 260–263.
3. Булат А. Ф. Повышение эффективности технологии вибрационной стабилизации остаточных напряжений и геометрических размеров в сварных конструкциях / А. Ф. Булат, Г. А. Шевченко, В. А. Ленда. – *Институт геотехнической механики им. С. Полякова НАН Украины*, 2012 г. – С. 84–87.
4. Лащенко Г. И. Технологические возможности вибрационной обработки сварных конструкций / Г. И. Лащенко // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 7 (754). – С. 28–34.
5. Яцерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Яцерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.
6. Колот В. А. Способ стабилизации остаточных напряжений / В. А. Колот, С. В. Ковалевский // *Прогрессивная технология в машиностроении : тезисы докладов*. – Симферополь, 1994. – С. 121.



УДК 621.982: 669.295

Ткач М. М. (ТМ-17-2м)

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ПІДГОТОВКИ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ З МЕХАНІЧНИМ КРІПЛЕННЯМ ПЛАСТИН

*Розглядається можливість настройки багаторізовцевих блоків таким чином, щоб пластини працювали в однакових умовах і однаково зношувалися.*

*It is considered the possibility of setting multi-unit blocks in such a way that the plates worked in identical conditions and were equally worn out.*

Незважаючи на велику кількість типорозмірів пластин відповідних різним конструкціям інструменту в тому числі таких в яких використовується групове застосування пластин [1–3] спостерігаються різні ступені зносу інструменту при однакових умовах різання. Це свідчить про те, що стабільність властивостей цих пластин навіть в межах партії неоднакова.

При спіканні карбіду та зв'язки на характеристики буде впливати багато факторів таких як: хімічний склад, пропорції, температура обробки тощо. У зв'язку з цим кожна ріжуча пластина відрізняється по внутрішній структурі, що призводить до різних експлуатаційних характеристик.

Втрата ріжучих властивостей пластин в багатолезовому інструменті приводить до того, що частина пластин використовує свій ресурс не повністю. Тому необхідно знайти і обґрунтувати способи зниження впливу нестабільності ріжучих властивостей непереточуваних пластин з механічним кріпленням.

В випадку якщо пластини мають різні резонансні частоти та амплітуди, умови праці відрізнятимуся, так як пластини за одиницю часу пройдуть різний шлях (рис. 1).

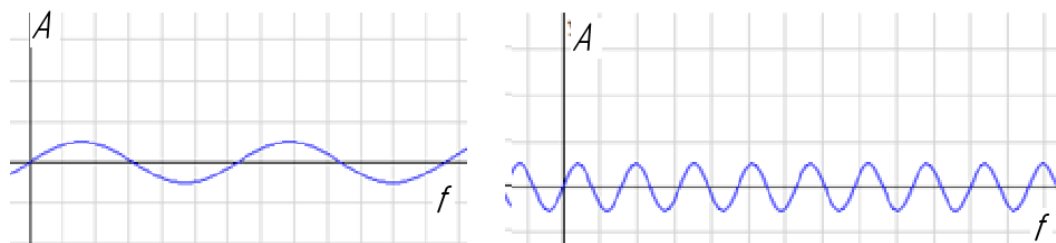


Рис. 1. приклад різних амплітуд і частот

Пройдений шлях залежить від амплітуди і частоти  $l_n = f(A; f)$ . Знаючи, що час обробки однаковий, але різний пройдений шлях, можливо зробити висновок, що пластини матимуть різні швидкості.

$$V_1 = \frac{l_1}{t_0}, \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{l_2}{t_0}, \quad (2)$$

де  $l_n$  – шлях різання  $n$ -ї пластини;  
 $t_0$  – час.

Знаючи, що швидкості різання різні, то і період стійкості інструменту буде відмінним. Все це призводить до різних умов праці пластин з механічним кріпленням.

Пластина закріплена в інструменті має складну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) з багатьма резонансними піками. Якщо кожна пластина матиме індивідуальну резонансну частоту, відмінну від інших, тоді вони будуть працювати гірше. На резонансну частоту пластини впливають наступні фактори: власна резонансна частота, зусилля, з яким затискається пластина, амплітуда.

На зміну амплітуди впливає знос інструменту, так як ми прагнемо однакового зносу амплітуда буде прямувати до однакових значень вплив на характеристики системи цим параметром не ефективний. Розбивши пластини на партії в залежності від внутрішніх коливань, можливо зменшити, але не виключити різницю АЧХ пластин. Тобто єдиний параметр який може достатньо впливати на резонанс – зусилля затиску.

Якщо в якості еталону вибирати АЧХ одної з пластин, а інші пластини настроюються по принципу суми мінімальних квадратів помилок АЧХ (3). В випадку, якщо сума стримиться до нуля, можливо стверджувати, що умови праці пластин однакові.

$$F(s) = [\overline{S}_1(A) - \overline{S}_2(A)]^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Дана гіпотеза основана на працях Ковалевського С. В. та Кулика Р. Ю. [4]; Ковалевського С. В. та Євсюкова Є. Ю. [5].

Мета роботи – розробка способу настройки багаторіцевих блоків таким чином, щоб пластини працювали в однакових умовах і однаково зношувалися.

Для досягнення цілі були вирішені наступні завдання:

1. Дослідити технологічні можливості впливу на ріжучі властивості інструменту;
2. Знайти і обґрунтувати спосіб діагностики якості інструменту з механічним кріпленням ріжучих пластин;
3. Розробити стенд для проведення експерименту;
4. Розробити методику експериментального дослідження запропонованого способу підвищення експлуатаційних характеристик;
5. Розробити рекомендації по використанню та способу налаштування.

Методика експерименту.

Для експерименту використовувалось наступне обладнання: програмний аналізатор, комбінований датчик – випромінювач МК2.

Заміри проводилися на різці та багатолезовій фрезі з механічним кріпленням пластин фірми Pramet.

Для перевірки гіпотези мною використана методика акустичного аналізу аналогічна працям [4, 6]. Методики акустичного аналізу запропоновані в статтях [7–9] були відхилені так як потребують дороге устаткування при тій же точності.

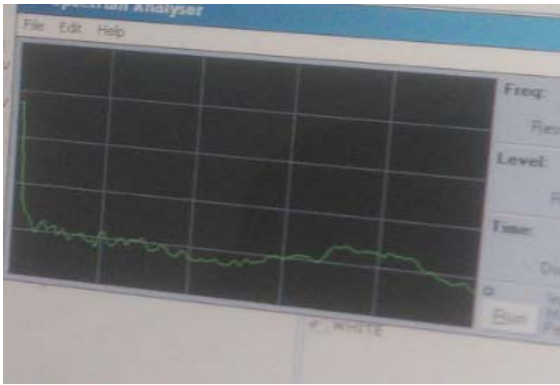
Порядок проведення роботи.

Першочергово були проведені заміри АЧХ фону апаратної частини стенда. Потім знято АЧХ пластини в напруженому стані зі змінною силою затиску. Приклади замірів АЧХ зображені на (рис. 2). Далі проводиться розрахунок власних коливань пластини в напруженому стані (3).

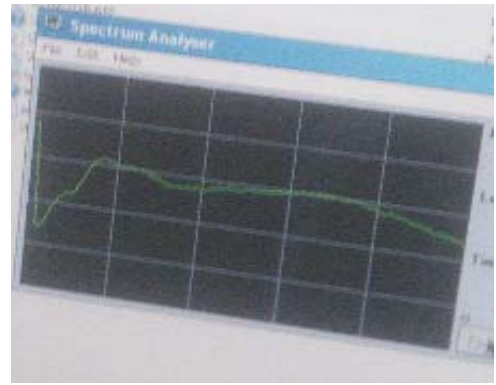
Готові експериментальні данні використані в якості вихідних для побудови математичної моделі в програмі NeuroPro 0.25 для пошуку найінформативнішої частоти [10].

По результатам аналізу побудований графік залежності амплітуди від сили затиску по найвпливовішій частоті (рис. 4).

В кінці експерименту проводиться коректування АЧХ пластин (рис. 5).



а)



б)

Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики:  
а – АЧХ фону апаратної частини експериментального стенда; б – АЧХ пластини в напруженому стані в сумі з фоном апаратної частини

В результаті апроксимації даних виявлено, що найбільш інформативною частотою є 15679,3 Hz (крок X91).

Проаналізувавши графік (рис. 4), видно майже лінійну залежність в діапазоні від 1 до 2,4. Це дає можливість враховувати характеристики пластин підбором сил затиску для зміни частот, що забезпечує однакові умови роботи та період стійкості.

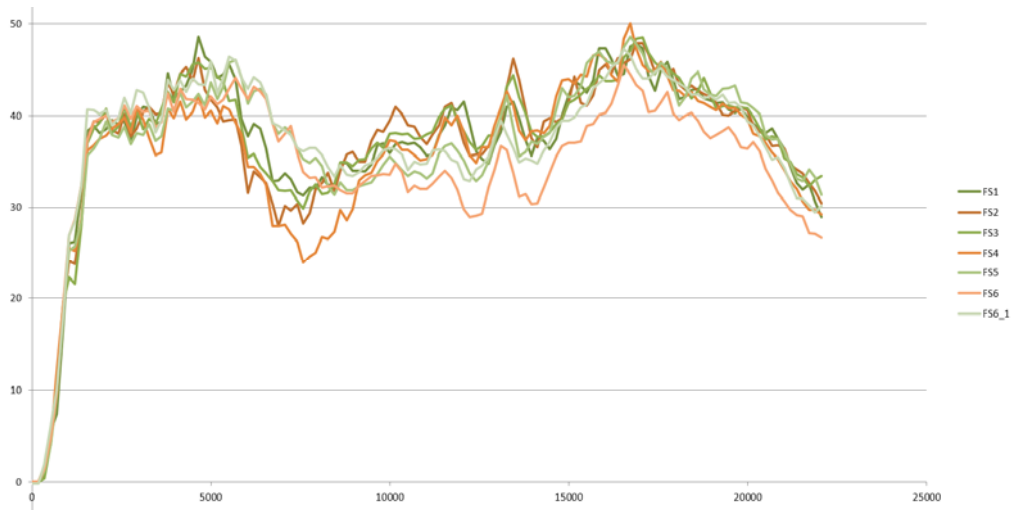


Рис. 3. Власні АЧХ пластин в напруженому стані

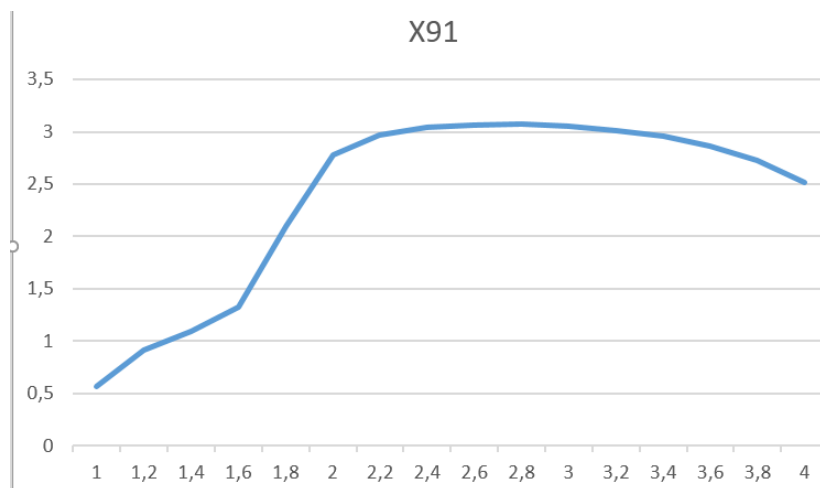


Рис. 4. Графік залежності амплітуди від сили затиску

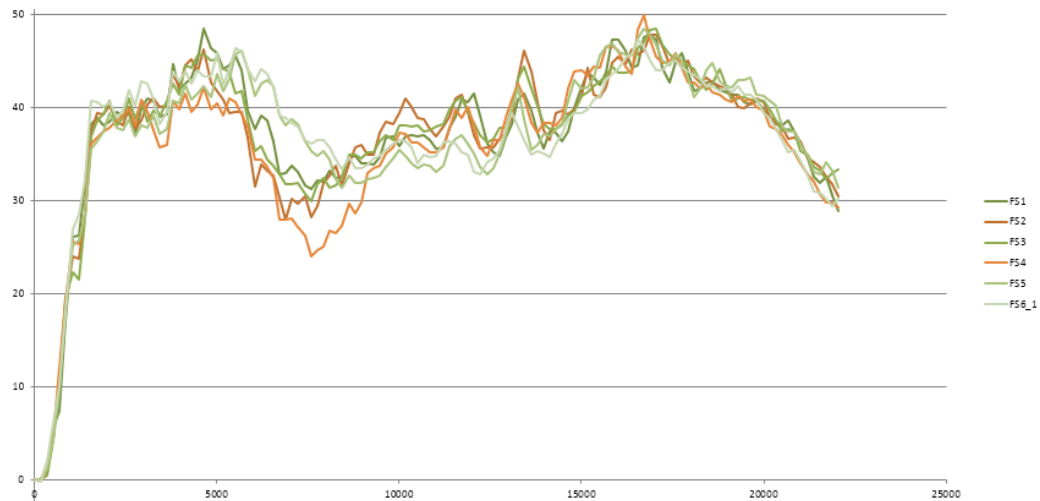


Рис. 5. Власні АЧХ пластин в напруженому стані після корекції.

## ВИСНОВКИ

Розроблено спосіб корекції властивостей закріплених в багаторізцевий інструмент пластин, шляхом регулювання зусилля затиску пластин. В результаті цього досягається мінімальне відхилення АЧХ закріплених пластин один від одного.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Каталог Sandvik Coromant *Вращающийся инструмент 2017*.
2. Каталог Pramet *Vardex gear milling*.
3. Каталог Pramet *Canela milling inserts*.
4. Ковалевський С.В. *Акустическая диагностика качества сборки многоболтовых соединений* / С. В. Ковалевський, Р. Ю. Кулик // *Студентський Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – Краматорськ : ДДМА, 2016.
5. *Нейросетевое прогнозирование стойкости упроченных режущих пластин* / Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Євсюков Є. Ю., Кошевой А. О. // *Нейросетевые технологии и их применение НСтП2014: сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2017. – С. 56.
6. Кулик Р. Ю. *Акустична діагностика якості збірки і працездатності виробів керуючої гідравліки* / Р. Ю. Кулик // *Молода наука XXI століття» збірник наукових праць всеукраїнської науково-технологічної конференції студентів та молодих вчених з міжнародною участю*. – Краматорськ : ДДМА, 2016.
7. Ермолов И. Н. *Акустические методы контроля* / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов. – Книга 2, Высшая школа, 1991. – 283 с.
8. *Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учебное пособие* / Б. И. Капранов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 186 с.
9. *Акустический контроль : учебное пособие* / А. Ф. Зацепин ; под ред. чл.-кор. РАН, проф., д-ра техн. наук В.Е. Щербинина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 211 с.
10. Ковалевський С. В. *Застосування нейромережевого моделювання для діагностики якості складання виробів машинобудування* / С. В. Ковалевський, Р. Ю. Кулик // *Нейромережні технології та їх застосування збірник наукових праць всеукраїнської науково-технологічної конференції з міжнародною участю*. – Краматорськ : ДДМА, 2016.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2018 р.

УДК 621.81:621.791

Бойко О. О., Буглак С. С., Баган А. В. (ЗВ-2м)

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ З ХРОМИСТИХ СТАЛЕЙ

*Розглянуті деякі відомі порошкові дроти для підвищення експлуатаційної стійкості наплавлених деталей, виготовлених з хромистих сталей. Відмічені переваги та недоліки проаналізованих дротів. Показано, що легування хромом не тільки забезпечує корозійну стійкість сталей в окислювальних середовищах, а й визначає їх структуру, механічні властивості, жароміцність, технологічні властивості. Проаналізовані результати наплавлення при різних температурах попереднього та супутнього підігріву, та зроблено висновки про необхідність підігріву. Відомі склади наплавленого металу, що досліджувалися: 15ХГ2С, 20Х2Г2М, 20ХГТ, 25ХЗГ2, 08г, 08ГС і 15Г2С. Основні технологічні особливості наплавлення ті ж, що і зварювання близьких за складом сталей. У випадках коли наплавлення виконують на основний метал з підвищеним вмістом вуглецю (стали 45, 50, 50Х) і сірки (35ЛК, 30Л і т. ін.) для уникнення появи кристалізаційних тріщин необхідно використовувати прийоми наплавлення, що забезпечують зменшення частки основного металу.*

*Some known powder wires for increasing the operational stability of the welded parts made of chrome steels are considered. The advantages and disadvantages of analyzed wires have been noted. It is shown that chromium doping not only provides corrosion resistance of steels in oxidizing media, but also determines their structure, mechanical properties, heat resistance, technological properties. The results of surfacing at different temperatures of the previous and accompanying heating have been analyzed, and the conclusions about the need for heating have been made. The well-known warehouses of the welded metal investigated: 15ХГ2С, 20Х2Г2М, 20ХГТ, 25ХЗГ2, 08г, 08ГС and 15Г2С. The main technological features of surfacing are the same as welding of close ones in the composition of steels. In cases where surfacing is carried out on the base metal with high carbon content (steel 45, 50, 50X) and sulfur (35LK, 30L, etc.), to avoid the appearance of crystallization cracks, it is necessary to use methods of surfacing that reduce the proportion of the base metal.*

При виготовленні деталей, що працюють при високому тиску і температурі в умовах впливу агресивних середовищ, широке застосування знаходять хромисті сталі, які не є дефіцитними.

Легування хромом не тільки забезпечує корозійну стійкість сталей в окислювальних середовищах, а й визначає їх структуру, механічні властивості, жароміцність, технологічні властивості. Утворюючи з залізом безперервний ряд твердих розчинів при концентраціях до 12 %, хром потім сприяє замикання  $\gamma$ -області перетворень при кристалізації, що є основною причиною формування в хромистих сталях різної структури і різноманіття їх властивостей [2].

Однак не завжди раціонально виготовляти деталь цілком з хромової сталі тому це здорожує виріб.

У зв'язку з цим метою даної роботи є пошук матеріалів які дозволять забезпечити необхідний рівень експлуатаційних властивостей робочого шару деталі, шляхом наплавлення різними властивостями

Технологія наплавлення є одним з методів поверхневого зміцнення деталей. Наплавлення покриттів проводиться сплавом присаджувального матеріалу (порошку, дроту, електрода) з основним. По виду покриття, що наноситься можна виділити наступні основні типи наплавлення [1, 2]:

1. Зносостійке наплавлення (перлітно-сорбітні, мартенситні, хромисті, високомарганцеві, аустенітні сталі, карбід вольфраму, стеліт).
2. Корозійностійке наплавлення (феритна, аустенітна, корозійностійка сталь «монель», «інконель», «хастеллой» та інші, нікель, сплави нікелю, мідь і її сплави).
3. Жаростійке наплавлення.
4. Жароміцне наплавлення.

Хороші результати при наплавленні дає використання порошкового дроту, до складу якого входять ферохром, феротитан, феромарганець, графітовий і залізний порошки. Наплавлення виконують під шаром флюсу або в середовищі захисного газу, але при введенні в дріт захисних компонентів можливе наплавлення і без флюсового або газового захисту [3].

При розгляді технології наплавлення, наплавлений метал розділений на типи відповідно до проекту класифікації Міжнародного інституту зварювання.

Наплавлений метал типу А – нелеговані або низьколеговані сталі з вмістом вуглецю менше 0,4 % в якості напавленого металу використовують головним чином для відновлення розмірів деталей і утворення прошарку для подальшого наплавлення зносостійкими сплавами. Застосовують наступні способи наплавлення: ручне дугове штучними електродами, механізоване під флюсом і в захисних газах, рідше – електрошлакове. Типові склади напавленого металу: 15ХГ2С, 20Х2Г2М, 20ХГТ, 25ХЗГ2, 08Г, 08ГС і 15Г2С. Останні два склади отримують за допомогою стандартного зварювального дроту в поєднанні зі звичайними флюсами АН-348-А, АН-60 та ОСЦ-45. Основні технологічні особливості наплавлення такі ж, як при наплавленні близьких за складом сталей.

Наплавлення часто виконують на основний метал з підвищеним вмістом вуглецю (сталі 45, 50, 50Х) та сірки (35ЛК, 30Л та ін.). В даних випадках щоб уникнути появи кристалізаційних тріщин необхідно використовувати прийоми наплавлення, що забезпечують зменшення частки основного металу.

На мікроструктуру і твердість напавленого металу, особливо у випадках комплексного легування хромом, нікелем і молібденом, впливає швидкість охолодження при температурах розпаду аустеніту. Надмірне збільшення швидкості охолодження може привести до часткового утворення мартенситу у навколошовній зоні і напавленому шарі. Це супроводжується збільшенням твердості і крихкості сплаву та можливості утворення тріщин. Навпаки, надмірне зменшення швидкості охолодження, наприклад, при широкошаровому наплавленні, обумовлює розпад значної частини аустеніту при високих температурах з утворенням перліту. В результаті знижуються твердість і зносостійкість наплавлення. При наплавленні масивних деталей оптимальні властивості напавленого шару досягаються при попередньому підігріві до температури 200–250 °С. При наплавленні невеликих деталей для підігріву досить теплоти дуги.

Наплавлений метал типу В (нелеговані або низьколеговані сталі з вмістом більше 0,4 % С) отримують при дуговому наплавленні посадочних місць та шийок колінчастих валів, а також при відновленні і зміцненні деталей ходової частини гусеничних машин. Типові склади напавленого металу: 45Х5Г, 70Х3МН, 80Х4СГ, 60Х2СМ та ін. Основну складність при наплавленні металу цього типу являє підвищена схильність напавленого шару до утворення кристалізаційних і холодних тріщин. Попередній підігрів до температури 350–400 °С дозволяє в більшості випадків уникнути тріщин. Якщо наплавлений метал підлягає механічній обробці, то виріб відпалюють, при цьому твердість знижується до 20-25 НRC. Після механічної обробки слід проводити загартування до 50–60 НRC.

Сплави 80Х4СГ і 60Х2СМ наплавляють відповідно електродами ЕН-60М та ін., а сплави 45Х5Г і 70Х3МН – з використанням легуючого керамічного флюсу АНК-19 (дріт Св-08А) і металокерамічної стрічки ЛМ-70Х3МН.

Наплавлений метал типу С – аустенітний високо марганцевий – рекомендується для наплавлення деталей, що зазнають абразивного зношування у поєднанні з сильними ударами. Типовим представником даного типу є сталь 110Г13, що містить близько 1,2 % С і 12 % Мп. Залежно від вмісту вуглецю і марганцю, а також швидкості охолодження з високих температур наплавлений метал набуває різну мікроструктуру і властивості.

При швидкому охолодженні з температур вище приблизно 950°С сталі, що містять 0,8–1,6 % С і 12–20 % Мп, набувають стабільну аустенітну структуру і відрізняються високою міцністю і пластичністю. Завдяки високій розчинності вуглецю в  $\gamma$ -твердому розчині



(при великому вмісті марганцю) карбіди відсутні. В такому стані твердість наплавленого металу невелика – 180-220 НВ.

Примітною властивістю такого наплавленого металу є здатність до зміцнення при холодній деформації завдяки появі мартенситу по площинах ковзання. Твердість у деформованій зоні зростає до 550 НВ. Таким чином, зазначені властивості (пластичність серцевини і висока твердість на робочій поверхні) можуть бути реалізовані за умови отримання вихідної аустенітної структури і обов'язкового впливу на робочу поверхню ударів і тисків, здатних викликати пластичне деформування. При відсутності такого навантаження поверхневий шар не володіє будь-якими суттєвими перевагами і зношується подібно звичайній низьковуглецевій сталі.

При повільному охолодженні відбувається розпад аустеніту і виділення карбідо-цементитної сітки по межах зерен. Такий наплавлений метал крихкий, схильний до тріщин і відколів. Виділяються карбіди і при нагріванні. Тому сталі типу С не рекомендуються для роботи при підвищених температурах, якщо потрібно зберегти їх пластичність.

Технологію наплавлення сталей типу С проектують з урахуванням розглянутих вище особливостей. Для того щоб уникнути охрупчування наплавленого шару та навколошовної зони (при наплавленні на сталь 110Г13), процес наплавлення необхідно вести з мінімальним тепловкладенням: малі сили струму і напруги дуги, вузькі валики, підвищена швидкість наплавлення, періодичне припинення процесу і зміна місця наплавлення.

При дотриманні цих умов, а також при наплавленні на масивні деталі швидкість охолодження виявляється достатньою для отримання чистої аустенітної структури.

Широкошарове наплавлення, яке в даному випадку створює несприятливий термічний цикл, найчастіше застосувати не вдається. Для наплавлення використовують штучні електроди і порошковий дріт.

При наплавленні відкритою дугою, при інших рівних умовах, забезпечується більш швидке охолодження валиків, ніж при наплавленні під флюсом. Тому найбільшого поширення набуло наплавлення самозахисним порошковим дротом, наприклад ПП-АН105. Наплавлений метал додатково легований нікелем (3–4 %), при цьому збільшується стійкість аустеніту і з'являється можливість збільшити критичну швидкість охолодження. Частим дефектом є кристалізаційні тріщини, які виникають при підвищеному вмісті фосфору. Наплавлення сталі 110Г13 на вуглецеві сталі застосовується рідше через відколи наплавленого шару.

Наплавлений метал типу D – аустенітний хромонікелевий – має технологічні особливості наплавлення, які багато в чому збігаються з особливостями наплавлення хромонікелевих корозійностійких сталей. При наплавленні на вуглецеву сталь важливо забезпечити мінімальну частку основного металу і мінімальний вміст вуглецю в наплавленому шарі, якщо від нього потрібна підвищена стійкість проти міжкристалічної корозії. Тому значне поширення знайшло широкошарове наплавлення під флюсом електродною стрічкою.

Металокерамічна стрічка, яку виготовляють з чистих по вуглецю порошоків, дозволяє досягти при багатшаровому наплавленні мінімального вмісту вуглецю і високої стійкості шару проти міжкристалічної корозії. Прикладом такої стрічки є металокерамічна стрічка ЛМ-00Х21Н9Г, що застосовується для наплавлення під пемзовідним флюсом АН-26 фланців, патрубків і судин хімічної та нафтохімічної апаратури, а також енергетичних пристроїв.

Наплавлений метал типу E – хромисті сталі – в залежності від вмісту вуглецю та хрому має феритну, напів-феритну або аустенітно-мартенситну мікроструктуру. При вмісті більше 1,0 % С і більше 10 % Cr в структурі з'являється карбідна евтектика (ледебурит). За своєю структурою і властивостями такі сталі наближаються до доевтектичного високохромистого чавуну.

Корозійностійкі хромисті сталі застосовують для наплавлення деталей загально газової і нафтової трубопровідної арматури, що працює при температурах до 400–450 °С, плунжерів пресів і деяких видів штампів, а також для наплавлення камер проточного тракту гідротурбін. Для наплавлення трубопровідної арматури використовують порошковий дріт з внутрішнім захистом ПП-АН-106, а для наплавлення камер гідротурбін – порошковий дріт ПП-АН-138.

Щоб уникнути утворення пор наплавлення необхідно виконувати при напрузі дуги не більше 24-26 В. Обрізні штампи, а також поверхні ущільнювачів арматури наплавляють електродами НЖ-2 (тип ЕН-25Х12-40). При вмісті більше 0,2 % С наплавлений метал схильний до утворення тріщин. Тому застосовують попередній і супутній підігрів до температури 300–350 °С.

Ледебуритні сталі Х12М, Х12ВФ наплавляють під флюсом порошковими дротами ПП-АН-103 і ПП-АН-104. Наплавлення сталей Х12, що містять 1,8-2,0 % С, пов'язане з відомими труднощами внаслідок схильності наплавленого металу до утворення холодних і кристалізаційних тріщин. Якщо холодні тріщини вдається усунути підігрівом деталей до температури 400–550 °С і подальшим уповільненим охолодженням, то цього не завжди можна досягти для боротьби з кристалізаційними тріщинами.

Кристалізаційні тріщини в ледебуритних сталях Х12 виникають внаслідок виділення в процесі кристалізації легкоплавких карбідних евтектик. Тріщини не виникають за умови, якщо наплавлений метал містить 1,5–2,5 % С. При такому вмісті вуглецю кількість евтектики збільшується настільки, що вона вільно переміщається між дендритами аустеніту і може заліковувати тріщини. Таким чином, при наплавленні сталей Х12 на низьковуглецеву сталь необхідно прагнути до мінімальної частки основного металу, в іншому випадку перший шар буде вражений кристалізаційними тріщинами через недостатню кількість карбідної евтектики, здатної заліковувати тріщини.

Твердість наплавленого металу Х12 порівняно невисока і складає 40–44 НРС, що пояснюється наявністю в структурі великої кількості залишкового аустеніту. Твердість можна збільшити високим відпуском при температурі 500–550 °С (до 55–60 НРС). Для можливості механічної обробки наплавлений виріб відпалюють. Відпал заготовок слід виконувати по ізотермічному циклу: нагрівання до температури 870–900 °С, витримка 1,0–2,0 год, охолодження з піччю до температури 700 °С, витримка 5–8 год, подальше охолодження на повітрі. Твердість після такого відпалу становить 25–29 НРС. Загартування виконують на первинну або вторинну твердість з наступним відпуском по режимам для інструментальних штампових сталей типу Х12 [4].

## ВИСНОВКИ

Проаналізовано основні типи наплавленого металу за класифікацією міжнародного інституту зварювання та сфери їх раціонального застосування, можливі дефекти та заходи для їхнього запобігання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Типи наплавлення* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://electricalschool.info/main/electrotehnolog/1364-naplavka-pokrytiji.html>.
2. *Хромисті сталі* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://weldzone.info/technology/materials/49-carbonic/790-xromistye-stali>.
3. *Наплавлення порошковим дротом* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/4206237/page:18/>.
4. *Технологія наплавлення металу різного складу* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.tehnoinfra.ru/jelektricheskajasvarkametallov/81.html>.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2019 р.

УДК 621.81:621.791

Гайворонський О. О., Величко Є. О., Буряк С. С. (ЗВ-2м), Прайс Л. А. (ЗВ-16-1)

## ПОРОШКОВІ ДРОТИ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ТВЕРДОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ, ЩО ПРАЦЮЄ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Розглянуто порошкові дроти для збільшення твердості наплавленого металу деталей, які працюють при підвищених температурах. Виявлено, що досвід створення сталей для штампів гарячого деформування металів, умови роботи яких багато в чому близькі до умов роботи валків гарячої прокатки, вказує на перспективність використання для цих цілей хромовольфрамомолібденових і хромомолібденових сталей. Для зносостійкого твердого наплавлення валків гарячої прокатки найчастіше застосовують порошковий дріт марки ПП-НП-35В9Х3ГСФ. Для наплавлення шару хромомолібденової сталі розроблено порошковий дріт марок ПП-НП-25Х5МСГФ і ПП-АН147, а для хромовольфрамомолібденової - ПП-АН132. Так само, «Пропонований дріт» підходить для наплавлення обох сталей. Термостійкість визначали за кількістю циклів нагрів-охолодження до появи сітки тріщин, помітної неозброєним оком. Опір зношуванню оцінювали за втратою маси  $\Delta M$  наплавленого зразка від зносу тертям металу об метал при температурі  $600^\circ\text{C}$  за 1 годину випробувань.*

*Flux cored wires for increasing the hardness of the welded metal parts, which work at elevated temperatures are considered. It is revealed that the experience of creating steels for hot metal deformation stamps, the operating conditions of which are in many respects close to the working conditions of rollers of hot rolling, indicates the perspectives of the use of chromium-sulfur-molybdenum and chromium-molybdenum steels for these purposes. For wear-resistant hard surfacing of hot rolling rollers, the most commonly used flux cored wire of the grade PP-NP-35V9Cr3MnSiV. For surfacing of a layer of chromium-molybdenum steel, a flux cored wire of grades PP-NP-25Cr5MoSiMnV and PP-AN147 was developed, and for chromium-tungsten-molybdenum - PP-AN132. Similarly, "Proposed Wire" is suitable for surfacing both steels. Thermal stability was determined by the number of heating-cooling cycles before the appearance of a grid of cracks visible to the naked eye. Wear resistance was estimated by the loss of mass  $\Delta M$  of a surfaced sample from the metal rubbing wear at a temperature of  $600^\circ\text{C}$  per 1 hour of testing.*

Наплавлення прокатних валків для відновлення та підвищення стійкості на сьогоднішній день застосовується практично на всіх металургійних підприємствах України. За допомогою сучасних методів механізованого наплавлення можна створити валок з досить в'язкою і міцною серцевиною, яка добре чинить опір механічним навантаженням, а також зносостійкою і термостійкою поверхнею. Використання наплавлення дозволяє істотно збільшити довговічність валків, скоротити їх витрати, збільшити вихід придатного прокату унаслідок поліпшення точності прокатки, знизити витрати на їх виготовлення і знизити собівартість прокату [1].

Ефективність застосування наплавлення прокатних валків багато в чому залежить від того, наскільки вірно обраний склад наплавленого металу. Тому необхідний ретельний аналіз умов роботи валків, характеру і інтенсивності їх зношування. На різних металургійних підприємствах валки навіть однотипних прокатних станів зношуються по-різному і повинні наплавлятися різними матеріалами. Різний знос обумовлений відмінністю технології прокатки, застосуванням різних легуючих матеріалів, часу роботи і температури прокатки [2].

Метою роботи був пошук марки наплавочного матеріалу, який забезпечить отримання високої експлуатаційної стійкості робочої поверхні деталей, які працюють при підвищених температурах типу прокатних валків та штапового інструмента.

Для зносостійкого твердого наплавлення сталевих валків гарячої прокатки найчастіше, хоча і не завжди обгрунтовано, застосовують порошковий дріт марки ПП-НП-35В9Х3ГСФ. Наплавлений метал типу хромовольфрамкової сталі має високу стійкість проти стирання при підвищених температурах, але його термічна витривалість відносно невисока і валки, наплавлені цим дротом, часто виходять з ладу через утворення сітки розпаду і викришування. Тому наплавляти дротом ПП-НП-35В9Х3ГСФ валки, до яких пред'являються вимоги максимальної чистоти поверхні бочки або калібрів валка, недоцільно.

Досвід створення сталей для штампів гарячого деформування металів, умови роботи яких багато в чому близькі до умов роботи валків гарячої прокатки, вказує на перспективність використання для цих цілей хромовольфрамомолібденових (часткова заміна вольфраму молібденом) і хромомолібденових сталей. По теплостійкості такі сталі практично не поступаються хромовольфрамівим, а по опору термічній втомі істотно перевершують їх. Це пов'язано з тим, що молібден сприяє утворенню дрібнозернистої структури, перешкоджає виділенню карбідних частинок по межах зерен і тим самим підвищує в'язкість сталі [2].

Для наплавлення шару хромомолібденової сталі розроблено порошковий дріт марок ПП-Нп-25Х5МСГФ і ПП-АН147, а для хромовольфрамомолібденової - ПП-АН132. Так само, розглянутий дріт «Пропонований», який підходить для наплавлення обох сталей. Властивості металу, наплавленого цими дротами, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Властивості наплавленого металу різних систем легування

Марка порошкового дроту	Термостійкість, кількість циклів	Знос зразка, г	Теплостійкість, °С	Ударна в'язкість, Дж/см <sup>2</sup>	Твердість HRC
ПП-Нп-35В9Х3ГСФ	70	0,12	680	7	51
ПП-Нп-25Х5МСГФ	200	0,35	650	42	46
ПП-АН147	190	0,15	650	35	47
ПП-АН132	130	0,13	670	13	50
ПП-АН204	170	0,21	650	23	45
Пропонована	195	0,16	660	21	56

Термостійкість визначали за кількістю циклів нагрів-охолодження до появи сітки тріщин, помітної неозброєним оком. Опір зношуванню оцінювали за втратою маси  $\Delta M$  наплавленого зразка від зносу тертям металу об метал при температурі 600 °С за 1 годину випробувань. Теплостійкість наплавленого металу  $T_n$  характеризувалася температурою двогодинного відпуску, після якого твердість становила 40 HRC.

Найбільший опір термічній втомі має безвольфрамовий метал, наплавлений дротами ПП-Нп-25Х5МСГФ, ПП-АН-147 і «Пропонований», а найкраще поєднання показників термічної стійкості і опору зношуванню має метал, наплавлений дротом ПП-АН147.

Технологічні випробування пропонованого порошкового дроту показали, що в процесі наплавлення забезпечується стійке горіння дуги, хороше формування валика наплавленого металу, відсутність тріщин і напливів, шлакова корка добре покриває наплавлений валик і видаляється без утруднення.

При наплавленні валків зі складними калібрами виникають великі труднощі з механічною обробкою наплавленого шару через його відносно високу твердість. Для таких валків перспективно застосовувати наплавочні матеріали типу мартенситностаріючих або дисперсійотверднюючих сталей і в першу чергу, легованих і інструментальних мартенситностаріючих сталей. Висока міцність сталей зазначеної групи є сумарним результатом реалізації в основному двох процесів зміцнення - утворення твердого розчину заміщення і зсувного (мартенситного) механізму  $\gamma$ - $\alpha$ -перетворення. Після наплавлення такі сталі мають твердість 28...30 HRC і досить легко обробляються механічно [3]. Після відпусчення твердість зростає до 48...55 HRC і наплавлений метал набуває високих властивостей. Крім того, з'являється можливість проводити наплавлення без попереднього і супутнього підігріву.

Для наплавлення шару мартенситностаріючих сталей системи легування Fe-Ni-Mn-Si-Mo існує порошковий дріт ПП-АН204 [2, 3]. Основні властивості металу, наплавленого цим дротом представлені в табл.1. Крім цього, проаналізована гаряча твердість наплавленого металу в порівнянні з наплавленим металом типу відомих інструментальних сталей.

Нагрівання зразків виконували в спеціальному індукторі в вакуумі, заміри твердості виконували при навантаженні 1 кг і витримці 60 секунд з наведених даних видно, що гаряча твердість мартенситностаріючого наплавленого металу знаходиться на одному рівні з гарячою твердістю хромомолібденової і хромовольфрамової штампової сталі, наплавленої відповідними порошковими дротами [4].

За результатами лабораторних досліджень і дослідно-промислових перевірок, виконаних в останні роки, були уточнені склади наплавленого металу і, відповідно, склади шихти порошкових дротів для наплавлення валків гарячої прокатки.

Результати досліджень і практичний досвід дозволяють рекомендувати розглянути порошкові дротів для наплавлення сталевих прокатних валків наступних станів: обтискних (блюмінг, слябінг) – ПП-Нп-25Х5МСГФ; безперервно-заготовочних - ПП-АН147, ПП-Нп-35В9Х3ГСФ, «Пропонований»; великосортних і рейкобалкового - ПП-Нп-25Х5МСГФ; середньо- і дрібносортових - ПП-Нп-25Х5МСГФ, ПП-АН147, ПП-АН204, «Пропоновану»; дротяних - ПП-Нп-35В9Х3ГСФ, ПП-АН-132; листопрокатних - ПП-АН-132, ПП-Нп-25Х5МСГФ; трубопрокатних - ПП-АН147, ПП-Нп-35В9Х3ГСФ, «Пропоновану». Однак слід підкреслити, що остаточний вибір марки дроту для наплавлення конкретних валків необхідно робити на основі натурних випробувань.

## ВИСНОВКИ

Найбільшу твердість наплавленої поверхні при використанні розглянутих дротів можна отримати при використанні порошкового дроту пропонованого авторами [1, 3] складу, що включає ферохром, нітрид бору, алюміній і феротитан, карбід бору і залізний порошок при наступному співвідношенні компонентів шихти дроту:

ферохром	20,0-26,0%;
нітрид бору	1,0-3,0%;
алюміній	1,0-1,4%;
феротитан	1,1-1,8%;
карбід бору	2,0-5,0%;
залізний порошок	17,0-5,0%;
сталева оболонка	інше.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рябцев И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования / И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев. – Киев : Экотехнология, 1999. – 62 с.
2. Кондратьев И. А. Самозащитная порошковая проволока для наплавки слоя мартенситностареющей стали / И. А. Кондратьев // Автомат. сварка. – 1994. – № 1. – С. 49–51.
3. Кондратьев И. А. Порошковая проволока для наплавки слоя мартенситностареющей стали / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев, Я. П. Черняк // Автомат. сварка. – 2006. – № 4. – С. 50–53.
4. Лившиц Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли. – М. : Машиностроение, 1969. – 186 с.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2019 р.

УДК 621.791.75

Кейс В. С., Адилін О. М. (ЗВ-17М)

## ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ КОНСТРУКЦІЙ

*Оглядом літературних даних показано, що публікації присвячені дослідженню процесів кристалізації металу зварювальному ванни. Найбільш перспективним, технологічним і часто вживаний є спосіб електромагнітного перемішування (ЕМП) зварювальної ванни. Подрібнення структурних складових металу шва можливо при дугового зварювання з впливом знакозмінних магнітних полів через більш швидке переміщення рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину.*

*An overview of literary data shows that the publications are devoted to the study of the processes of crystallization of metal weld baths. The most promising, technological and often used is the method of electromagnetic mixing (EM) of a welding bath. The grinding of structural components of a metal seam is possible at arc welding with the effect of alternating magnetic fields due to faster transfer of liquid metal from the main part of the bath to the tail part thereof.*

Підвищення експлуатаційних характеристик зварених з'єднань із метою забезпечення надійності й довговічності устаткування та інших конструкцій, що експлуатуються в екстремальних умовах, є актуальною задачею. Однак у ряді випадків, у зв'язку з утворенням крупнокристалічної структури швів з підвищеною хімічною неоднорідністю розподілу домішок і легуючих елементів і розвитком у з'єднаннях специфічних дефектів, не завжди вдається забезпечити одержання рівноцінних властивостей з'єднань у порівнянні до металу, що зварюється.

Існують різні способи подрібнення первинної структури: введенням ультразвукових коливань, елементів - модифікаторів (тугоплавких карбідів), створенням вторинних фаз (наприклад, феритної фази в аустенітній), збільшенням швидкості зварювання, механічними вібраціями, створенням пульсацій зварювального струму (накладенням короткочасних додаткових імпульсів струму), а також перемішуванням ванни зовнішніми магнітними полями.

Відомо позитивну дію на подрібнення структури швів введення елементів – модифікаторів в зварювальну ванну. Однак, способи їх введення в багатьох випадках нетехнологічні [1]. Управління кристалізацією металу шва за допомогою ультразвукових коливань також утруднено через відсутність надійних способів введення коливань і великих втрат при передачі енергії.

Найбільш перспективним, технологічним і часто вживаним є спосіб електромагнітного перемішування (ЕМП) зварювальної ванни. Для подрібнення структурних складових в шві використовують поперечні магнітні поля і поздовжні магнітні поля. Однак, як зазначалося, застосування поперечні менш ефективно, ніж ПДМП [2, 3]. Значний внесок в ці дослідження внесли вітчизняні наукові школи, їх дія, зокрема для підвищення якості металу шва і цілком конструкції.

Метою цієї роботи є розгляд особливостей кристалізації зварювального шва для призначення оптимальних параметрів (частоти і індукції) керуючих магнітних полів при дуговому зварюванні.

Зварювальний процес характеризується гетерогенним процесом кристалізації від готових центрів кристалізації у вигляді оплавлених зерен основного металу [4]. Причому певна орієнтування зародків щодо криволінійної форми зварювальної ванни викликає утворення пере важного орієнтування кристалів.



Від лінії сплавляння стовпчасті кристали проростають до центру шва, де можливо гомогенне утворення зародків. Гомогенна кристалізація пов'язана з високими швидкостями затвердіння в центрі шва.

Кристалізація чистих металів відбувається при наявності термічного переохолодження, а сплавів - при наявності концентраційного переохолодження, пов'язаного з різною розчинністю домішок в рідкій і твердій фазі. Наявність цієї зони сильно впливає на розподіл розчиненого елемента в затверділих ділянках сплаву і на схему кристалізації.

Незалежно від способу зварювання і зварювальних матеріалів первинна кристалізація протікає окремими дрібними шарами. Переривчастий характер кристалізації є наслідком виділення прихованої теплоти кристалізації. На шарувату будову також впливає хвилеподібний рух металу, що відкидається тиском дуги в хвостову частину ванни.

При зварюванні сталей, що зазнають алотропічні перетворення, буде протікати вторинна кристалізація (перекристалізація). При поліморфних перетвореннях утворюються нові кордони зерен в межах старих, чим порушується несприятлива будова стовпчастих кристалів.

На характер кристалізації істотно впливає форма зварювальної ванни. Вплив ПРМП дозволяє сприятливо впливати на форму зварювальної ванни [5], а, отже, і на структурну і дендритну неоднорідність. Однак, особливості формування зони проплавлення при зварюванні під флюсом в ПРМП вивчені недостатньо.

Подрібнення структури швів, що досягається при ЕМП, відбувається внаслідок періодичної зміни параметрів зони концентраційного переохолодження, що залежать від градієнта температур у міжфазній поверхні [3]. В результаті підвищення градієнта температур при подачі перегрітого металу неминуче зменшення швидкості росту кристалітів або навіть їх оплавлення. У цих умовах знижується швидкість кристалізації і ступінь концентраційного переохолодження. Після реверсування руху рідкого металу градієнт температур знижується до значень менших, ніж при звичайних умовах зварювання. При цьому миттєві швидкості кристалізації підвищуються в 1,5-10 разів, збільшуючи протяжність концентраційного переохолодження, ніж автори роботи [3] пояснюють ефект подрібнення структури швів. Аналогічної точки зору дотримуються і автори роботи [6].

У поєднанні з наведеними вище механізмом, на думку авторів робіт [7, 8], може мати місце утворення додаткових центрів кристалізації у вигляді відокремлених гілок дендритів. Однак, експериментальних підтверджень такого ефекту не виявлено. А для механічного дроблення зростаючих кристалів дії сил тертя, що виникають при русі рідкого металу, і електромагнітних сил недостатньо.

Однією з головних причиною подрібнення стовпчастої структури називають переривчасте зростання твердої фази, пов'язане з підвищенням миттєвих швидкостей кристалізації. Обумовлюється це подрібненням дендритних осередків і, як наслідок, розгалуженням виступаючих частин твердої фази. А зміни параметрів концентраційного переохолодження доповнює цей механізм.

Для дугового зварювання з накладенням постійного ПРМП характерно поперечне зміщення осі зварювальної ванни і наплавленого валика. А використання нереверсивного коліважно-обертального руху дуги не приводить до зміщення осі валика [9].

ПОМП також сприяють подрібненню структур шва. Механізм подрібнення пов'язаний з низькочастотними коливаннями дуги і металу зварювальної ванни. Причому частота коливання повинна узгоджуватися з протіканням дифузійних процесів, тобто згодом накопичення домішок перед фронтом кристалізації. Розрахунками показано, що оптимальна частота коливається в межах 0,5 ... 100 Гц і залежить від швидкості зварювання і складу сплаву. Автори цієї роботи пов'язують подрібнення структури з уже відомим зміною концентраційного переохолодження при температурних коливаннях рідкої фази. Збільшення зони концентраційного переохолодження підвищує ймовірність утворення додаткових центрів кристалізації

при наявності тугоплавких частинок. Характерно, що при зварюванні дугою, що коливається вздовж шва, структура металу шва більш рівновісна, ніж при зварюванні з коливаннями дуги поперек шва. Повне подавлення дендритів спостерігали при частоті коливань 4 Гц.

Експериментами переконливо показано, що ЕМП позитивно позначається на формування дрібної і дезорієнтованої структури металу шва. Характерне для швів, зварених з ЕМП, підвищення ступеня дезорієнтації становить 30 % [10]. Також збільшується до 35 % ступінь дисперсності первинної структури аустенітних сталей [3]. На ступінь подрібнення суттєво впливає інтервал кристалізації металів. У сплавів з широким інтервалом кристалізації подрібнення спостерігається по всьому периметру січення швів, з вузьким інтервалом кристалізації - по осі шва. Наприклад, ступінь дисперсності первинної структури сплаву ВТ6, за даними роботи [3], становить 14 %.

Не всі режими ЕМП забезпечують утворення дрібної структури. Можливо і – укрупнення кристалітів.

Експериментальним шляхом визначено оптимальні значення параметрів ЕМП для деяких металів і сплавів [9, 10].

Відомі методики по визначенню оптимальних параметрів ЕМП носять фрагментарний характер і засновані на емпіричних залежностях [7].

Спроба автоматичного контролю процесів кристалізації зводиться до визначення за допомогою методики телевізійного вимірювання амплітуди відносних переміщень міжфазного кордону ступеня уповільнення кристалізації в «гарячій» напівперіод і прискорення – в «холодний» напівперіод. Визначаючи, таким чином, миттєві швидкості переміщення фронту затвердіння, можна підібрати оптимальні параметри ЕМП [11].

В існуючих роботах простежується прямий зв'язок між механічними властивостями і структурою швів, зварених з ЕМП. Якщо ці характеристики уявити графічно в залежності від параметрів ЕМП, то вони мають вигляд кривих з максимумом. Причому максимумами будуть відповідати оптимальним параметрам ЕМП.

У загальному випадку подрібнення структури при зварюванні з ЕМП супроводжується збільшення міцнісних властивостей, пластичних характеристик і твердості металу шва. Такий вплив на властивості швів при зварюванні в захисних газах характерно для деяких металів і сплавів [3].

Ступінь подрібнення залежить від індукції і частоти магнітного поля і описується кривою з максимумом. Характеристики міцності металу швів і ударна в'язкість збільшується і механічні властивості металу швів найбільш високі при індукції  $B_z = 20$  мТл і частоті реверсування 10 ... 14 Гц, коли подрібнення зерен максимально.

Підвищення механічних властивостей пояснюють більш рівномірним розподілом легуючих елементів в металі шва, якщо зварювання виконувалася при оптимальних значеннях ЕМП. Однак, при зварюванні в ПРМП низьколегованих і низьковуглецевих сталей в підвищенні механічних властивостей швів велике значення має потоншення і зменшення структурних складових металу шва, їх дезорієнтація.

Як показано в роботі [3], ЕМП, що приводить до перемішування рідкого металу, зменшує протяжність зони концентраційного ущільнення. В результаті періодичного підвищення градієнта температур у міжфазному кордоні інтенсифікується процес дифузії, що забезпечує зниження хімічної неоднорідності в межах кристалітного просторі металу шва і призводить до більш рівномірного розподілу легуючих елементів.

Ступінь ліквідації по перетину шва неоднакова (збільшується від лінії сплавлення до осі шва), і в разі зварювання з ЕМП вона менше. Зниження хімічної неоднорідності пояснюється вирівнюванням швидкостей кристалізації у лінії сплавлення і осі шва.

Підвищення стійкості проти утворення гарячих тріщин в швах, зварених з ЕМП, обумовлено підвищенням пластичних властивостей матеріалу в температурному інтервалі крихкості і підвищення температури його нижньої межі і залежить від параметрів ЕМП [2].

В цьому випадку змінюється схема кристалізації, що забезпечує більш сприятливу орієнтацію стику фронтів кристалізації по відношенню до напрямку розтягуючих зусиль.

В даний час оптимізацію УМП запропоновано виконувати на основі узагальненого параметра, що враховує режим зварювання, геометричні характеристики швів і теплофізичні властивості зварювальних матеріалів [12].

При електромагнітному перемішуванні, через інерційності розплаву частота реверсування його потоків не перевищує 25 ... 30 Гц. Стверджується [13], що для максимального подрібнення структури швів частота ЕМП повинна відповідати власній частоті кристалізації зварюваного матеріалу. За даними роботи [13] при частоті імпульсів рівної 170 ... 220 Гц подрібнення структури відбувалося по всьому перетину металу шва, отриманого при зварюванні алюмінію. В інших випадках в центральній зоні швів зміни структури були менш помітними, ніж поблизу лінії сплавляння.

## ВИСНОВКИ

Для управління кристалізацією металу швів найбільш технологічним є спосіб електромагнітного перемішування зварювальної ванни. Найчастіше застосовуються реверсивні поздовжні магнітні поля. Максимальна ефективність керуючих магнітних полів досягається при їх оптимальних параметрах.

Актуальним є виконання дослідження структуроутворення металу шва при зварюванні (наплавленні) з використанням феромагнітних матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Оборудование для дуговой сварки : справочное пособие / [С. М. Белинский, А. Ф. Гарбуль, В. Г. Гусакковский и др.] ; под ред. В. В. Смирнова. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
2. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке / А. Д. Размышляев. – Мариуполь : ПГТУ, 2000. – 245 с.
3. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. – Киев : Техника, 1983. – 127 с.
4. Лившиц Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 336 с.
5. Размышляев А. Д. Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом / А. Д. Размышляев, В. Р. Маевский // Сварочное производство. – 1996. – № 2. – С. 17–19.
6. Villafuerte J. C. Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds / J. C. Villafuerte, H. W. Kerr // Welding journal. – 1990. – Vol. 69, № 1. – P. 1–13.
7. Абралов М. А. О механизме измельчения первичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии / М. А. Абралов, Р. У. Абдурахманов // Автоматическая сварка. – 1982. – № 2. – С. 18–21.
8. Malinovski-Brodnicka M. Effect of electromagnetic Stirring on GTA welds in austenitic stainless steel. / M. Malinovski-Brodnicka, G. den Ouden, W. J. P. Vink // Welding journal. – 1990. – Vol. 69, № 2. – P. 52–59.
9. Рыжов Р. Н. Особенности формирования и кристаллизации швов при сварке ТИГ с отклонениями дуги магнитным полем / Р. Н. Рыжов, В. С. Семенюк, А. А. Титов // Автоматическая сварка. – 2004. – № 4. – С. 17–20.
10. Сварка плавящимся электродом в защитных газах с электромагнитным перемешиванием / В. П. Изумнов, С. Н. Мальцев, Ю. Д. Коньков [и др.] // Автоматическая сварка. – 1983. – № 3. – С. 41–42, 59
11. Кораб Н. Г. Оценка воздействия управляющего магнитного поля на кристаллизацию при дуговой сварке / Н. Г. Кораб, В. Д. Кузнецов, В. П. Черныш // Автоматическая сварка. – 1990. – № 2. – С. 33–36.
12. Рыжов Р. Н. Выбор оптимальных параметров внешнего электро-магнитного воздействия при дуговых способах сварки / Р. Н. Рыжов, В. Д. Кузнецов // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 27–30.
13. Рыжов Р. Н. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов / Р. Н. Рыжов // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 56–58.

УДК 621.791

Малієв І. В. (ЗВ-17-м)

## ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРИ РЕМОНТНОМУ ЗВАРЮВАННІ

*У статті розглянуто спосіб підвищення продуктивності ремонтного зварювання за допомогою введення залізного порошку до складу покриття електродів. Наведено склад різних залізних порошків. Були проаналізовані технологічні, металургійні і енергетичні чинники, що впливають на ефективність розплавлення електродів. Розглянути залежності коефіцієнтів розплавлення та наплавлення від товщини покриття та кількості в ньому залізного порошку. Вивчено вплив розмірів часток залізного порошку на коефіцієнти розплавлення та наплавлення.*

*The article discusses how to improve the productivity of repair repair for the additional powder powder to the warehouse of the electrodes. A warehouse of refrigerated powders has been brought. Boules for pro-analysis technology, metallurgy and energy officials, which can be used to efficiently distribute electrodes. Rosynost deposits and fouling and deposition of fused goods and coatings in a new powdery powder. Vivcheno pouring rozmirv a piece of powdery powder on some of the rosplav-lennyu and fused.*

В даний час в промисловості спостерігається сильна зношеність технологічного обладнання, оскільки почастишали випадки техногенних аварій і катастроф, тому актуальним є забезпечення безпеки експлуатації зварних конструкцій. Вимоги безпеки зварних конструкцій досягаються різними способами. Стосовно приводів і систем керування - дублюванням, щодо сталевих канатів і швидкозношуваних деталей - періодична їх заміна. Однак є несучі конструкції, до яких застосувати дані методи неможливо. Їх руйнування призводить до людських жертв і матеріальних збитків [1].

Причиною руйнування несучих конструкцій є дефекти в елементах конструкцій, старіння металу, перевантаження в процесі експлуатації і багато іншого. Руйнування зварних з'єднань призводить приблизно до 90 % всіх випадків руйнування машинобудівних конструкцій. В даний час питання підвищення ефективності ремонтного зварювання є актуальним.

Найбільш поширені напрямки підвищення продуктивності ремонтного зварювання наступні:

- удосконалення обладнання для виконання зварювання;
- удосконалення зварювальних матеріалів [2].

Удосконалення зварювальних матеріалів в свою чергу можна досягти за допомогою наступних методів:

- удосконалення порошкових дротів;
- удосконалення різних сумішей захисних газів;
- удосконалення електродів.

Метою даної роботи є аналіз способу підвищення продуктивності ремонтного зварювання.

Найбільш продуктивним способом збільшення продуктивності є додавання в покриття електродів залізного порошку. Кількість залізного порошку в покритті високопродуктивних електродів зазвичай досягає 50 % і більше. Отже, властивості і якість залізного порошку, що є одним з основних компонентів покриття високопродуктивних електродів, істотно впливають на технологічні властивості електродів, механічні властивості наплавленого металу, металургійні реакції в зварювальній ванні і т. і. [1].

Для зварювальних електродів застосовується залізний порошок з насипною вагою близько  $2,4 \text{ г} / \text{см}^3$ , хоча в деяких випадках застосовується і більш важкий порошок з насипною вагою  $2,9 \text{ г} / \text{см}^3$ . В роботі [2] повідомляється, що в США для виробництва електродів із залізним порошком застосовуються відновлені і розпилені залізні порошки.

У лабораторії сплавів АН України були розроблені чотири марки залізного порошку, одержуваного відновленням окалини природним газом. З багатьох марок порошку залізного для зварювального виробництва, в основному застосовуються марки ПЖ1с, ПЖ2с, ПЖ1м, ПЖ2м грануляції [3].

Технічні вимоги до порошоків відповідно до ГОСТ 9849 представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика залізного порошку по ГОСТ 9849 [4].

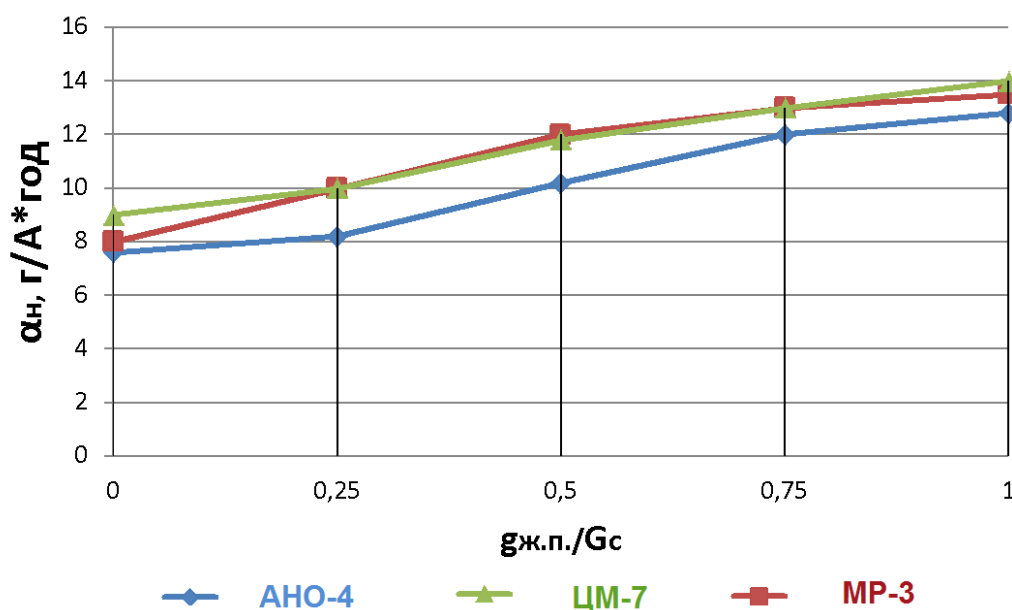
Марка	Група по гранулометричн. складу	Хімічний склад в %							Гранульований склад (в % решта на ситі)	Насипна вага в г/см <sup>3</sup>
		Fe	Не більше							
			C	Si	Mn	S	P	O		
ПЖ1с	Середній	≥98,5	0,08	0,20	0,5	0,02	0,02	0,5	016 - ≤ 10	За вимогою споживача
ПЖ2с	Середній	≥98,0	0,12	0,25	0,5	0,03	0,03	0,5	025 - ≤ 70	
ПЖ1м	Мілкий	≥98,5	0,02	0,20	0,5	0,03	0,03	1,0	016 - ≤ 20	
ПЖ2м	Мілкий	≥98,0	0,03	0,25	0,5	0,03	0,03	1,0	0071-≥ 35	

Розроблено в нашій країні і спосіб отримання залізного порошку розпиленням [3]. Розпилений залізний порошок має наступний хімічний склад: 0,14-0,20 % С; 0,8-1,0 % О<sub>2</sub>; 98-99 % Fe<sub>заг.</sub> Слід зазначити, що останній спосіб практично не знайшов виробничого застосування в нашій країні, очевидно, через відсутність будь-яких істотних переваг в порівнянні з більш доступним способом відновлення.

За характером впливу на ефективність розплавлення електродів різні фактори можна умовно згрупувати таким чином [5]:

1. Технологічні – товщина покриття, кількість залізного порошку в ньому і ін.;
2. Металургійні – вплив окремих компонентів покриття, хімічного складу дроту т. д.;
3. Енергетичні – сила струму і напруга, рід струму.

На рис. 1 показана зміна коефіцієнта наплавлення  $\alpha_n$  в залежності від ставлення  $g_{ж.п} / G_c$  для трьох промислових марок електродів ЦМ-7, МР-3 і АНО-4 діаметром 5 мм при зварюванні на змінному струмі при силі струму 300 А (тут  $g_{ж.п}$  – вага порошку в покритті, а  $G_c$  – вага обмазаної частини стрижня електроду).

Рис. 1. Залежність коефіцієнта наплавлення від відношення  $g_{ж.п.}/G_c$

Криві на рис. 1 показують, що при відносно  $гж.п / Gc = 1$  (що відповідає 80...85 % залізного порошку в покритті) коефіцієнт наплавлення досягає значень близько 14 г/А·год, що може істотно підвищити продуктивність процесу розплавлення електродів.

Відомо [6], що наявність більше 50 % залізного порошку в покритті різних типів зварювальних електродів є оптимальною кількістю. Очевидно лише, що не всі покриття однако-вим чином «реагують» на введення залізного порошку і не обов'язково вводити граничні кількості порошку для отримання максимальної продуктивності. Товщина покриття (без залізного порошку) певним чином знижує продуктивність розплавлення електрода [7]. Аналогічних даних про вплив товщини покриття, що містить залізний порошок, в літературі немає.

Для досліджень використовувалися металеві електроди для ручного дугового зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей, що виготовляються способом опресування. Для виготовлення дослідних партій використовувався прес промислового виготовлення. Стрижні електродів виготовляли зі сталевий зварювального дроту марки Св-08А за ГОСТ 2246 діаметром 5 і 6 мм.

Застосовувалося покриття електродів основного виду, основу якого становить мінерал – мармур·CaCO<sub>3</sub>, за ГОСТ 4416. Як розкислювача металу шва застосовувався феромарганець марки ФМн 1,0 за ГОСТ 4755 та феросиліцій марки Сі-45 за ГОСТ 1415. В якості наповнювача використовували залізний порошок марки ПЖ1 за ГОСТ 9849. Склади покриттів досліджуваних електродів з залізним порошком наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Склади покриттів досліджуваних електродів з залізним порошком, у %.

Найменування компонентів	Варіанти сполук покриття			
	1	2	3	4
Мармур	33,5	22,5	17	7,1
Плавиківий шпат	16,5	11,5	8,5	3,4
Феросиліцій	6,6	6,6	4	4
Рутил	4	5	2	2
Поташ	2	2	2	2
Залізний порошок	35	50	65	80
Феромарганець	2,4	2,4	1,5	1,5

В ході виконання експериментів з'ясували продуктивність розплавлення досліджених електродів з залізним порошком. В результаті попередніх досліджень було отримано кілька варіантів досліджених електродів з основним покриттям, що володіють задовільними зварювально-технологічними властивостями, що послужили основою для подальших досліджень.

При вивченні різних металургійних систем було встановлено, що продуктивність розплавлення електрода в значній мірі залежить від співвідношення основних компонентів в покритті. Було визначено, що наявність в покриттях однойменних компонентів, але взятих в різних співвідношеннях, не визначає однакові зварювально-технологічні властивості електродів.

При утриманні 35 % залізного порошку в покритті помітне підвищення коефіцієнта наплавлення і розплавлення спостерігається лише при відносно  $Gж.п. / Gст$  більше 0,35. Швидкість плавлення і коефіцієнт розплавлення стержня зменшуються в міру збільшення відносини  $Gж.п. / Gст$ , або товщини покриття. Аналогічні залежності спостерігаються і для варіантів з вмістом залізного порошку відповідно 50; 65 і 80 %. Зі збільшенням відносини  $Gж.п. / Gст$ , або товщини покриття спостерігається з одного боку, закономірне зниження швидкості плавлення електрода і коефіцієнта розплавлення стержня, а з іншого - підвищення коефіцієнтів наплавлення і розплавлення електрода.

Це очевидно пов'язано з тим, що при даних кількостях залізного порошку існує як би «критична» товщина покриття, менше якої коефіцієнти наплавлення і розплавлення не підвищують, незважаючи на збільшення абсолютних кількостей залізного порошку. Далі



з підвищенням товщини покриття утворюється втулка як би акумулює енергію, що виділяється на торці електрода. При цьому швидкість плавлення електрода і коефіцієнт розплавлення стержня майже не змінюються в порівнянні з електродами з критичною товщиною покриття, а коефіцієнт наплавлення і розплавлення електрода починають різко підвищуватися.

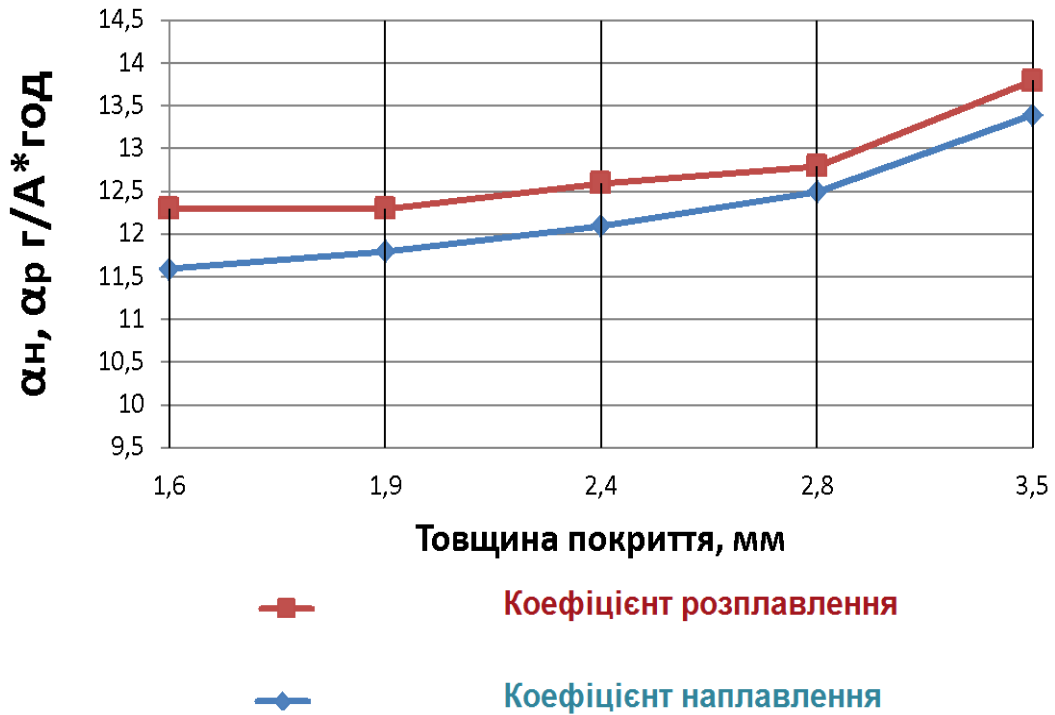


Рис. 2. Зміна характеристик плавлення електродів з кількістю залізного порошку 65 %

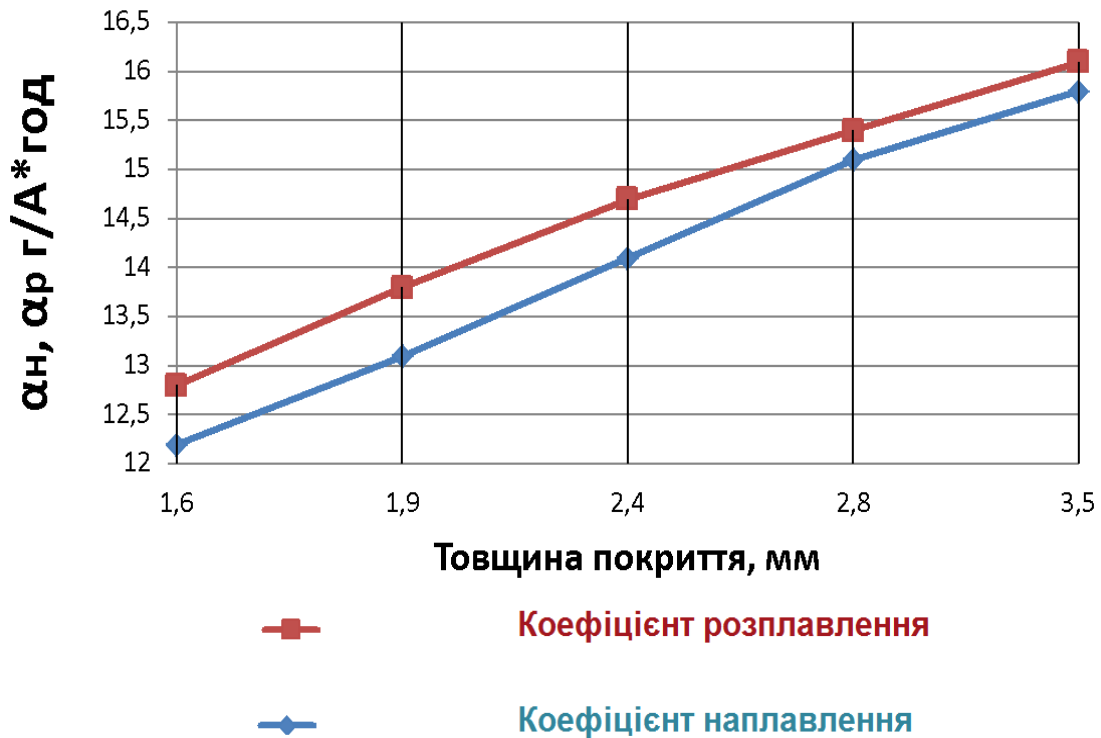


Рис. 3. Зміна характеристик плавлення електродів з кількістю залізного порошку 80 %

Коефіцієнти плавлення стрижня і розплавлення електрода з покриттям, що містить 65 і 80 % залізного порошку, плавно змінюються зі збільшенням товщини покриття; при цьому швидкість плавлення електрода також змінюється без різких коливань. Можна вважати, що при наявності в покритті більше 50 % залізного порошку різко змінюються його теплофізичні властивості, в зв'язку з чим інакше, ніж в розглянутих вище двох випадках, змінюються характеристики плавлення електродів.

Максимальне значення коефіцієнтів наплавлення і розплавлення отримані при 80 % залізного порошку в покритті близько 15 г/А·год, але при цьому зварювально-технологічні властивості електродів помітно погіршилися. Ці дослідження показали, що тільки за рахунок введення залізного порошку в покриття можна отримати високопродуктивні електроди з коефіцієнтом наплавлення вище 14...15 г/А·год.

У той же час відомо, що зерновий склад залізного порошку так само робить істотний вплив на характеристики плавлення електродів. Зі збільшенням розміру часток залізного порошку помітно зростають швидкість плавлення, а також підвищуються коефіцієнти наплавлення і розплавлення електрода.

Введення залізного порошку з розмірами частинок 0,45...0,63 мм дозволило підвищити коефіцієнт наплавлення до 17 г/А·год.

## ВИСНОВКИ

Показано, що теплофізичні властивості покриття залежать не тільки від складу або матеріалів його складових, а й від розміру часток цих матеріалів.

Доведено, що чим менше розмір часток порошків, з яких складається покриття, а отже чим більше їх поверхня, тим інтенсивніше відбувається відвід тепла від стрижня і тим повільніше плавиться електрод. При цьому різниця в коефіцієнті розплавлення в залежності від розміру часток може досягати 8–10 %.

На практиці важко використовувати встановлену залежність, оскільки неможливо отримати тільки великий порошок, без втрат дрібного. Крім того, виникли б труднощі технологічного порядку в зв'язку з погіршенням опресовуваності обмазувальної маси.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Явдоцин И. Р. Новые электроды ИЭС им. Е.О. Патона для сварки конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей // Сборник докладов 1-ой Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ. – Краснодар, 22-26 июня 1998 г. – М., 1998. – С. 135–137.
2. Алов А. А. Электроды для дуговой сварки и наплавки / А. А. Алов. – М. : Машигиз, 1947. – 86 с.
3. А. с. 880673 СССР, МКИ В 23 К 35/365. Состав электродного покрытия / О. С. Каковкин, В. М. Хананов, Ю. В. Сванидзе, А. Б. Геллер, Е. Г. Старченко, С. Н. Вивсик, А. Г. Винников, В. А. Шелободкин, В. Е. Аюян, А. Е. Марченко (СССР). – № 2787451/25-27 ; заявлено 10.07.79; опубл. 15.11.81, Бюл. № 42.
4. ГОСТ 9849-86. Порошок железный. Технические условия.
5. А. с. 887100 СССР, МКИ В 23 К 35/365. Состав электродного покрытия / Е. А. Танкович, В. М. Иоффе, Ю. П. Сваринский (СССР). – № 2914513/25-27; заявлено 21.04.80; опубл. 07.12.81, Бюл. № 45.
6. Кочкин В. И. Производство сварочных электродов на постсоветском пространстве / В. И. Кочкин, З. А. Сидлин. – М. : Ротекс, 2002. – 8 с.
7. Алов А. А. Электроды для дуговой сварки и наплавки / А. А. Алов. – М. : Машигиз, 1947. – 86 с.

Стаття надійшла до редакції 26.12.2018 р.

УДК 621.81:621.791

Мельников І. І., Пашетнев А. Г. (ЗВ-19м)

## ПОРОШКОВІ ДРОТИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ТА ШЛАКОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ, ЩО ПРАЦЮЄ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*У статті розглянуті причини утворення неметалевих та шлакових включень в наплавленому металі, крім того проводяться дослідження впливу якості стрічки оболонки порошкового дроту на утримання шлакових і неметалевих включень в металі шва. Приводиться вплив елементів шихти порошкового дроту на працю наплавленого слою при підвищених температурах, а також приводиться склад шихти порошкового дроту, що забезпечує високі результати праці наплавленого металу при підвищених температурах.*

*In the article the reasons of the formation of nonmetallic and slag inclusions in the weld metal are considered, in addition, studies of the influence of the quality of the tape of the shell of the powder wire on the maintenance of the slag and nonmetallic inclusions in the metal of the seam are considered. The influence of the elements of the powder wire charge on the work of the deposited layer at elevated temperatures is given, as well as the composition of the charge of the powder wire is provided, which ensures high results of the work of the welded metal at elevated temperatures.*

Однією з основних проблем при зварюванні порошковим дротом є неметалеві і шлакові включення в зварному шві.

Зварювання в вуглекислому газі дротом суцільного перетину поряд з відомими перевагами, котрі зумовили її масове застосування, має ряд недоліків. Найважливіші з них: підвищене розбризування електродного металу і посередній зовнішній вигляд швів при зварюванні дротом діаметром 1,6–2,0 мм в діапазоні найбільш уживаних зварювальних струмів (340–400 А). У ряді випадків спостерігається недостатня пластичність металу шва.

Застосування порошкового дроту дозволяє усунути ці недоліки. Введення в сердечник дроту шлакоутворюючих складових і розкислювачів дозволяє добре розкислювати метал зварювальної ванни, інтенсивно обробити його шлаком і знизити вміст в ньому газів і неметалевих включень. При цьому істотно підвищується пластичність металу швів.

Причиною появи шлакових включень при зварюванні порошковим дротом всіх марок є неповне очищення від шлаку попереднього шару шва або затікання шлаку попереду дуги. Для запобігання появи шлакових включень рекомендується ретельно видаляти шлак, встановлювати задані параметри режиму зварювання відповідно до рекомендацій і виконувати вказівки з техніки зварювання.

Щоб зрозуміти як боротися з неметалевими включеннями розберемося в природі їх утворення. При зварюванні порошковим дротом зварювальний струм проходить переважно по сталевій оболонці порошкового дроту і активна пляма дуги займає не весь переріз дроту, а знаходиться на оболонці або краплі розплавленого металу. При цьому активна пляма і стовп дуги хаотично зі змінною швидкістю, переміщається навколо наповнювача, який плавиться за рахунок випромінювання дуги і конвективного теплообміну з розплавленим металом і розігрітими газами [1,2]. Плавлення дроту відбувається з утворенням виступу сердечника. Виступ сердечника періодично обсипається в зварювальну ванну, тим самим забруднюючи її, бо не весь шлак встигає спливати на поверхню розплавленого металу через високу швидкість його кристалізації. Через це з'являється хімічна неоднорідність металу шва і зростає кількість неметалевих включень, погіршуються властивості металу шва. Крім того, неметалеві включення сприяють окрихчуванню сталі, оскільки утворення тріщин поблизу включення знижує роботу її зародження. Чим більше неметалеві включення і нерівномірний їх розподіл, тим нижче якість поверхні. Неметалеві включення, нерівномірно розподілені в поверхневих шарах, підвищують схильність наплавленого металу до термічної втоми. Неметалеві включення всіх типів, перебуваючи в поверхневому шарі, впливають на формування структури наплавленого шару, викликаючи його структурну неоднорідність.

Проблема нерівномірності плавлення осердя і оболонки порошкового дроту вирішується за допомогою введення в шихту металевих порошків, застосуванням екзотермічних сумішей, розробкою складних перетинів оболонки порошкового дроту та ін. [5]. Аналіз літературних даних показав, що питання впливу складу стрічки використовуваної для оболонки порошкового дроту на якість наплавлення вивчені недостатньо. Для зварювання і наплавлення легованих сталей застосовують порошкові дроти з оболонкою з високолегованої стрічки, але в цьому випадку ускладнено її волочіння через швидкий наклеп поверхні оболонки [3, 5].

Метою роботи є визначити основні фактори, що впливають на зменшення неметалевих та шлакових включень в наплавленому металі, що працює при підвищених температурах і дати рекомендації по вибору оптимального матеріалу.

Частково завдання управління якістю металу зварного шва, зокрема зниження неметалічних включень в наплавленого металу, може вирішуватися вибором матеріалу оболонки порошкового дроту.

Актуальне завдання зниження вмісту шлакових і неметалевих включень в металі наплавлення або шва можна досягти за рахунок керування процесом видалення продуктів розкислення і сульфуратії, а також запобігання потрапляння домішок і екзогенних включень, що актуально при обмеженому часі існування зварювальної ванни [2]. Проведені авторами [3] дослідження вмісту неметалевих включень в стрічках з різних марок сталей показали (рис. 1), що кількість і середній розмір неметалевих включень в стрічці зменшуються зі збільшенням її ступеня розкислення. З метою забезпечення порівнянності результатів досліджувалася стрічка одного розміру 0,5x15 мм [3]. Оцінку забрудненості неметалевими включеннями металу стрічок проводили на зразках за допомогою металографічного мікроскопа «Неофот-30» при збільшенні x250, рівень забрудненості неметалевими включеннями визначали методом порівняння з еталонними шкалами [3].

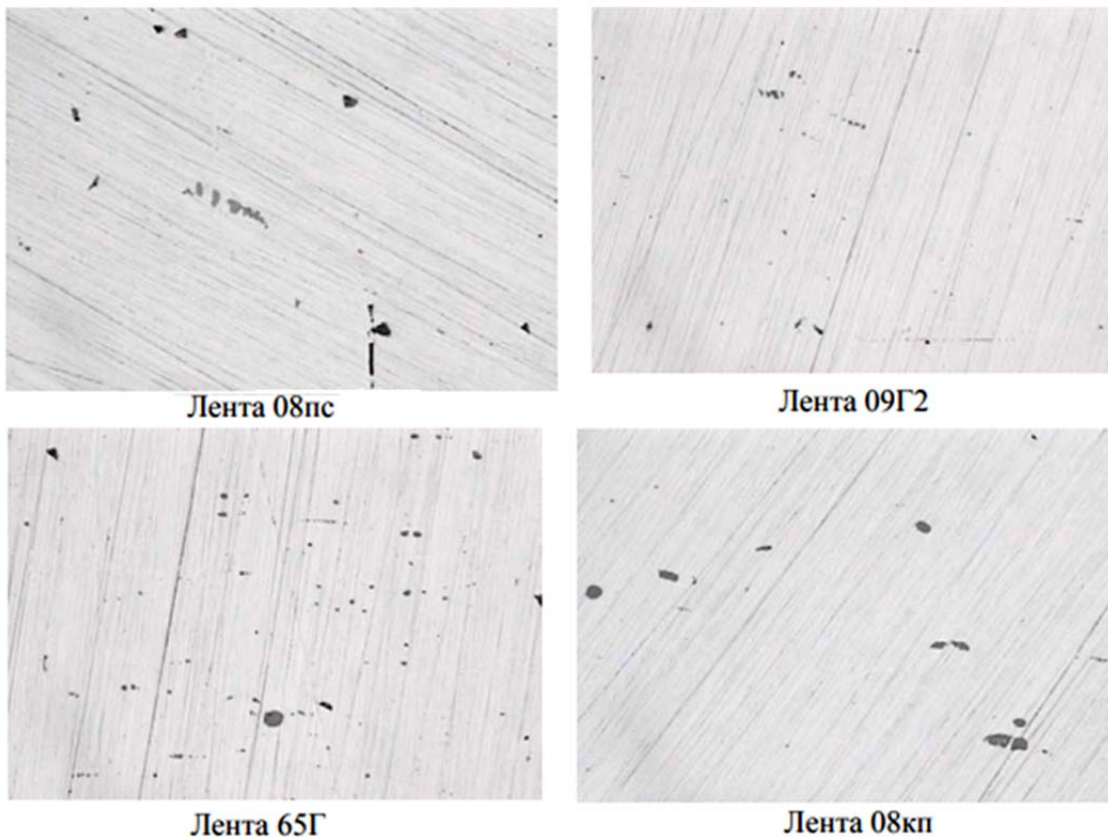


Рис. 1. Характерний вид неметалевих включень в металі оболонок порошкових дротів зі стрічок (x 250) [3]

Загальна забрудненість металу оболонки тим менше, чим більше ступінь її розкислення, що визначається кількістю хімічних елементів розкислювачів, введених до складу стрічки

оболонки [3]. У разі дослідження оболонок з сталей 08кп, 08пс, 65Г, 09Г2 найменшу забрудненість має стрічка зі сталі 09Г2 [3]. Особливістю конструкції порошкового дроту є прокладений по довжині в центрі поперечного перерізу порошкового дроту суцільний дріт Св-08Г2С. З точки зору нерівномірності плавлення порошкового дроту при зварюванні це позитивно вплине на цей процес, а відповідно і на утримання в металі шва неметалічних включень [3].

Передбачається, що метал шва матиме таке ж легування як і складові дроту (оболонка і внутрішній дріт), так як складові шихти забезпечать хороше розкислення, запобігши таким чином угар легуючих елементів. Хімічний склад внутрішнього дроту і оболонки практично однаковий. За рахунок плавлення шихти передбачається, що електродна крапля буде формуватися симетрично по центру дроту, забезпечуючи таким чином хороше формування шва, зниження прокидання шихти і зменшене розбризкування [3].

В якості шихти порошкового дроту для забезпечення праці при високих температурах використовуються наступні компоненти: хром, молібден, нікель, марганець, феросиліцій, ферованадій, титан, алюміній, карбід бору, диборід титану, диборід цирконія, кремнефтористий натрій, залізний порошок. Введення до складу порошкового дроту хрому в кількості 15–18 % є оптимальним, оскільки, по-перше, при такій його концентрації істотно підвищується разгаростійкість і жаростійкість, так як йде інтенсивне утворення на поверхні наплавленого металу міцної окисної плівки, що зменшує процес окалиноутворення і перешкоджає налипанню пресованого і прокочуваного металу, а по-друге, хром знижує межу розчинності молібдену, титану та алюмінію в твердому розчині. При концентрації хрому нижче 15 % знижується кількість карбідів хрому, які беруть участь в процесі твердіння. При концентрації хрому понад 18 % відбувається різке зниження пластичності.

Наявність в порошковому дроті нікелю в кількості 2–6 % в комплексі з заявленою кількістю хрому забезпечує отримання аустенітно-мартенситної структури із залишковим аустенітом до 25 % в наплавленому металі, що при нинішній кількості карбідних, карбоборидних і інтерметалідних фаз створює сприятливі умови протікання пластичної деформації і тим самим надає матриці високу пластичність і ударну в'язкість, різко підвищує стійкість сплаву до ударних навантажень. Нікель так само безпосередньо бере участь в утворенні зміцнюючих фаз з алюмінієм і титаном і, крім того, посилює ефект старіння за рахунок зменшення межі розчинності молібдену в твердому розчині порошковий дріт [5].

Молібден підвищує теплостійкість і міцність наплавленого металу. При старінні утворює зміцнюючу фазу  $Fe_2Mo$ , яка переважно виділяється на дислокаціях в тілі зерна, не знижуючи пластичних властивостей сталі після старіння.

Кремній, як і хром, сприяє збільшенню окалиностійкості сталі. Разом з цим його присутність в сталях, легованих молібденом, титаном і алюмінієм, збільшує ступінь зміцнення наплавленого металу при старінні. Кремній суттєво знижує межу розчинності молібдену в твердому розчині порошкового дроту, збільшуючи кількість і дисперсність зміцнюючої фази при старінні, оскільки введення 1 % кремнію рівносильне додатковому введенню 2–3 % молібдену. При вмісті кремнію в наплавленому металі до 1,5 % не відбувається зниження його пластичних властивостей.

Ванадій є хорошим модифікатором, що дозволяє значно подрібнити зерно, попереджає зростання великих стовпчастих кристалів, в результаті чого усувається можливість утворення «гарячих» тріщин і поліпшуються фізико-механічні властивості наплавленого металу.

Наявність в складі шихти титану і алюмінію дозволяє зміцнити наплавлений метал в процесі старіння інтерметалідними фазами типу  $Ni_3Ti$  і  $Ni_3Al$ . Крім того, алюміній є енергійним нітридоутворюючим елементом, здатним зв'язувати азот в міцні з'єднання  $AlN$  і знижувати тим самим пористість наплавленого металу.

Присутність карбіду бору, диборидів титану і цирконію в порошковому дроті веде, з одного боку, до виділення в матриці наплавленого металу карбоборидної евтектики, яка, розташовуючись у вигляді каркаса, сприймає частину енергії ударів і розосередити її на

велику площу поверхні, що збільшує стійкість металу до ударних навантажень і перешкоджає «зерномежевої повзучості». З іншого боку, титан, цирконій, а також хром, молібден і ванадій утворюють дрібнодисперсні важкорозчинні високоміцні багатокомпонентні карборидні фази, що сприяють збільшенню термічної стійкості, разгаростійкості і гарячої твердості, що підвищує зносостійкість наплавленого металу при високих температурах [5].

Наявність кремніфтористого натрію в кількості 0,5–1,0 % в складі порошкового дроту дозволяє зменшити небезпеку утворення пір в наплавленому металі.

Залізний порошок необхідний для отримання розрахункового коефіцієнта заповнення порошкового дроту, що забезпечує отримання металу необхідного хімічного складу. Також залізний порошок сприяє рівномірності плавлення шихти і оболонки, що покращує зварювально-технологічні властивості порошкового дроту.

Виходячи з усього цього приймаємо склад шихти наступним, мас. %: вуглець -  $0,05 \div 0,1$ ; марганець -  $0,8 \div 1,2$ ; нікель -  $7,5 \div 8,5$ ; фероїтрий -  $0,05 \div 5-0,1$ ; феромолібден -  $12 \div 13$ ; ферованадій -  $0,8 \div 1,2$ ; залізний порошок -  $0,3 \div 5,25$ ; хром -  $6 \div 7$ ; феросиліцій -  $1,8 \div 2,5$ ; феротитан -  $0,8 \div 1,2$ ; стальна оболонка – решта.

Поєднання високих значень твердості і ударної в'язкості мартенситно-аустенітної матриці обумовлено специфічною морфологією і розмірами аустенітної фази, яка присутня в структурі наплавленого металу у вигляді дисперсних різноорієнтованих прошарків між рейками мартенситу. Прошарку аустеніту з одного боку є «м'якою» упрочнюючою фазою, а з іншого боку сприяють релаксації локальних напружень, відповідальних за освіту тендітних тріщин, підвищуючи тим самим ударну в'язкість наплавленого металу.

Метал, отриманий запропонованої порошковим дротом, має високу твердість при хорошій пластичності, зносостійкість і високим опором до термічної втоми, що дозволяє значно підвищити стійкість пресового інструменту гарячого деформування в умовах тривалого температурно-силового впливу.

## ВИСНОВКИ

Показані основні фактори, що впливають на зменшення неметалевих та шлакових включень в наплавленому металі, що працює при підвищених температурах і дати рекомендації по вибору оптимального матеріалу. Наведена конструкція порошкового дроту, яка дозволить знизити вміст неметалевих включень в наплавленого металу. Крім того наведений склад шихти, що забезпечує високу твердість при добрій пластичності, зносостійкості і високому опором до термічної втоми.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Деев Г. Ф. Дефекты сварных швов / Г. Ф. Деев, И. Р. Пацкевич. – К. : Наукова думка, 1984. – 206 с.
2. Мойсов Л. П. Методы прогнозирования технологических возможностей порошковых проволок / Л. П. Мойсов // Сварочное производство. – 2005. – № 8. – С. 26–29.
3. Бойко И. А. Разработка полиметаллической порошковой проволоки для сварки низколегированной стали / И. А. Бойко // Студентський вісник ДДМА : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ, ДДМА, 2006. – С. 78–81.
4. Влияние титана, введенного в покрытие электродов УОНИ 13/45, на микроструктуру и механические свойства металла шва / И. К. Походня, А. О. Корсун и др. // Автоматическая сварка. – 1986. – № 12. – С. 1–7.
5. Петров Г. Л. Сварочные материалы / Г. Л. Петров. – Л. : Машиностроение, 1973. – С. 111–116. – Режим доступа: [http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009\\_1/article/09KSGUSW.pdf](http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2009_1/article/09KSGUSW.pdf).
7. Порошковые проволоки для наплавки валков горячей прокатки.

УДК 621.791.75

Пустовіт Р. М., Прокопенко М. А., Сичков А. В. (ЗВ-18м)

## ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*В статті вивчено можливість формування складу порошкового дроту методом статистичного моделювання. Розроблено статистичну модель для розрахунку з достатньою точністю хімічного складу порошкового дроту. Як відомо, існують цілі напрямки класичних досліджень, присвячених статистичному моделюванню формування складу порошкового дроту [1–3]. В даний час з розвитком інформаційних технологій характеристики макроструктури порошкового середовища можуть задовільно оцінюватися статистичним моделюванням з використанням імовірнісно-геометричних систем моно- і полідисперсних частинок [4–7]. Як показують роботи в цьому напрямку, статистичне моделювання якісно відображає основні закономірності формування макроструктури порошкових матеріалів в технологічних процесах наплавлення.*

*The article examines the possibility of forming the composition of the powder wire by statistical modeling. A statistical model has been developed for the calculation with sufficient accuracy of the chemical composition of cored wire. As is known, there are entire areas of classical studies devoted to statistical modeling of the formation of the composition of flux-cored wire [1–3]. Currently, with the development of information technologies, the characteristics of the macrostructure of the powder medium can be satisfactorily evaluated by statistical modeling using probability-geometric systems of mono- and polydisperse particles [4–7]. As work in this direction shows, statistical modeling qualitatively reflects the main regularities in the formation of the macrostructure of powder materials in technological processes of surfacing.*

Найважливішою умовою забезпечення експлуатаційних характеристик наплавлених виробів є дотримання вимог щодо хімічного складу наплавленого металу, якість якого істотно залежить від композиції сердечника порошкового дроту. Тому однією з основних задач, розв'язуваних при створенні самозахисного порошкового дроту, є правильний розрахунок складу дроту за заданим хімічним складом наплавленого металу.

Метою роботи є статистичне моделювання складу порошкового дроту, яка забезпечує необхідний склад наплавленої поверхні. Для досягнення зазначеної мети вирішувалися наступні завдання:

- досліджувався хімічний склад наплавленого металу;
- проводився розрахунок хімічного складу наплавленого металу з урахуванням часток участі основного і наплавленого металу, металу попереднього валика в подальшому і відносного кроку наплавлення

При наплавленні малого числа слоїв для розрахунку складу кожного наплавленого шару необхідний частки участі основного металу,  $(n-1)$ -го шару в  $n$ -му металі попереднього валика в подальшому. Концентрацію елемента в першому шарі після стабілізації складу, тобто наплавлення трьох - п'яти валиків, можна визначити наступною залежністю:

$$Me' = \frac{1}{1 - \delta} [Me_0 \varphi_1 + Me_H (1 - \varphi_1 - \delta)] \quad (1)$$

де  $Me'$ ,  $Me_0$ ,  $Me_H$  - концентрація елемента в першому шарі, основного і наплавленого металу;  $\delta$  - частка участі металу попереднього валика в подальшому;  $\varphi_1$ ,  $1 - \varphi_1 - \delta$  - частки участі основного і наплавленого металу другого і подальшого валиків.

Для визначення концентрації елемента в  $n$ -ом шарі перетворимо формулу (1) наступним чином:

$$Me' = \frac{Me_0 \varphi_1}{1 - \delta} - \frac{Me_H \varphi_1}{1 - \delta} + \frac{Me_H (1 - \varphi_1)}{1 - \delta} = Me_H - (Me_H - Me_0) - \frac{\varphi_1}{1 - \delta}. \quad (2)$$



З формули (2) визначимо зміст елемента в послідовних шарах, якщо замість концентрації елемента в основному металі  $Me_0$  підставити зміст елемента в попередньому шарі (за умови сталості  $\varphi l$  і  $\delta$ ).

$$Me^2 = Me_H - (Me_H - Me') \frac{\varphi_1}{1 - \delta} = Me_H - (Me_H - Me_0) \left( \frac{\varphi_1}{1 - \delta} \right)^2.$$

Тоді концентрація елемента в  $n$ -м шарі наплавлення буде дорівнює:

$$Me^n = Me_H - (Me_H - Me_0) \left( \frac{\varphi_1}{1 - \delta} \right)^n. \quad (3)$$

Таким чином, для розрахунку вмісту елемента в  $n$ -м шарі наплавлення необхідно знати його концентрацію в основному і наплавленого металу і частки участі основного металу в металі другого і наступних валиків  $\varphi l$  і частки участі металу попереднього валика можна прийняти у вигляді параболи з рівнянням виду:

$$y = ax^2 + h_1,$$

де  $h_1$  – висота посилення.

зі співвідношенням  $a \left( \frac{b}{2} \right)^2 + h_1 = 0$  знаходимо

$$a = -4h_1 / b^2.$$

Отже, форму перетину наплавленого валика можна описати рівнянням:

$$y = -\frac{4h_1 x^2}{b^2 + h_1} \quad (4)$$

Знайдемо площу перерізу наплавленого валика  $h_2$  і рівнянням виду

$$F_H = 2 \int_0^{b/2} y dx = 2 \int_0^{b/2} \left( h_1 - \frac{4h_1}{b^2} x^2 \right) dx = \frac{2}{3} h_1 b.$$

Форму перетину проплавлення основного металу можна прийняти у вигляді полуеліпси з підлозі осями  $b/2$  і  $h_2$  і рівнянням виду

$$\frac{x^2}{(b/2)^2} + \frac{y^2}{h_2^2} = 1. \quad (5)$$

Звідки виразимо  $y$  та запишемо формулу площі перерізу провару металу

$$F_{np} = 2 \int_0^{b/2} y dx = \frac{4h_2}{b} \int_0^{b/2} \sqrt{(b/2)^2 - x^2} dx = \frac{4h_2}{b} \cdot \frac{b^2}{8} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{4} h_2 b.$$

Отже, площа перетину шару

$$F = F_H + F_{np} = \left( \frac{2}{3} h_1 + \frac{\pi}{4} h_2 \right) b. \quad (6)$$

Знайдемо площу криволінійного трикутника. маємо

$$F_{AMB} = 2 \int_0^{b/2} \left( -\frac{4h_1}{b^2} x^2 + h_1 \right) dx = \frac{2}{3} h_1 b - h_1 b \left[ \frac{H}{b} - \frac{1}{3} \left( \frac{H}{b} \right)^3 \right].$$

Аналогічно знаходимо площа криволінійного трикутника

$$F_{AKB} = 2 \int_0^{b/2} \frac{2h_2}{b} \sqrt{\left( \frac{b}{2} \right)^2 - x^2} dx = \frac{\pi h_2 b}{4} - \frac{h_2 b}{2} \arcsin \frac{H}{b} - \frac{h_2 H}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{H}{b} \right)^2}.$$

Тоді площа криволінійного чотирикутника становить

$$F_{AMBK} = \frac{2}{3} h_1 b - h_1 b \left[ \frac{H}{b} - \frac{1}{3} \left( \frac{H}{b} \right)^3 \right] + \frac{\pi h_2 b}{4} - \frac{h_2 b}{2} \arcsin \frac{H}{b} - \frac{h_2 H}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{H}{b} \right)^2}. \quad (7)$$

Позначаючи відносний крок наплавлення  $H/b$  через  $\alpha$ , отримаємо

$$\delta = \frac{F_{AMBK}}{F} = \left[ \frac{2}{3} h_1 + \frac{\pi}{4} h_2 - h_1 \left( \alpha - \frac{\alpha^3}{3} \right) - \frac{h_2}{2} \arcsin \alpha - \frac{h_2}{2} \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right] / \left( \frac{2}{3} h_1 + \frac{\pi}{4} h_2 \right).$$

Вводячи коефіцієнт відносини висоти посилення до голубинім проплавлення  $h_2$  ( $\beta = h_1 / h_2$ ) матимемо:

$$\delta = \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \beta - \beta \left( \alpha - \frac{\alpha^3}{3} \right) - \frac{h_2}{2} \arcsin \alpha - \frac{1}{2} \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right] / \left( \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \beta \right) \quad (8)$$

Таким чином, частка участі метала попереднього валика в подальшому залежить від відносного кроку наплавлення  $\alpha$  і коефіцієнта  $\beta = h_1 / h_2$ .

Експерименти показали, що для отримання якісного шару при наплавленні порошковим дротом на різних режимах доцільно крок наплавлення вибирати в межах 0,5–0,7.

Залежно від режимів наплавлення і шлакової системи сердечника порошкового дроту коефіцієнт  $\beta$  змінюється в межах 1,5–3,5. Частку участі основного металу в металі другого і наступних валиків визначимо за формулою

$$\varphi_1 = \frac{F_{PP} - F_{AKB}}{F_{PP} + F_H} = \frac{h_2 \arcsin \alpha + h_2 \alpha \sqrt{1 - \alpha^2}}{2 \left( \frac{2}{3h_1} + \frac{\pi}{4} h_2 \right)}.$$

Розділивши мислитель і знаменник на  $h_2$ , остаточно отримаємо:

$$\varphi_1 = \frac{\arcsin \alpha + \alpha \sqrt{1 - \alpha^2}}{\frac{4}{3} \beta + \frac{\pi}{2}}. \quad (9)$$

При наплавленні необхідно забезпечити заданий хімічний склад MeH верхнього шару. Якщо позначити відносне відхилення концентрації легуючого елемента в  $n$ -му шарі від змісту його в наплавленого металі через:

$$\Delta = \frac{|Me^n - Me_H|}{Me_H} \cdot 100\%. \quad (10)$$

то з формули можемо визначити, що

$$\frac{\Delta}{100} = \left(1 - \frac{Me_0}{Me_H}\right) \left(\frac{\varphi_1}{1 - \delta}\right)^n.$$

Звідки знаходимо, що заданий склад наплавленого метала по легованих елементів Me може бути отриманий в  $n$ -му шарі, де  $n$  розраховується за формулою:

$$n = \frac{\ln(\Delta/100) - \ln(1 - Me_0 / Me_H)}{\ln \varphi_1 - \ln(1 - \delta)}. \quad (11)$$

## ВИСНОВКИ

В даній статті розглянуто статистичну модель для розрахунку з достатньою точністю складу порошкового дроту з урахуванням часток участі основного і наплавленого металу, метал попереднього валика в подальшому і відносного кроку наплавлення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кипарисів С. С. Порошкова металургія / С. С. Кипарисів, Г. А. Лібенсон. – М. : Металургія, 1991. – 432 с.
2. Лібенсон Г. А. Процеси порошкової металургії. Т. 1. Виробництво металевих порошків: підручник / Г. А. Лібенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницький. – М. : МІСІС, 2001. – 368 с.
3. Лібенсон Г. А. Процеси порошкової металургії. Т. 2. Формування і спікання : підручник / Г. А. Лібенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницький. – М. : МІСІС, 2002. – 319 с.
4. Новофастівський А. Л. Математичне моделювання процесу пресування порошків методом великих частинок // Порошкова металургія. – 1989. – № 12. – С. 4–7.
5. Кадушніков Р. М. Геометричне моделювання структури полідисперсних матеріалів / Р. М. Кадушніков, А. Р. Бекетов // Порошкова металургія. – 1989. – № 10. – С. 69–74.
6. Гнедовець А. Г. Модель формування макроструктури покриттів при плазмовому напиленні / А. Г. Гнедовець, В. І. Калита // Фізика і хімія обробки матеріалів. – 2007. – № 1. – С. 30–39.
7. Винокуров Г. Г. Статистичні підходи для опису формування та зношування макроструктури порошкових покриттів і матеріалів, отриманих високоенергетичними методами / Г. Г. Винокуров, О. Н. Попов. – М. : Acadetia, 2009. – 184 с.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2019 р.

УДК 621.791.75

Шилюк І. К., Терещенко М. С., Юраков М. О. (ЗВ-18м)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

*У статті приводяться найбільш поширені способи дослідження властивостей наплавленого металу, а також основні схеми досліджень та обладнання що використовується.*

*Дослідження властивостей наплавленого металу в даний час мають широке поширення і безперервно вдосконалюються. Це пов'язано з тим, що без цих досліджень не можливо розробити і підібрати жодного зварювального матеріалу. У даній статті розглянуті найбільш поширені і доступні методи дослідження властивостей наплавленого металу порошковим дротом на прикладі наплавлення хромистих сталей.*

*The article presents the most common ways to study the properties of the weld metal, as well as the basic research schemes and equipment used. The study of the properties of the deposited metal is now widely used and is being continuously improved. This is due to the fact that without such research it is impossible to develop and select a single welding material. This article discusses the most common and available methods for investigating the properties of the weld metal with cored wire, using as an example the surfacing of chromium steels.*

Метою роботи є проведення аналізу найбільш поширених способів дослідження властивостей наплавленого металу, а також основних схем досліджень та обладнання що використовується. Дослідження властивостей наплавленого металу в даний час мають широке поширення і безперервно вдосконалюються. Це пов'язано з тим, що без цих досліджень не можливо розробити і підібрати жодного зварювального матеріалу. У даній статті розглянуті найбільш поширені і доступні методи дослідження властивостей наплавленого металу порошковим дротом на прикладі наплавлення хромистих сталей

### **Мікроскопічний аналіз**

При цьому методі аналізу мікрошліфи вирізаються з наплавленої частини заготовок. Визначаються різні варіації мікроструктур після наплавлення та термообробки. Мікроструктуру наплавлених зразків перевіряють в різних перетинах. Вибирається площину перпендикулярну поверхні відводу тепла, щоб можна було визначити структуру в периферійних і серединних шарах металу. При проведенні мікроскопічних досліджень поверхню готується наступним чином: отримується рівна поверхня шляхом відрізки зразка, потім виконується його полірування. Полірування зразків виробляють механічним шляхом. В результаті поверхня зразка набуває дзеркального блиску без рисок і подряпин [1].

Для виявлення структури сплаву проводиться виборче розчинення фаз. Для цього шліф занурюють полірованою поверхнею в розчин кислоти на 10 секунд. Травник - 5% спиртовий розчин азотної кислоти. Проводить металографічний аналіз структури досліджуваної сталі після наплавлення, відпалу, гарту і відпустки проводиться при збільшеннях у 100-500 разів із застосуванням мікроскопів (наприклад МІМ-8 і «Неофот-21»). Загальний вид мікроскопа Неофот-21 зображений на рис. 1.

Величину зерна оцінюють за 12-бальною шкалою відповідно до ГОСТ 5639-82. Травлення шліфів для визначення карбідної неоднорідності і розміру зерна виконується в 4% -ому розчині азотної кислоти в етиловому спирті [1]. Приклад мікрошліфів зображено на рис. 2.

### **Макроскопічний аналіз**

За допомогою макроаналізу визначали порушення суцільності металу: пори, тріщини, дендритну будову в стані після наплавлення. Для цієї мети виготовляються темплети, вирізані з наплавленої частини заготовок. Розміри темплетів визначаються діаметром заготовок 10-15 мм і висотою 15 мм. Зразки для макроаналізу піддаються поверхневому і глибокоповерхневому травленню.

Для цього застосовуються реактив, що складається з 50 мл HCl + 50 мл H<sub>2</sub>O. Режим травлення при температурі 60 °С протягом 0,3 год. Після травлення зразки приймають рельєфну поверхню з видимими осями дендритів [2]. При наявності тріщин і дефектів наплавлення вони виразно проявляються і їх видно неозброєним оком. Загальний вид макрошліфу зображено на рис. 3.



Рис. 1. Загальний вид мікроскопа Неофот-21

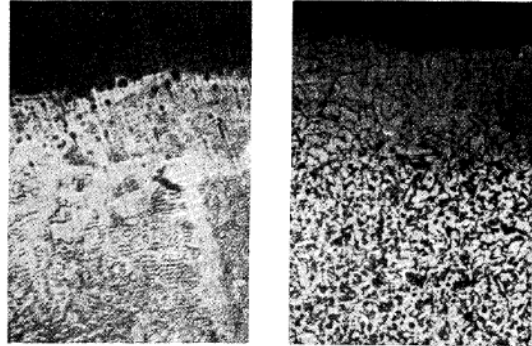


Рис. 2. Зображення мікрошліфів

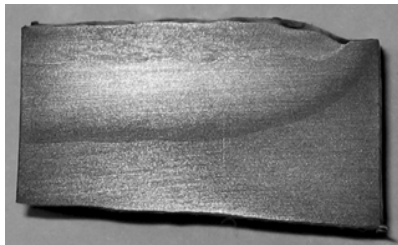
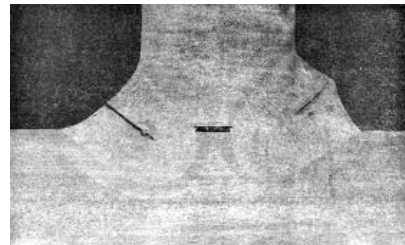


Рис. 3. Загальний вид макрошліфів



### **Ударні випробування**

Випробування на удар виявляють небезпечну схильність металів до крихкого руйнування, не завжди виявляються при статичних випробуваннях. Внаслідок підвищеної швидкості деформування перехід сталей з в'язкого стану в крихкий при ударних випробуваннях часто відбувається приблизно в інтервалі кімнатних температур, а при статичних – значно в більш низькому інтервалі.

В'язкість інструментальних сталей характеризує головним чином роботу, витрачену на зародження тріщини. Метод визначення в'язкості зі створенням на зразку додаткових концентраторів напружень, що дозволяють визначити роботу поширення тріщини у сталей, що містять до 0,5 % С, малоприйнятний для сталей з твердістю, понад 55 HRC. Для якісної оцінки ударної в'язкості високовуглецевих штампових сталей холодного деформування в умовах динамічного навантаження використовуються значення цього параметра, визначеного згідно з ГОСТ 9454-78 на шліфованих зразках розміром 10 x 10 x 55 мм без надрізу [2]. Після наплавлення в кристалізаторі зразки піддаються відповідній термо- і механообробці. Потім виготовляються зразки на ударну в'язкість по ГОСТ 6996-66 типу VI. Випробування на ударну в'язкість виготовляються на зразках без надрізу по ГОСТ 6996-86 типу VI з розмірами 10 x 10 x 55 мм. Значення в'язкості підраховували за формулою [2]:

$$KC = A/F,$$

де А – робота, що затрачена на руйнування зразка, Дж;

F – площа поперечного перетину зразка, см<sup>2</sup>.

Хромисті сталі мають підвищену чутливість до жорсткості навантаження і характеризуються дуже малими розмірами критичних тріщин при статичних живленнях, тому ударна в'язкість, що характеризує енергію зародження тріщин, дозволяє з достатнім ступенем

надійності здійснювати попередній вибір 51 матеріалів, що працюють при порівняно невеликих питомих тисках (1300–1500 МПа). Після випробування на ударну в'язкість визначається твердість на цих же зразках.

#### **Дослідження твердості наплавленого металу**

Визначення твердості зразків виконуються за методом Роквела з використанням спеціального преса - твердоміра Роквела ТК2М, призначеного для вимірювання твердості деталей і зразків з металів, сплавів і конструкційних пластмас. Загальний вид преса-твердоміра зображено на рис. 4.

При вимірюванні твердості за методом Роквела відповідно до ГОСТ 9013-59 значення твердості визначаються по різниці глибини вдавнення індентора (алмазного конуса з кутом при вершині 1200 або шарику діаметром 1,588 мм з карбіду вольфраму або загартованої сталі) в поверхню досліджуваного зразка [2]. Індентор вдавлюється в метал з попереднім постійним навантаженням  $P_1 = 100$  Н, а потім повним навантаженням  $P_2$ . Стандартної повним навантаженням при цьому методі є  $P_2 = 1500$  Н або  $P_2 = 600$  Н. Чим твердіше метал, тим на меншу глибину проникає алмаз при втисненні, тим більше буде число твердості. Пристрій відліку твердості - аналогове (індикатор годинникового типу).

Твердість, визначена за цим методом, є безрозмірною. Величина твердості обчислюється за формулою [3]:

$$HR = \frac{K - (h_1 - h_2)}{c},$$

де  $h_2$  і  $h_1$  – глибина вдавлювання наконечника індентора під дією попередньої ( $P_1$ ) і остаточної ( $P_2$ ) навантажень, мм;

$K$  – постійна кількість (коефіцієнт), що має розмірність в мм.

$c$  – ціна ділення шкали індикатора, відповідна поглибленню індентора (конуса або кульки) на 0,002 мм.

Для позначення твердості по Роквелу використовується символ HR, до якого додається буква, що вказує на шкалу, по якій проводились випробування (HRA, HRB, HRC). Максимальна твердість по шкалам А і С складає 100 одиниць, а по шкалі В – 130 [4].

#### **Дослідження мікротвердості структурних складових**

Для ідентифікації окремих фаз і структурних складових в наплавленому металі використовується метод вимірювання мікротвердості окремих структурних складових відповідно до ГОСТ 9450-76. Метод заснований на вимірюванні лінійної величини діагоналі відбитка від вдавнення індентора у вигляді чотиригранної алмазної піраміди з кутом при вершині  $136^\circ$  під навантаженням від 0,02-5 Н. Для випробувань використовується Мікротвердоміри ПМТ-3 (або аналогічні). Загальний вид мікротвердоміра зображено на рис. 5.

Залежно від величини твердості досліджуваної фази і величини навантаження діагональ відбитка може змінюватися від кількох до кількох сотень мікрометрів, що дозволяє вивчати структурні складові розміром до 10 мкм. Для ідентифікації фаз використовуються відомі дані за значеннями мікротвердості окремих структурних складових [3].

Число твердості є навантаження, що припадає на одиницю поверхні відбитка. Його визначають за формулою [3]:

$$HB = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2},$$

де  $P$  – навантаження на піраміду, Н;

$\alpha$  – кут при вершині піраміди, град;

$d$  – довжина діагоналі відбитка, м.

Вимірювання мікротвердості кожної фази проводяться 5-6 разів і вичислюється середнє значення. Для дослідження застосовуються ті ж зразки, що і для мікроаналізу.



а)



б)

Рис. 4. Загальний вид твердомірів:

а – прес-твердомер Роквелла ТК2М; б – мікротвердомер ПМТ-3

#### **Методики дослідження хімічної неоднорідності наплавленого металу**

Типові форма і розміри, зразків для випробувань на макронеоднорідність хімічного складу наплавленого металу приведена на рис. 5. Відстань точки від поверхні визначається за помноженням гіпотенузи на синус кута.

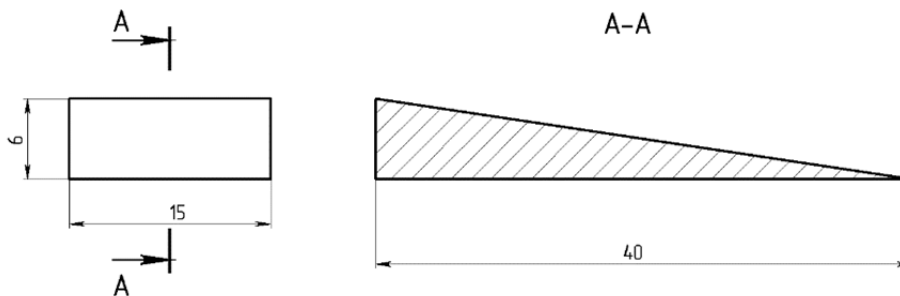


Рис. 5. Форма і розміри зразка

Дослідження макроскопічної неоднорідності розподілу елементів по глибині наплавленого металу проводиться методом косої зрізу зразка, що дозволяє мати на поверхні шари, розташовані на різній відстані від лінії сплавлення, в тому числі і в основному металі. Розмітка точок для цього методу проводиться заздалегідь за допомогою компаратора МІР (або іншого аналогічного обладнання). Макронеоднорідність досліджується в п'ятому шарі наплавленого металу. Спектральний аналіз виконується на спектрографі (наприклад SPECTROLAB) з використанням еталонних зразків [4].

#### **Методики досліджень експлуатаційних властивостей наплавленого металу**

Тертя, що викликає зношування, може відбуватися в місцях зіткнення деталей з обробленим матеріалом. При вивченні зносу штапового інструменту, стосовно до випадку тертя сполучених деталей, розрізняються наступні види зношування: механічне стирання; зношування внаслідок втомного руйнування; молекулярномеханічне, що супроводжується захопленням металів [5]. Установка, на якій проводяться випробування зразків на зносостійкість, як правило, відноситься до машин торцевого тертя. Принципова схема установки показана на рис. 6, а. Зразки для випробувань на зносостійкість виготовляються формою і розмірами, зазначеними на рис. 6, б.



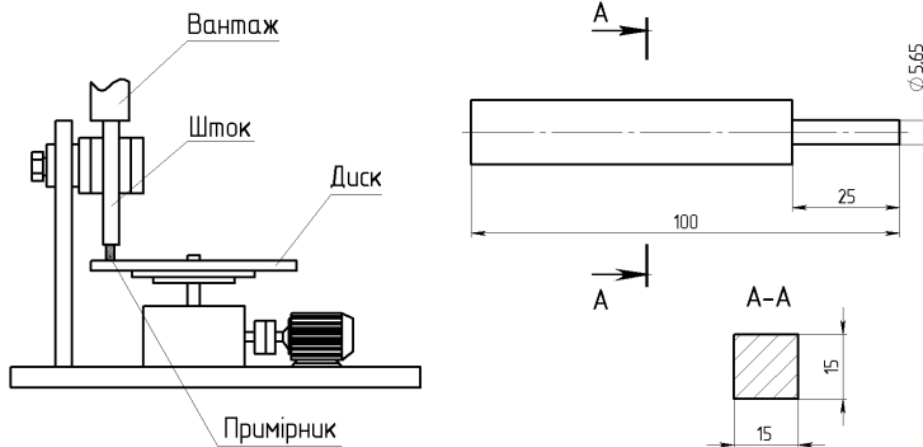


Рис. 6. Принципіальна схема установки для дослідження зносу схоплюванням

В якості еталонного диска, як правило, служить загартована і відпущена сталь ХВГ з твердістю 64 HRC. За допомогою вертикального штока досліджуваний зразок притискається торцем до еталонного диска. Необхідна навантаження на зразок створюється за допомогою вантажів [5]. Зразки для випробувань на зносостійкість піддаються термообробці. Перед кожним випробуванням поверхні тертя зразків і еталонного диска піддаються однаковою обробці шліфувальної папером МК-20, після чого зразок ретельно притираються по еталонному диску до досягнення їх контакту по всій поверхні тертя. До і після випробування за допомогою зважування на аналітичних вагах визначається ваговий знос зразка. Для визначення інтенсивності зношування випробовуваних зразків визначається наведений знос, віднесений до одиниці шляху тертя (1000 м) [5].

## ВИСНОВКИ

На підставі проведеного літературного огляду описані методики проведення експериментальних досліджень по вивченню структури і властивостей наплавленого металу, зварювально-технологічних властивостей порошкового дроту.

Опис дозволяє при виборі способу випробування наплавленого металу зробити відповідний вибір з урахуванням наявного обладнання та можливостей.

Методи описані в статті допомагають визначитися з вибором необхідного виду випробування в залежності від необхідних даних які потрібно отримати.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сварка и резка материалов : учеб. пособие для нач. проф. образования / [М. Д. Банов, Ю. В. Казаков, М. Г. Козулин и др.] ; под ред. Ю. В. Казакова. – 9-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 400 с. ISBN 978-5- 7695-7590-7
2. Аттетков А. В. Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин. – М. : Издат. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 439 с.
3. Karkhin V. A. Analytical-experimental technique for calculating the temperature fields in laser welding. 11th Nolamp Conference on Laser Processeng of Materials / V. A Karkhin., P. N. Homich, V. G. Michailov ; Eds. V. Kujanpaa and A. Salminen. – August 2007. – Finland, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 273, ISSN 1456-4491. – P. 263–277.
4. Пантелеев А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – М. : Высшая школа, 2002. – 544 с.
5. Кархин В. А. Решение обратной задачи теплопроводности с учетом теплоты плавления и кристаллизации / В. А. Кархин, А. С. Ильин, В. В. Плошихин // Сварочное производство. – 2003 – № 7. – С. 3–6

# РОЗДІЛ 2

# ЕКОНОМІКА



УДК 621.982: 669.295

Матюшин І. В. (МН-1м)

## ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ЩОДО НАВЧАННЯ ПЕРСОНАЛУ

*У статті розглядається питання навчання персоналу як явища у сфері менеджменту, викликаного постійним розвитком та бажанням компаній бути першими. Аналізуються передумови і наслідки навчання персоналу, його вплив і перспективи.*

*The article deals with the issue of personnel training as a phenomenon in the field of management, caused by constant development and the desire of companies to be the first. The preconditions and consequences of personnel training, its influence and prospects are analyzed.*

Вивченню комплексу питань, пов'язаних з розвитком персоналу, присвячено низку досліджень видатних зарубіжних та українських вчених-економістів, зокрема Н. Аймаутової, О. Грішнєвої, М. Білопольського, Д. Богині, М. Боровик, О. Єськова, Г. Завіновської, А. Колота, А. Литвиненко, О. Раєвнєвої, І. Швець, А. Богданов, В. Травин, С. Шекшня.

Ці вчені приділяли пильну увагу питанню навчання персоналу та розкривали його у своїх статтях. Серед зарубіжних вчених, які розглядали це питання слід виділити: М. Армстронга, Х. Грехема, А. Кібанова, А. Маслоу, М. Мескона, В. Савченко, С. Шапіро, С. Шеклі, А. Алістаєва, І. Богін, В. Любімов, Н. Маусов, Ю. Одегов, та ін. Незважаючи на об'ємність матеріалу, представленого даними авторами, деякі аспекти даної теми не розкриті і потребують уваги і опису, а саме механізми керування процесом навчання [18].

Постійний прогрес дуже сильно впливає на рівень компетентності та навченості персоналу. Тому навчання персоналу набуває особливого значення в сучасному менеджменті. На даний момент не всі спроможні забезпечити нормальне навчання і провести потрібні реформи у компанії. Це обумовлено недостатньою навченістю керуючого персоналу та є головною причиною відсталості фірм та компаній від нинішніх темпів розвитку.

Мета роботи.

Дослідження методів розвитку персоналу та визначення потреби у підготовці й перепідготовці персоналу.

Виходячи із мети, слід вирішити такі завдання:

- аналіз категорії «навчання персоналу»;
- вивчення зарубіжного досвіду навчання персоналу;
- дослідження сучасних підходів щодо навчання персоналу.

Професійне навчання персоналу – це систематичний процес формування у працівників підприємства теоретичних знань, умінь та практичних навичок, необхідних для виконання роботи [1].

Підвищення важливості безупинного навчання персоналу підприємств обумовлюють такі чинники:

- впровадження нової техніки, технології, виробництво сучасних товарів, ріст комунікаційних можливостей, що створюють умови для ліквідації або зміни деяких видів робіт. У зв'язку з цим необхідна кваліфікація не може бути гарантована базовою освітою;
- зміни у всіх сферах життя. Безупинні і швидкі зміни в технології і інформатиці вимагають безупинного навчання персоналу;

Так, вже з 70-х років більшість керівників американських корпорацій стали розглядати витрати на навчання як прибуткові капіталовкладення, а відділи розвитку персоналу і внутріфірмові навчальні центри – як підрозділи, що беруть участь у створенні прибутку.

Порівняльний аналіз традиційного і інтегрованого навчання персоналу підприємства представлений у табл. 1.

У спрощеному варіанті учасниками процесу навчання є:

- вище керівництво підприємства;
- менеджери середнього рівня управління;
- менеджери нижньої ланки;
- рядові працівники підприємства.

Слід відзначити, що вище керівництво нести безпосередню відповідальність за навчання персоналу не може – його задача визначати стратегічний напрямок [3].

Менеджери середньої ланки безпосередньо працюють тільки з лінійними керівниками, тому реальної ситуації в області кваліфікації персоналу вони не знають. У них немає повного уявлення про існуючу невідповідність між реальною і необхідною кваліфікацією.

Таким чином, тільки лінійні керівники можуть безпосередньо нести відповідальність за процес навчання працівників. По-перше, вони знають усе про роботу, що виконують їхні підлеглі, а по-друге, вони можуть реально оцінити їхню кваліфікацію і компетенцію.

Персоналом керує безпосередній керівник. Відповідно і відповідальність за навчання працівників несе теж він.

Що ж стосується ролі підрозділу з управління персоналом в процесі навчання, то вона визначається, як і в інших сферах управління людськими ресурсами, високим рівнем спеціальних знань, досвіду, інформації, якими володіють працівники цих підрозділів.

Професійне навчання персоналу підприємства забезпечує [4]:

1. Первинну професійну підготовку працівників (здобуття професійно-технічної освіти особами, які раніше не мали робочої професії або спеціальності, що забезпечує відповідний рівень професійної кваліфікації, необхідний для продуктивної трудової діяльності у підприємстві).

Порівняльний аналіз традиційного та інтегрованого навчання персоналу підприємства [2]

Параметри	Традиційне навчання у межах підприємства	Навчання, поєднане з організаційним розвитком
Об'єкт	Окремий керівник	Групи, між групові зв'язки, керівник і група
Зміст	Основи управлінських знань і навичок	Комунікативні навички, уміння вирішувати проблеми
Працівники, що навчаються	Керівники нижчого і середнього рівня	Усі керівники
Навчальний процес	Заснований на інформації і раціоналізації	Заснований на інформації, комунікації і емоціях
Стиль навчання	Виходить із предметів і особливостей викладачів	Виходить із особливостей учасників, їхнього досвіду, проблем, відносин і умінь консультантів
Цілі навчання	Раціональність і ефективність	Просування, зміна, інформування
Форма проведення	Семінари, курси	Вільний вибір форм у залежності від необхідності ситуації
Відповідальність за проведення	Викладачі, організатори	Учасники
Стабільність програми	Стабільна	Гнучка, адаптована
Концепція навчання	Адаптація до недоліків	Заміна
Участь у підготовці програм	Учасники не включені у процес складання програм	Керівники беруть участь
Спрямованість	На знання для майбутнього	На конкретну зміну
Активність	Мала	Дуже активні

2. Перепідготовку (професійно-технічне або вище навчання, спрямоване на оволодіння іншою професією (спеціальністю) робітниками або спеціалістами з вищою освітою, які вже здобули первинну професійну підготовку у професійно-технічних або вищих навчальних закладах). Так, в процесі науково-технічного і соціального прогресу отримана спеціалістом базова освіта у певних випадках потребує зміни. Відповідні навчальні заклади здійснюють перепідготовку керівників і спеціалістів з метою оволодіння ними новою спеціальністю.

3. Підвищення кваліфікації (навчання, спрямоване на розвиток і удосконалення знань, умінь і навичок у конкретному виді спеціальної діяльності, обумовлене постійною зміною змісту праці, удосконаленням техніки, технології, організації виробництва і посадових переміщень). Воно, як правило, проводиться з відривом від роботи до трьох тижнів або з частковим відривом від роботи тривалістю до шести місяців. Рекомендована чисельність тих, що навчаються у групах, – до 30 чоловік. Навчальні плани і програми для короткострокового навчання розробляються підприємствами або навчальними закладами, що організують даний вид навчання керівників і спеціалістів. Навчання в групах завершується складанням іспитів або захистом курсових робіт.

Оцінка потреби у навчанні персоналу є ключовою ланкою в організації навчання. Від якості аналізу потреби в навчанні залежить ефективність витрат і результативність наступної діяльності працівників.

Основою для аналізу потреби у навчанні є, як правило, бізнес-план. На його основі можна провести аналіз того, що дійсно необхідно для ефективної роботи підприємства. Наприклад, якщо підприємство планує вихід на нові ринки або випуск нової продукції, важливо зрозуміти, чи є у персоналу необхідні контакти, технічний досвід, знання особливостей нових ринків? Чи адекватні ресурси відділу збуту задачі продавати новий продукт?

На даному етапі необхідно також визначити загальні напрямки, у яких необхідно проводити навчання.

Конкретизувати задачі по кожному з напрямків допоможе збір і аналіз інформації в таких сферах:

- управління людськими ресурсами;
- організаційний аналіз, аналіз робочих операцій;
- аналіз плинності кадрів;
- аналіз втрат робочого часу (хвороби, залізнення, недозволена відсутність);
- управлінська інформація;
- аналіз обсягу продажів;
- аналіз обсягу продукції, що випускається; аналіз якості продукції і послуг; аналіз відхилень; аналіз фінансових показників;
- аналіз відгуків замовників і покупців;
- інформація про діяльність працівників;
- аналіз ефективності роботи працівників;
- аналіз компетенції працівників.

Для цього варто зібрати, обробити і проаналізувати певну інформацію. Області для аналізу можна поділити на три рівні:

- рівень підприємства. Навчання, необхідне для підвищення ефективності підприємства в цілому. Наприклад, зміна системи цінностей, зміна ідеології і методів роботи з замовником;
- рівень групи. Ціль – підвищення ефективності груп. Наприклад, зміни в бухгалтерському обліку, зміна вимог до техніки безпеки праці, зміни в технології виробництва або відкриття унікального замовлення;
- індивідуальний рівень. Підвищення ефективності роботи окремих працівників. Наприклад, використання нового обладнання, підвищення компетенції в області управління, оволодіння спеціальними навичками або освоєння управлінських технологій.

Після того, як визначено області можливих удосконалень, необхідно конкретизувати цілі і задачі для кожного конкретного напрямку. Для цього необхідно виразити бажані результати навчання у виді опису необхідної реальності для підприємства або конкретного працівника і додати їм певне числове значення (наприклад, скоротити кількість скарг покупців на 6 %). Іноді цілі навчання досить складно виразити у кількісних одиницях, і якщо це дійсно неможливо, слід зробити детальний опис того, як буде виглядати процес, що поліпшується, по завершенні навчання (наприклад, чітко виконувати всі стадії процесу продажів, що буде підтверджуватися заповненням відповідних бланків). В результаті даної роботи буде одержано:

- основу для розробки навчальної програми і вибору методу навчання;
- критерії для наступної оцінки ефективності навчання;
- критерії відбору учасників навчання.

Цілі навчання з точок зору роботодавця і самого працівника значно відрізняються.

Так, з позиції роботодавця цілями безупинного навчання є:

- організація і формування персоналу управління;
- оволодіння умінням визначати, розуміти і вирішувати проблеми;
- відтворення персоналу;
- інтеграція персоналу;
- гнучке формування персоналу;
- адаптація;
- впровадження нововведень.

З позиції найманого працівника цілями безупинного навчання є:

- підтримка на відповідному рівні і підвищення професійної кваліфікації; отримання професійних знань поза сферою професійної діяльності;

- отримання професійних знань про постачальників і споживачів продукції, банки і інші організації, що впливають на роботу підприємства;
- розвиток здібностей в області планування і організації діяльності

Мотивацією безупинного навчання в американських компаніях є зв'язок між результатами виробничої діяльності кожного працівника і наданням йому можливості для навчання: цінність працівника фірми визначає обсяг коштів, що виділяються для підвищення його кваліфікації.

Професійне навчання персоналу підприємства може здійснюватися як безпосередньо на робочому місці, так і поза робочим місцем (табл. 2) [5].

Таблиця 2

## Методи професійного навчання персоналу підприємства

На робочому місці	Поза робочим місцем
Адаптація	Лекція
Інструктаж	Дискусії
Наставництво	Дистанційне навчання
Розширення кола обов'язків	Ознайомлення з досвідом інших підприємств
Делегування	Розгляд практичних ситуацій
Демонстрації	Ділові ігри
Передача досвіду	Моделювання ситуацій
Ротація	Семінари, виставки
Чергування операцій	Тренінги
Ускладнення завдань	Рольові ігри
Заміщення	Самостійне навчання
Набір завдань	Участь у виставках і заходах
Підготовка і розвиток команди	Участь у навчальних програмах
Консультація	Участь у проектах

Так, навчання на робочому місці характеризується безпосередньою взаємодією учня (слухача) з роботою у звичайній виробничій ситуації. Характерною ознакою такої підготовки є те, що вона організовується спеціально для даного підприємства та лише для його персоналу.

Професійне навчання на робочому місці доцільно застосовувати [6]:

- для формування знань, умінь і навичок, необхідних для виконання поточних виробничих завдань, коли зміст навчання може бути пристосований до потреб підприємства;
- коли підприємство має достатню кількість працівників з однаковими потребами у підготовці;
- коли підприємство має достатню кількість кваліфікованих викладачів або інструкторів виробничого навчання.

Проте, навчання на робочому місці в багатьох випадках є неідеальним для формування нових знань, оскільки воно не дає можливість працівникові абстрагуватися від поточної ситуації на робочому місці та певним чином змінити свою трудову поведінку.

Крім того, навчання поза робочим місцем може здійснюватися на навчальному методичному забезпеченні, котрого немає на підприємстві, висококваліфікованими викладачами, які є лише у навчальному закладі. За таких умов більш придатними є форми навчання поза робочим місцем [7, 8].

До того ж, вибір методів навчання повинен залежати від конкретної ситуації і можливостей підприємства. Головне загальне правило: методи навчання повинні відповідати поставленим цілям і задачам навчання.

Вибір методів навчання залежить від таких чинників:

- цілі і задачі навчання;
- пряма і непряма вартість навчання;

- терміновість (час, відпущений на навчання);
- склад учасників (їхня кваліфікація, мотивація, попередня підготовка);
- кваліфікація і компетенція викладачів.

У загальному виді оцінити ефективність навчання можна, порівнявши реальні результати навчання з цілями, що були поставлені перед навчанням з використанням встановлених критеріїв.

Визначення і оцінка ефективності капіталовкладень у навчання є актуальною і дуже складною проблемою. Очевидно, що:

- розробка програм розвитку управління персоналом повинна бути заснована на чіткому визначенні практичних потреб реальних клієнтів (підприємств і учасників програм);
- оцінки віддачі можуть відрізнятися для різних учасників і клієнтів у залежності від їх індивідуальних і корпоративних цілей.

В ідеалі ці цілі повинні бути єдині в тому, що стосується задоволення потреб.

Для власників підприємств, вищих виконавчих керівників і підприємців цими цілями будуть:

- підвищення продуктивності праці, ефективності і прибутку;
- одержання загальних конкурентних переваг; збільшення частки ринку і активів підприємства.

Для керівників вищої ланки цілями навчання є:

- підвищення ефективності управління підприємством і продуктивності праці, здійснення змін і нових проектів;
- удосконалення колективної роботи і процесів;
- розробка нових засобів для досягнення корпоративних цілей.

Для менеджерів підприємств цілями навчання є:

- нові перспективи у кар'єрі;
- нові можливості удосконалення роботи свого сектору;
- нові методи рішення задач;
- збільшення кількості клієнтів і більш повне задоволення їхніх потреб.

Для працівників підприємств цілями навчання є:

- удосконалення умов праці;
- більш активна участь у процесах прийняття рішень;
- більш ефективне використання особистого потенціалу;
- більше задоволення від трудової діяльності.

Для суспільства цілями навчання персоналу є:

- внесок в економічний добробут країни; збільшення надходжень у бюджет;
- нові шляхи рішення соціальних, регіональних і інших проблем.

Складність, однак, полягає в тому, що і цілі учасників процесу навчання значно відрізняються, і ціна, яку готовий заплатити кожен з них, також є різною.

Тому, аналізуючи ефективність навчання, за винятком простих і очевидних випадків (наприклад, збільшення швидкості друкування в результаті тренінгу), варто застосовувати комплексний підхід.

Один з варіантів оцінки ефективності навчання може бути заснований на теорії людського капіталу, відповідно до якої знання і кваліфікація найманих працівників розглядаються як капітал, що належить їм і приносить доход, а витрати часу і коштів на придбання цих знань і навичок – інвестиції в нього.

Можна виділити такі характеристики основного капіталу:

- ціна придбання;
- відновна вартість;
- балансова вартість.

Ціна придбання – це сума витрат на набір робочої сили, ознайомлення її з виробництвом і первинне навчання.



У балансі показується загальна сума вкладень у трудові ресурси на початок планового періоду (витрати на набір і навчання), вказується обсяг зроблених протягом звітного періоду інвестицій, підраховується величина втрат внаслідок звільнень, застарілих знань і кваліфікації і виводиться вартість на кінець розглянутого періоду.

Дослідники затверджують, що зараз більш високий економічний ефект від вкладень у розвиток персоналу, ніж від вкладень у засоби виробництва.

Таким чином, для забезпечення ефективності системи навчання персоналу необхідно:

- проаналізувати існуюче положення;
- сформулювати цілі навчання і оцінити перспективи їхнього досягнення;
- спрогнозувати зміни, підготувати проекти змін;
- визначити терміни і витрати на навчання.

## ВИСНОВКИ

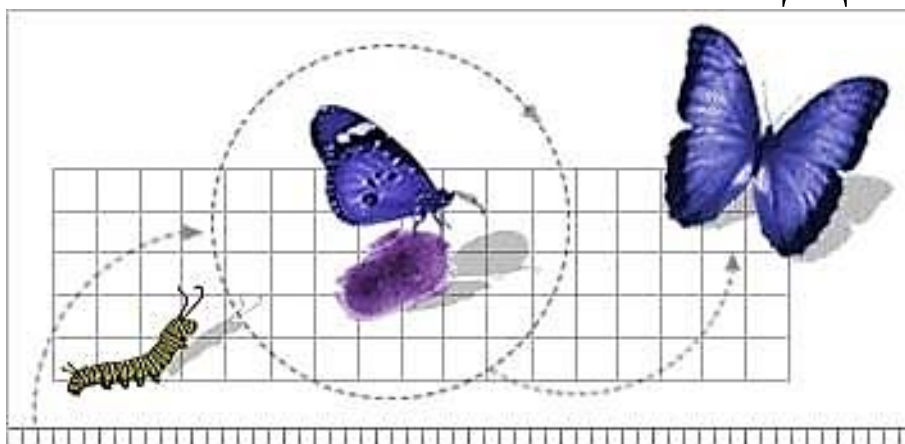
Таким чином, можна сказати, що формування ефективного розвитку персоналу є важливим фактором успішної діяльності підприємства. Розвиток персоналу – це не тільки організація навчання та підвищення кваліфікації, але цілеспрямоване планування руху співробітників. Розвиток персоналу належить до одних з основних показників прогресивності суспільства та є вирішальним важелем науково-технічного процесу. Тому в країнах з розвинутою ринковою економікою все більше компаній ініціюють здійснення неперервного розвитку персоналу своїх підприємств. Планування й організація розвитку персоналу є важливими функціями управління персоналом, використання цього досвіду є важливою умовою забезпечення сталого економічного зростання. Запровадження узгодженої кластерної взаємодії підприємства з навчальними закладами зможе забезпечити кваліфікованими робітниками та професіональним управлінським персоналом. Використання системи ведення карток індивідуального професійного розвитку дасть змогу охопити всіх спеціалістів та правильно визначити необхідний вид і термін навчання, що в подальшому впливатиме на результативність праці. Застосування комплексного поєднання кластерної взаємодії з навчальними закладами та вдосконалення механізму професійного навчання, зможе забезпечити високопрофесійним і ефективним кадровим потенціалом і, відповідно, конкурентними перевагами в умовах сучасного господарювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савченко В. А. *Управління розвитком персоналу [Електронний ресурс] : навч. посіб. / В. А. Савченко. – К. : КНЕУ, 2002. – 351 с. – Режим доступу : <http://library.if.ua/books/104.html>.*
2. Белов, В. А. *Управление персоналом : теория, практика- М.: Учебно-консультационный центр «Юринфор», 2005. – 395 с.*
3. Кибанов А. Я. *Управления персоналом организации. Практикум : Учеб. пособие. – М. : ИНФРА-М, 2002. – 296 с.*
4. *Менеджмент персоналу [Електронний ресурс] : навч. посіб. / В. М. Данюк, В. М. Петюх, А. М. Ткаченко, К. А. Марченко, С. О. Цимбалюк та ін. ; за заг. ред. В. М. Данюка, В. М. Петюха. – К. : КНЕУ, 2004. – 398 с. – Режим доступу : <http://studentam.kiev.ua/content/view/737/98>.*
5. *Trainings.ru – портал об обучении и развитии персонала. Методы обучения и развития персонала, применяемые в Великобритании COPYRIGHT 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.trainings.ru/library/articles/?id=6299>.*
6. *Нестеренко О. М. Шляхи вдосконалення професійного розвитку персоналу на підприємстві / О. М. Нестеренко // Вісник економіки, транспорту і промисловості. – 2010. – № 30. – С. 87–88.*
7. *Крушельницька О. В. Управління персоналом [Електронний ресурс] : навч. посіб. / В. О. Крушельницька, Д. П. Мельничук. – К. : Кондор. – 2003. – 296 с. – Режим доступу : <http://library.if.ua/books/45.html>.*
8. *Закомурная Е. „Тени” и „друзья”: методы обучения персонала, которых у нас пока нет. Источник: E-xecutive [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.podborkadrov.ru/articles/detail.php?ID=14214&spphrase\\_id=25693](http://www.podborkadrov.ru/articles/detail.php?ID=14214&spphrase_id=25693).*

# РОЗДІЛ 3

## ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ



УДК 621.316.719.3

Бавика А. Ю. (АВП-17-1м)

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ШПІМ ШЛЯХОМ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

*Розглянуто роботу перетворювача частоти матричного типу. У статті проводилось дослідження при застосуванні методу математичного моделювання. Матричні перетворювачі частоти, на повністю керованих ключах змінного струму, є одним з перспективних рішень в сфері економії енергії та розвитку електроприводу змінного струму. Представлений вид перетворювачів може з успіхом знайти застосування в машинах подвійного живлення, на виробничих лініях, на вантажно-розвантажувальних пристроях, ліфтах, шахто підйомних установках.*

*The work of the matrix-type frequency converter was considered. A study using the method of mathematical modeling was carried out in the article. The matrix frequency converters, on fully operated AC switches, are one of the most promising solutions in the area of energy saving and the development of electric AC drives. The presented type of converters can successfully find application in dual-feed machines, production lines, loading and unloading devices, elevators, shaft lifting plants.*

У даний час існує ряд таких систем електроприводу ШПІМ, що забезпечують рекуперацію електричної енергії в мережу живлення. При цьому ефективність роботи електроприводу ШПІМ в такому режимі визначається функціональними можливостями частотного перетворювача, алгоритмом його управління, системою управління швидкістю судин ШПІМ і точністю налагодженням регуляторів системи управління.

Мета роботи полягає в розробці та дослідженні автоматизованого електроприводу змінного струму ШПІМ на основі перетворювача частоти і системи управління швидкістю судин, які забезпечують в сукупності підвищену віддачу енергії гальмування в мережу живлення.

Основними перевагами матричного перетворювача частоти (МПЧ) щодо перетворювачів частоти (ПЧ) з ланцюгом постійного струму є: двонаправлений обмін енергією між живильною мережею і навантаженням; високі енергетичні характеристики; відсутність в силовій частині дорогих електролітичних конденсаторів великої ємності істотно погіршують масогабаритні показники перетворювача.

При проектуванні асинхронного (двигуну) електроприводу на базі перетворювача частоти матричного типу найбільш важливим є вибір способу керування силовою частиною і розрахунок вхідного фільтра, що забезпечує заданий коефіцієнт потужності при мінімальних розмірах перетворювача.

В даний час розроблено декілька алгоритмів управління силовою частиною МПЧ, умовно їх можна розділити на алгоритми скалярною і просторово-векторної модуляції. До алгоритмів скалярною модуляції відносяться базовий метод управління [1–2], його розвиток, відомий як оптимізований алгоритм Вентаріні [3] і алгоритм канадського вченого Жиль Роя [4]. Різниця між ними полягає лише в тому, що обчислені по оптимізованому алгоритму коефіцієнти модуляції залежать від коефіцієнта передачі напруги, а в алгоритмі канадського вченого вони постійні та рівні своєму максимальному значенню. На рис. 1 (а) представлена еквівалентна схема заміщення МПЧ.

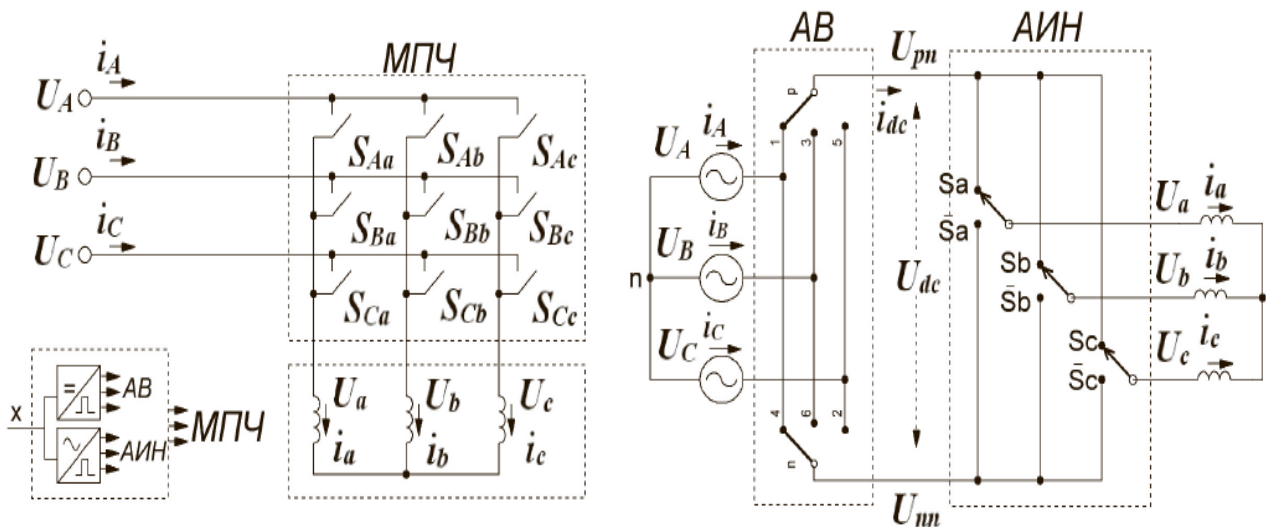


Рис. 1. Матричний перетворювач частоти:

а – керуюча частина; б – силова частина; в – схема заміщення

Особливої уваги потребують (мало) слабо вивчені, але перспективні на сьогоднішній день методи просторово-векторної модуляції (ПВМ) МПЧ, які забезпечують максимальний коефіцієнт передачі напруги  $q$  рівний  $\sqrt{3}/2$ . Одним з таких методів є опосередкована просторово-векторна модуляція (Indirect SVM або ISVM), запропонована в 1989 році, після того як МПЧ був представлений в еквівалентній схемі, яка поєднувала випрямляч і інвертор, пов'язані з допомогою віртуальної ланки постійного струму [5, 6]. Такий метод дозволяє використовувати для управління МПЧ добре відомі алгоритми ПВМ випрямної та інверторної частей двох ланкових перетворювачів частоти [7]. У даній статті розглянуто перетворювач частоти матричного типу, який є комбінацією віртуального активного випрямляча (АВ) і віртуального автономного інвертора напруги (АИН) з безпосереднім управлінням за методом просторово-векторної модуляції.

Для коректної роботи матричного електроприводу в режимі просторово-векторної модуляції (відсутність інтервалів короткого замикання фаз сеті розриву струму навантаження) необхідно, щоб в аби який момент часу виконувалась така умова: з дев'яти двонаправлених ключів МПЧ одночасно завжди повинні бути замкнуті (активними) три ключі, що відносяться до різних фаз навантаження [8]. Тому існує 27 дозволених комбінацій відкритих ключів, представлених в табл. 1 і розділених на три групи. Для кожної комбінації лінійні напруги входу і виходу можуть бути виражені у вигляді просторових векторів.

Група I відповідає випадку, коли всі три вихідні фази будь-яким чином з'єднані тільки з двома вхідними фазами та містить 18 комбінацій активних векторів вихідної напруги  $\bar{U}_0$  та активних векторів вхідного  $\bar{I}_1$ , що мають фіксований напрямок.

Група II відповідає випадку, коли всі три фази пов'язані тільки з однією з вихідних і містить 3 комбінації нульових векторів вихідної напруги та вхідного струму.

Таблиця 1

Комбінації ключів					
Група	№	Вектор	Ключі	$\bar{U}_0$	$\bar{I}_l$
I	1	+1	$S_{Aa,Bb,Bc}$	$(2/3)U_{AB}$	$2/\sqrt{3i_a}$
	2	-1	$S_{Ba,Ab,Ac}$	$-(2/3)U_{AB}$	$-2/\sqrt{3i_a}$
	3	+2	$S_{Ba,Cb,Cc}$	$(2/3)U_{BC}$	$2/\sqrt{3i_a}$
	4	-2	$S_{Ca,Bb,Bc}$	$-(2/3)U_{BC}$	$-2/\sqrt{3i_a}$
	5	+3	$S_{Ca,Ab,Ac}$	$(2/3)U_{CA}$	$2/\sqrt{3i_a}$
	6	-3	$S_{Aa,Cb,Cc}$	$-(2/3)U_{CA}$	$-2/\sqrt{3i_a}$
	7	+4	$S_{Ba,Ab,Bc}$	$(2/3)U_{AB}$	$2/\sqrt{3i_b}$
	8	-4	$S_{Aa,Bb,Ac}$	$-(2/3)U_{AB}$	$-2/\sqrt{3i_b}$
	9	+5	$S_{Ca,Bb,Cc}$	$(2/3)U_{BC}$	$2/\sqrt{3i_b}$
	10	-5	$S_{Ba,Cb,Bc}$	$-(2/3)U_{BC}$	$-2/\sqrt{3i_b}$
	11	+6	$S_{Aa,Cb,Ac}$	$(2/3)U_{CA}$	$2/\sqrt{3i_b}$
	12	-6	$S_{Ca,Ab,Cc}$	$-(2/3)U_{CA}$	$-2/\sqrt{3i_b}$
	13	+7	$S_{Ba,Bb,Ac}$	$(2/3)U_{AB}$	$2/\sqrt{3i_c}$
	14	-7	$S_{Aa,Ab,Bc}$	$-(2/3)U_{AB}$	$-2/\sqrt{3i_c}$
	15	+8	$S_{Ca,Cb,Bc}$	$(2/3)U_{BC}$	$2/\sqrt{3i_c}$
	16	-8	$S_{Ba,Bb,Cc}$	$-(2/3)U_{BC}$	$-2/\sqrt{3i_c}$
	17	+9	$S_{Aa,Ab,Cc}$	$(2/3)U_{CA}$	$2/\sqrt{3i_c}$
	18	-9	$S_{Ca,Cb,Ac}$	$-(2/3)U_{CA}$	$-2/\sqrt{3i_c}$
II	19	0	$S_{Aa,Ab,Ac}$	0	0
	20	0	$S_{Ba,Bb,Bc}$	0	0
	21	0	$S_{Ca,Cb,Cc}$	0	0
III	22	-	$S_{Aa,Bb,Cc}$	$u_i$	$i_0$
	23	-	$S_{Aa,Cb,Bc}$	$-u_i$	$i_0$
	24	-	$S_{Ba,Cb,Ac}$	$-u_i$	$i_0$
	25	-	$S_{Ba,Ab,Cc}$	$u_i$	$i_0$
	26	-	$S_{Ca,Ab,Bc}$	$u_i$	$i_0$
	27	-	$S_{Ca,Bb,Ac}$	$-u_i$	$i_0$

Група III відповідає випадку, коли величина та фаза кожного з векторів є змінними і містять 6 комбінацій, в яких кожна вихідна фаза пов'язана з різною вхідною фазою. Ця група векторів не використовується.

Розглянутий метод просторово-векторної модуляції перетворювача частоти матричного типу досліджувався в програмному пакеті MATLAB / Simulink. При розробці та побудові математичної моделі використовувався математичний аналіз МПЧ, спосіб представлення МПЧ, запропонований в науковій роботі італійського вченого Venturini [9], та бібліотеки Simulink, SimPowerSystems, SignalProcessingBlockset.

Імітаційна модель перетворювача частоти матричного типу з безпосереднім управлінням за методом просторово-векторної модуляції представлена на рис.2.

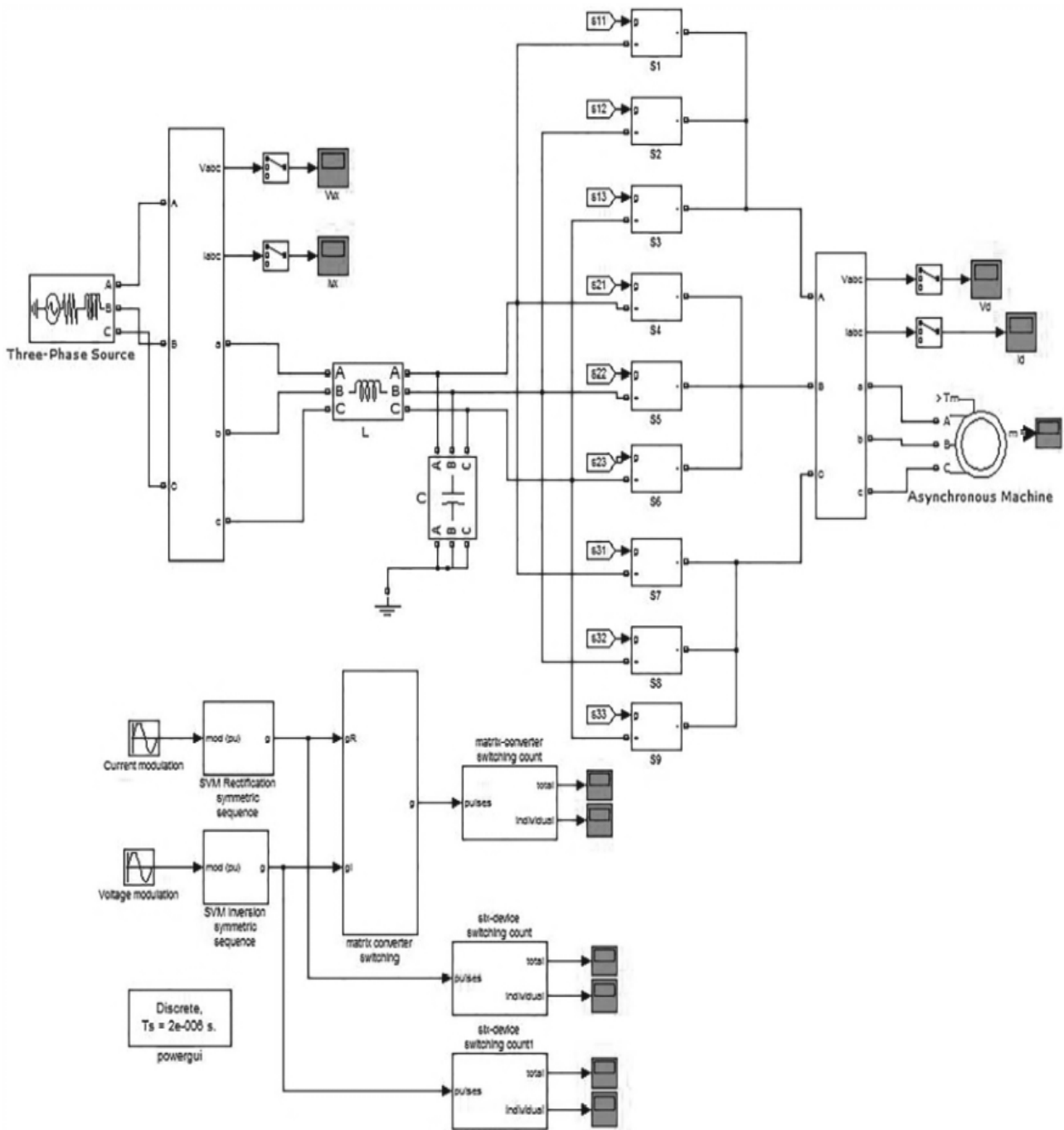


Рис. 2. Модель перетворювача частоти матричного типу

Основні вузли моделі: мережа живлення; ланка рекуперації електроенергії з системою управління транзисторами; ланка постійного струму з конденсатором фільтра (ЛПС); зовнішній регулятор швидкості; блок ПУМ (пряме управління моментом) з регуляторами моменту та потокозчеплення ротора АД; асинхронний двигун (АД); вузол формування пружного моменту навантаження (ВФПМ); контрольно-вимірювальні блоки.

На вході МПЧ встановлений LC фільтр, який забезпечує жорстку характеристику входу по напрузі і згладжування вхідного струму. Навантаженням МПЧ є трифазні обмотки асинхронного двигуна потужністю 2 кВт. Імітаційна модель містить наступні блоки:

- джерело змінного струму «Three-PhaseSource», що представляє собою живить трифазну електричну мережу;
- вхідний LC фільтр;
- перетворювач матричного типу, який містить 9 двонаправлених ключів (S1 ... S9), виконаних за схемою з загальним емітером;

- навантаження у виді трифазного асинхронного двигуна «AsynchronousMachine»;  
 - блоки просторово-векторної модуляції МПЧ «SVMRectificationsymmetricsequence» та «SVMInversionsymmetricsequence»; - блоки вимірювання електричних величин.

Отримані перехідні процеси свідчать про працездатність запропонованої системи керування швидкістю судин ШПМ з удосконаленою структурою системи керування. Також, отримані результати свідчать про працездатність комплексної імітаційної моделі системи електроприводу ШПМ в режимі рекуперативного гальмування.

Таким чином, система електроприводу з удосконаленою структурою ланки рекуперації і оптимізованої системою керування яка розроблена, більш ефективна, так як показала високі динамічні показники електроприводу в режимі рекуперативного гальмування. Використання розробленої системи електроприводу в режимі рекуперативного гальмування дозволяє на порядок підвищити енергоефективність електроприводу ШПМ.

## ВИСНОВКИ

Досліджено силові канали системи електропривода з удосконаленою структурою перетворювача частоти. Розроблена модель матричного перетворювача частоти може застосовуватися в машинах подвійного живлення, на виробничих лініях, на вантажно-розвантажувальних пристроях, ліфтах, підйомниках і ШПМ. Розглянуто метод просторово-векторної модуляції перетворювача частоти матричного типу. При цьому перспективним є подальший розвиток дослідження теорії енергозбереження в електроприводах змінного струму.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Alesina A., Venturini M. *The generalized transformer: a new bi-directional sinusoidal wave form frequency converter with continuous variable adjustable power factor // IEEE PESC'80. – 1980. – Pp. 242–252.*
2. Venturini M. *A new sine wave in, sine wave out conversion technique which eliminates reactive elements // POWERCON'80. – 1980. – Pp. E3/1-E3/15.*
3. Alesina A., Venturini M. *Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. January 1989, vol. 4, no.1, pp. 101-112.*
4. *Asynchronous operation of cycloconverter with improved voltage gain by employing a scalar control algorithm / G. Roy, L. Duguay, S. Manias, G. April // IEEE IAS Conference Record. – 1987. – Pp. 889–898.*
5. Alesina A., Venturini M. *Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, January 1989, vol. 4, no. 1. – Pp. 101–112. DOI:10.1109/63.21879*
6. Alesina A., Venturini M. *Intrinsic Amplitude Limits and Optimum Design of 9-Switches Direct PWM AC-AC Converters. IEEE PESC'88. – 1988. – Vol. 2. – Pp. 1284–1291.*
7. Vinogradov A. B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector Control AC Drives]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute Publ. – 2008. – 298 p.*
8. Vinogradov A. B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector Control of AC electric drives]. GOU VPO "Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina" [Ivanovo Power Engineering Institute Publ.]. – 2008. – 298 p.*
9. Venturini M. A. *New Sine wave in, Sine wave out Conversion Technique which Eliminates Reactive Elements. Proc. POWERCON'80. – 1980. – Pp. E3/1–E3/15.*

Стаття надійшла до редакції 09.12.2018 р.

УДК 681.518.54:334

Карягін Ж. Г.(КН-17-1м)

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЕЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНОГО ПРОЦЕСУ

*У статті були розглянуті основні напрями застосування імпульсних процесів, а також розглянутий метод найменших квадратів. Визначені переваги такого методу у порівнянні з іншими. Проведена регресійна обробка експериментальних даних на основі побудованої математичної моделі та розраховані опосередковані параметри для подальшого оптимізаційного аналізу.*

*In the article the main directions of the application of pulsed processes were considered, as well as the least squares method was considered. The advantages of this method are defined in comparison with others. The regression processing of experimental data on the basis of the constructed mathematical model is carried out and the mediated parameters for the further optimization analysis are calculated.*

У світі сучасних інформаційних технологій на сьогоднішній день важко назвати галузь, яка б при вивченні певної області не зверталася б до застосування імпульсних електричних токів. Такі імпульси можуть бути використані навіть в технологічних процесах обробки матеріалів [1–2] або в екологічних проектах [3–4]. І хоча у галузі проведення однофакторних експериментів сам процес потребує людської праці, завдяки якій моделюються певні моделі, які дозволяють вивчити певний процес або досліджуване явище, обійтися без використання імпульсних процесів вже здається чимось не реальним. Оцінка значень параметрів імпульсного процесу проводиться на основі обробки вхідних експериментальних даних, отриманих при проведенні експериментальних досліджень, обробка яких в ручному варіанті доволі складна та клопітлива праця, не вільна від людських помилок. Результатом імпульсної обробки являється спроба знайти оптимальну комбінацію вхідних величин завдяки методам математичної статистики [5] для того, щоб в результаті проектування технологічного процесу або експлуатації інформаційної системи отримати найбільш дієвий варіант машини, процесу або системи. При цьому інколи залишається потреба провести, використовуючи отримані оптимальні моделі, розрахунки значень опосередкованих параметрів, пряме дослідження яких неможливо, утруднено або не доцільно. Оцінка значень параметрів імпульсного процесу у вигляді обробки даних в такому разі полягає в побудові математичної моделі у вигляді емпіричних формул, які надають змогу експериментатору більш детально розібрати досліджувану область, і тому використання інформаційних технологій та розробка математичної моделі для автоматизації процесу та прискоренні обчислень оцінки значень параметрів імпульсного процесу являється актуальною.

Мета роботи – автоматизація розрахунків по обробці експериментальних даних та вибору математичної моделі з найкращім наближенням для подальшого оптимізаційного аналізу за рахунок дослідження методів, моделей та інформаційних технологій оцінки значень параметрів імпульсного процесу.

Використання імпульсних процесів для оцінки значень параметрів імпульсного процесу має ряд переваг перед іншими підходами. Таким чином використання математичного моделювання в сукупності з експериментальними установками має велике значення у разі, коли проведення натурального експерименту просто неможливо або утруднено причинами, пов'язаними з зовнішнім середовищем [6]. Перевага математичного моделювання очевидна. У моделі відображаються істотно значимі чинники та параметри досліджуваного об'єкта, які сприяють вирішенню поставлених проблем.



Для вирішення задач зумовлених метою даної роботи для побудови емпіричних формул був обраний метод найменших квадратів, суть якого полягає у вирішенні спеціального рівняння з підставленими коефіцієнтами, в якому з самого початку порушений баланс рівнянь. Такий метод у порівнянні з методами-аналогами має найменше за всіх недоліків при його доволі таки хорошій точності та універсальності застосування.

На першому етапі при роботі за умови, що експериментальні дані були завантажені, відсіюється так званий фоновий шум за умовою:

$$S(i) \leq Sf, \quad (1)$$

де  $S$  – значення робочого сигналу;

$i$  – номер рядка файлу;

$Sf$  – деяке фіксоване значення сигналу, яке установлює користувач виходячи з потреб розрахунку.

Наступним чином експериментальні дані оброблюються завдяки п'яти регресійних моделей (лінійна, степенева, показова, парабола другого порядку, та логарифмічна), з яких обирається найліпша для подальшого оптимізаційного аналізу.

$$y' = a_0 + a_1x, \quad (2)$$

$$y' = a_0 * x^\beta, \quad (3)$$

$$y' = a_0 * e^{bx}, \quad (4)$$

$$y' = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (5)$$

$$y' = a + bx + d * \ln x, \quad (6)$$

де  $y'$  – теоретичне значення функції або залежної змінної;

$a_0, a_1, a_2, \beta, b$  – коефіцієнти рівняння, які мають різні значення в залежності від специфікації досліджуваного явища;

$e$  – заснування натуральних логарифмів,

$x$  – аргумент або незалежна змінна.

Для розрахунку помилки рівняння регресії використовується формула:

$$m_{x*y} = \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{N - n}}. \quad (7)$$

де  $m_{x*y}$  – помилка рівняння регресії;

$\sum(y-y')^2$  – сума середніх квадратичних відхилень досліджуваної функції;

$y'$  – теоретичне значення функції;

$y$  – емпіричне значення функції;

$N$  – число точок емпіричної лінії регресії, за якими розраховувалось рівняння регресії;

$n$  – число коефіцієнтів рівняння, враховуючи вільний член.

Оцінка значень параметрів імпульсного процесу представлена на розрахунковому прикладі файлу типу \*.xlsx, в якому міститься напруга імпульсу та час дії цього імпульсу. Дані зведені у таблицю 1.

Експериментальні дані

Time	Napг
0	-0,1
0,1	-0,3
0,2	-0,2
0,3	1
0,4	10
0,5	15
0,6	30
0,7	40
0,8	41
0,9	42
1	-21
1,1	-22
1,2	-24
1,3	-25

Видаливши фоновий шум за формулою (1) отримаємо робочій діапазон досліджуван-них значень, після чого за умовою відсіємо фоновий шум.

Таблиця 2

Робочій інтервал

0,3	1
0,4	10
0,5	15
0,6	30
0,7	40
0,8	41
0,9	42

Опрацьовуючи робочій інтервал завдяки математичним методам регресійного аналізу по формулам (2–6) та розрахунку помилок рівняння регресії за формулою (6), отримаємо найліпшу математичну модель та її коефіцієнти.

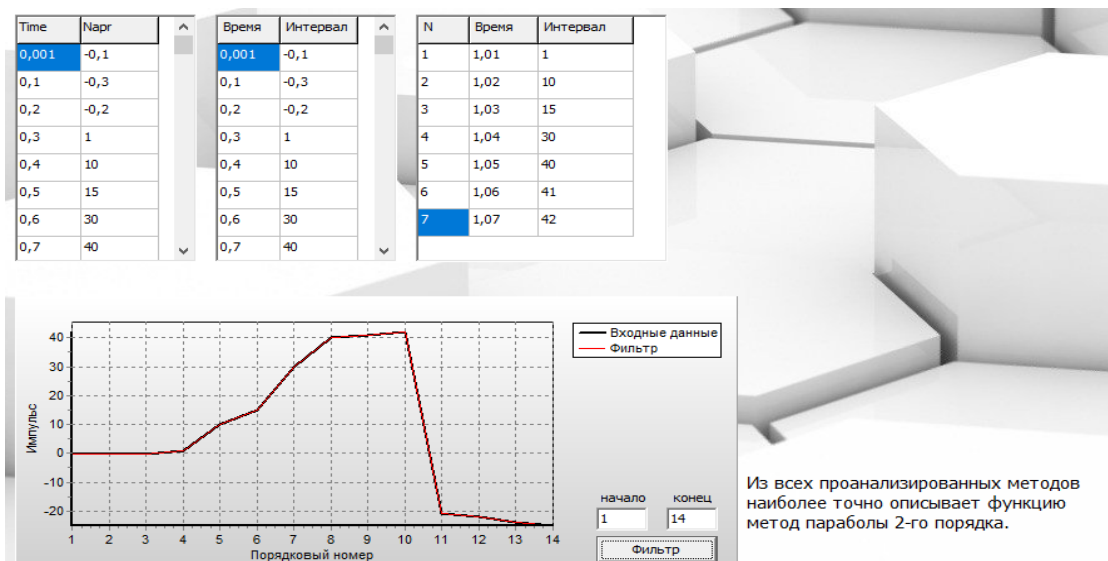


Рис. 1. Результати роботи програми

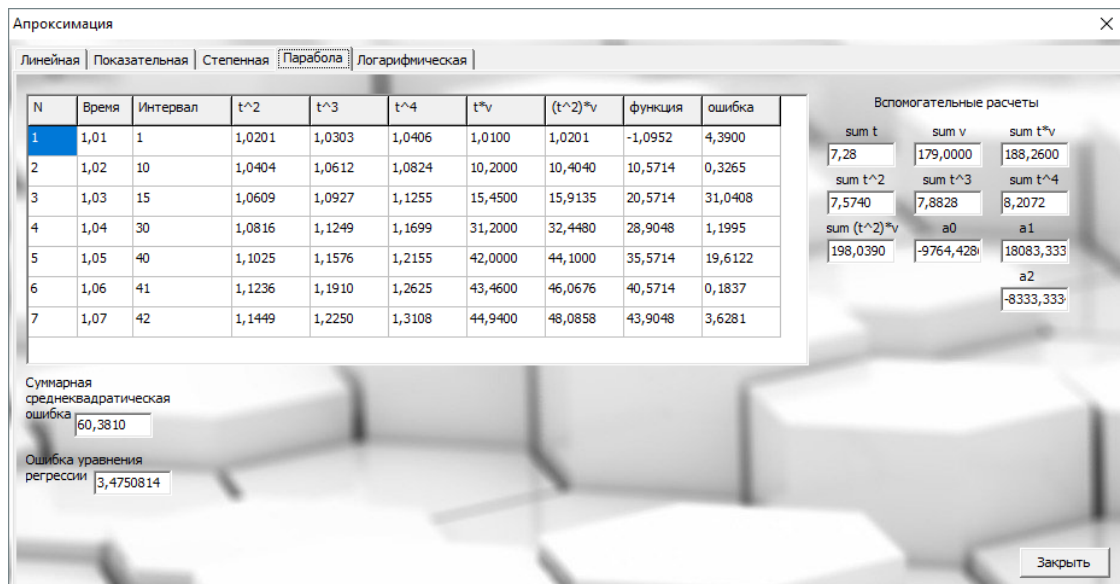


Рис. 2. Розрахунки найліпшої регресійної моделі

В результаті дослідження вдалося обрати найліпшу математичну модель для отриманих експериментальних даних. Такою моделлю стала «парабола другого порядку». Похибка рівняння регресії дорівнює 3,47. При додатковій обробці на основі найліпшої моделі можуть бути розраховані опосередковані параметри для подальшого оптимізаційного аналізу.

## ВИСНОВКИ

Дослідження методів, моделей та інформаційних технологій для розробки математичної моделі оцінки значень параметрів імпульсного процесу показали, що обробка експериментальних даних в автоматизованому варіанті розширяє можливості користувача та спрощує роботу експериментатора.

Числові значення, отримані в результаті роботи, мають високу точність, надійність та миттєву швидкість, за якої вони розраховуються, що, в свою чергу, звільняє експериментатора від рутинних розрахунків та людських помилок при обробці даних.

Розроблена інформаційна система повністю відповідає до поставленої мети завдання. Подальший напрямок розробки – збільшення критеріїв обробки експериментальних даних.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баранов М. И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности / М. И. Баранов // *Электротехника и электромеханика*. – 2009. – № 1. – С. 42–54.
2. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко. – Х. : МОСТ–Торнадо, 2003. – 288 с.
3. Рязанов Н. Д. Действие обеззараживающих факторов импульсного электрического разряда в воде / Н. Д. Рязанов, Е.Н. Перевязкина // *Электронная обработка материалов*. – 1984. – № 2. – С. 43–45.
4. Ресурсосберегающие технологии при производстве сварных заготовок / В. М. Семенов, А. В. Жартовский, В. И. Кабацкий, А. В. Кабацкий – Краматорск : ДГМА, 2009. – 160 с.
5. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
6. Mesyats G. A. High-speed processes during pulse breakdown of vacuum gaps / G. A. Mesyats, E. A. Litvinov, D. I. Proskurovsky // *Proe. of IV-th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Waterloo, Canada, 1970. – P. 82–96.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2019 р.

УДК 681.521.4

Коробкін В. О. (АВП-17-2м)

## КОНТРОЛЬ СТУПЕНЮ ЗАВЕРШЕНОСТІ ПРОЦЕСУ ГРАФІТАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

*Вирішення проблеми підвищення ефективності процесу графітації вугільних електродів багато в чому визначається умовами технологічного процесу, а саме завершальної його стадії. Контроль ступеню завершеності процесу графітації на даний час проводиться за досягненням заготовкою певної температури, що є досить неточним показником. У статті розглянутий спосіб контролю ступеню завершеності процесу графітації за допомогою сигналів акустичної емісії, що генеруються заготовкою під час термічної обробки.*

*Solving the problem of increasing the efficiency of the process of graphitization carbon electrodes is largely determined by the conditions of the technological process, and in particular its final stage. The control of the degree of completeness of the process of graphitization is currently carried out after the achievement of the blank of a certain temperature, which is a rather inaccurate indicator. In the article a way of controlling the degree of completeness of the graphitization process by means of acoustic emission signals generated by the blank during heat treatment is considered.*

Процес графітації є завершальним термічним технологічним етапом у виробництві графітованих електродів для дугових сталеплавильних печей, і його вплив на якість отриманої продукції є найбільш суттєвим. Необхідність підвищення якості графітізованої речовини в наш час пов'язана у першу чергу з масовим переходом електросталеплавління у режим роботи на печах високої та надвисокої потужності, а зростання попиту вимагає прискорення виробництва якісного продукту.

Графітація карбонової речовини – це процес впорядкування атомів карбону, що утворюють структуру графіту під впливом високих температур. На даний момент головним фактором, що визначає якість графітації це кінцева температура.

Процес графітації проводять в спеціальних електричних печах. В промисловості отримали широке розповсюдження печі графітації прямого нагріву (ППН) або печі Кастнера.

ППН являє собою електричну піч спротиву, де карбонові заготовки, що виступають в якості елементу конструкції печі, оточені шаром теплоізоляційної карбонової шихти, є активним електричним спротивом навантаження в загальному ланцюгу агрегату графітації: джерело електропостачання – металеві шино проводи – піч. Під час нагріву в електродних заготовках виникають температурні градієнти за радіусом і, отже – термічні напруги. Встановлено, що за необґрунтовано великої швидкості нагріву заготовки розтріскуються. При занадто повільному нагріву процес затягується, що призводить до збільшення втрат тепла через теплоізоляцію і, як наслідок, перевитраті електроенергії, зниженню продуктивності та збільшенню теплового навантаження на вогнестійку футеровку печі.

Контроль завершеності процесу графітації проводиться за досягненням певної температури, та дотриманням технологічного процесу, і як зазначено вище, цей процес є недосконалим, що залишає простір для підвищення ефективності процесу.

Одним з аспектів що дозволяє зменшити витрати часу на виготовлення графітованих електродів, та підвищити їхню якість – це збільшення точності визначення завершеності процесу графітації безпосередньо під час термообробки.

У вивченні проблеми контролю графітації слід звернутися до праць [1, 2]. У них викладені результати експериментальних досліджень процесу графітації у високотемпературному режимі, які доводять зв'язок між генерацією імпульсів акустичної емісії у заготовці та утворенням тріщин і ступенем завершеності процесу графітації для карбонового матеріалу заготовки.

Однак відсутність запропонованих практичних застосувань цих досліджень доповнюється даною роботою.

Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу графітації з використанням методу акустичної емісії.

Мета дослідження зумовила необхідність вирішення наступних завдань: проаналізувати залежність швидкості зчитування акустичної емісії, випромінюваної заготовкою під час термообробки, від стану заготовки, що графітується.

Процес тривимірного упорядкування атомів карбону в графітову гратку для різних вуглецевих матеріалів [4] розглядають як різний фазовий перехід першого роду, в якому фактором, що зумовлює залежність ступеню графітації та параметрів акустичної емісії, виступають фазові флуктуації.

Встановлено, що починаючи з температури 2000 °С матеріали що графітуються, випромінюють сигнали з певною періодичністю, амплітудне розподілення яких в температурному діапазоні 2000–2300 °С вказане на рис. 1.

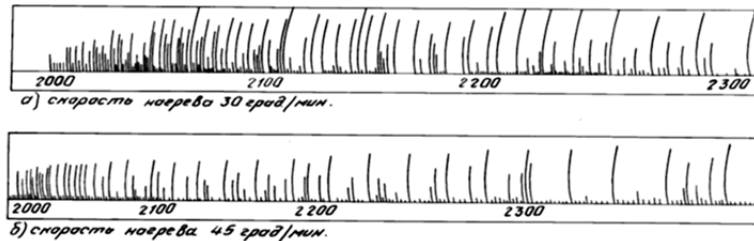


Рис. 1. Амплітудне розподілення сигналів в температурному діапазоні 2000–2300 °С

Під час нагріву, за допомогою графітового звуководу, прокладеного всередині заготовки, та системи зчитування, контролюються сигнали акустичної емісії, випромінювані матеріалом. Згідно з завчасно побудованим графіком зчитування імпульсів акустичної емісії за ступенем графітації вуглецевого матеріалу, визначають показник, відповідний заздалегідь заданій величині ступеню графітації вуглецевого матеріалу. Приклад вказаної залежності зображений на рис. 2.

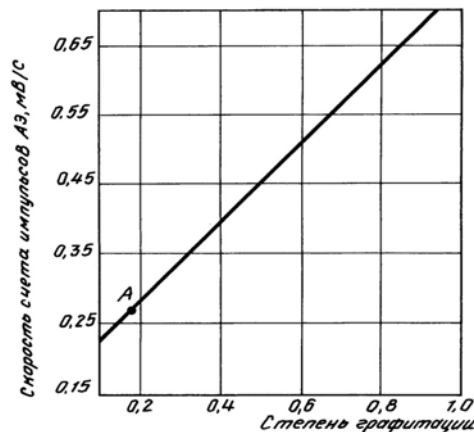


Рис. 2. Приклад залежності швидкості зчитування імпульсів акустичної емісії за ступенем графітації

Цей показник визначається один раз і в подальшому може використовуватись для даного типу карбонової речовини.

Запропонована система дозволяє вести оперативний нагляд за процесом графітації, під час самої термічної обробки, зокрема за утворенням тріщин, що прямим чином впливає на якість графітованої речовини. Сигнал на завершення процесу графітації подається за досягненням експериментально встановленої швидкості зчитування сигналів акустичної емісії для даного типу графітової речовини, дозволяючи зменшити витрати часу на виготовлення, завдяки більш точному визначенню готовності матеріалу, що одночасно впливає і на якість готової продукції. Приклад алгоритму програми для системи вказано на рис. 3.

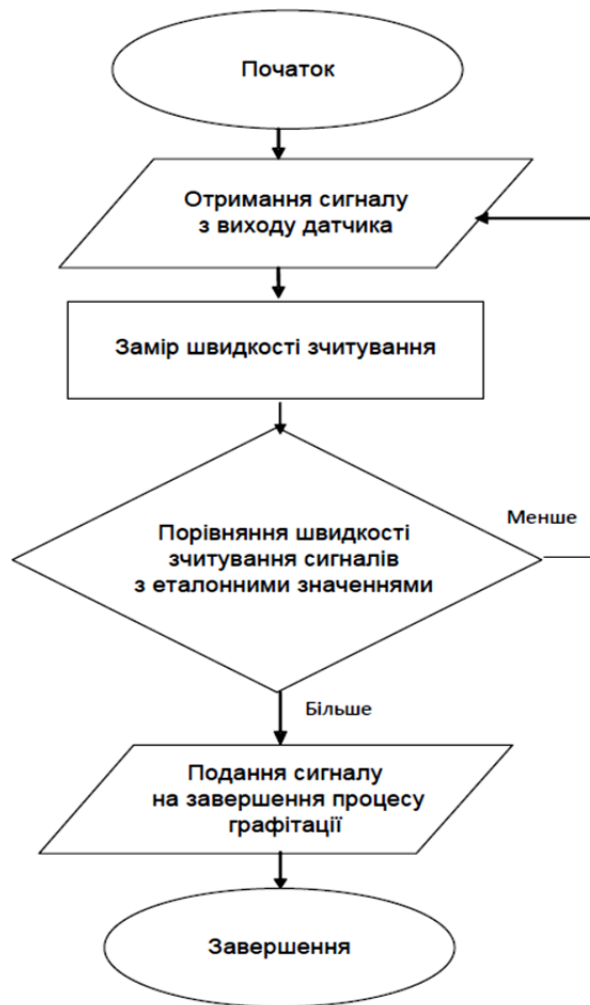


Рис. 3. Приклад алгоритму програми для розробленої системи

## ВИСНОВКИ

Запропонований контроль ступеню завершеності процесу графітації вугільних електродів для дугових сталеплавильних печей який здійснюється за допомогою автоматизованої системи контролю побудованої на засадах неруйнівного контролю, а саме – швидкості зчитування сигналів акустичної емісії, що утворюються під час процесу графітації, підвищує ефективність процесу, по перше – скороченням витрат часу, а відповідно і енергії на виготовлення одиниці продукту, по друге – підвищенням якості виробу.

Крім того запропонований спосіб дозволяє не тільки поточнити момент завершеності процесу, але й проводити його до заданого ступеню графітації, що розкриває значні економічні перспективи для виробників продукції, та впевненість у якості товару для її споживачів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов Д. М. Метод акустической эмиссии на Новочеркасском электродном заводе / Д. М. Кузнецов // В мире неразрушающего контроля. – 2000. – № 1(7).
2. Кузнецов Д. М. Факторы, влияющие на эксплуатационную стойкость графитированных электродов в дуговых электропечах / Д. М. Кузнецов, В. К. Коробов // Металлургия. – 2000. – № 6.
3. Lefrank P. A., Jones W. H., Wetter R. G. Recent Status of DC Electrode Applications. In: SGL CARBON's response to the DC furnace challenge. – 1999.
4. Фиалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А. С. Фиалков. – М. : Аспект Пресс, 1997.

Стаття надійшла до редакції 06.12.2018 р.

УДК 681.5:51-74

Кохан Д. С. (АПП-17-1зт)

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ ПЛАВКИ В ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ

*Досліджені керуючі параметри температурного режиму відновлювального періоду плавки металу в дугових сталеплавильних печах та технологічних комплексах «Піч-Ківиш». Проведено математичне описання і аналітичне рішення системи диференціальних рівнянь крайової задачі тримірного нестационарного теплообміну на основі інтегрально-диференціальних рівнянь теплопровідності. Отримане аналітичне рішення дозволило дослідити зміну температури розплаву в залежності від величини потужності на дузі, маси металу і шлаку в печі. В результаті теоретичних досліджень процесу теплообміну в замкнутому просторі печі побудовані поверхні зміни температури розплаву по глибині ковша при дуговому підігріві.*

*Operating parameters of a temperature mode of the regenerative period of fusion of metal in arc steel-smelting furnaces and technological complexes "Furnace-ladle" are investigated. Is spent the mathematical description and the analytical decision of system of the differential equations of a regional problem of three-dimensional non-stationary heat exchange on the basis of the integralno-differential equations of heat conductivity. The received analytical decision allows to investigate temperature change melt depending on power size on an arch, weights of metal and slag in the furnace. As a result of theoretical research of process of heat exchange in the closed space of the furnace surfaces of change of temperature melt on depth of a ladle are constructed at arc heating*

У даний час метал є основним конструктивним матеріалом для машинобудівного, суднобудівного та інших металомістких виробництв. В Україні зосереджено значну кількість металургійних підприємств, на яких більш якісні сталі виплавляються в дугових сталеплавильних печах (ДСП). Якість сталі, що виплавляється визначається його хімічним складом і підтриманням температурного режиму плавки в окислювальний і відновний період з точністю  $\pm 10^\circ\text{C}$ . На практиці операції контролю температури рідкого металу здійснюються періодично в ручному або напівавтоматичному режимі з інтервалами 15–20 хв. Періоди без спостереження процесу (між процедурами вимірювань) викликають ризик перегріву металу, що може позначитися на якості сталі і призвести до зайвої витрати споживаної енергії.

До теперішнього часу механізми управління з урахуванням графіка температурного режиму плавки не вироблені, так як мають місцем невизначеності взаємозв'язків технологічних параметрів, перш за все, маси розплаву, необхідної кількості електроенергії. У цих умовах для зазначених об'єктів стає очевидною необхідність розробки математичних моделей взаємозв'язку теплових і енергетичних параметрів, і створення автоматизованої системи управління тепловим режимом плавки, яка забезпечить стабільність якості виплавленої сталі при мінімальних енерговитратах. У зв'язку з цим розробка механізмів скорочення теплових втрат, а також алгоритмів управління тепловим режимом плавки в ДСП в відновлювальний період плавки є актуальною науково-технічною задачею.

Метою роботи є підвищення якості металу і ефективності плавки шляхом автоматизації процесу управління тепловим режимом плавки рідкого металу з використанням математичних методів, алгоритмів, інформаційного та програмного забезпечення.

Обґрунтована актуальність дослідження, проаналізовані роботи дослідників: Альтгаузена А. П., Гітгарца Д. О., Нікольського О. Є., Пірожникова В. Є., Ігнатова І. І., Хайнсона О. В., Сапко О. І. і ін. Аналіз результатів досліджень дозволив сформулювати наступні не вирішені питання:

1. Не вирішена задача визначення поточних значень теплових втрат, які характеризують рівень впливів, що збурюють процес.

2. Аналіз сучасних систем керування ДСП і результатів їхнього функціонування виявив, що при використанні періодичних способів контролю температури металу у відновлювальний період плавки температура розплаву може відхилитися від заданої більш, ніж на  $\pm 10^\circ\text{C}$ , що може спричинити перевитрату електроенергії викликану перегрівом металу та погіршення фізико-хімічних властивостей кінцевого продукту через не дотримання температурного режиму плавки.

При побудові математичної моделі ЕПП за основу прийнятий технологічний процес обробки рідкого металу у відновлювальний період плавки, конструктивні особливості ДСП. Для побудови математичної моделі запропоновано експериментально-аналітичний метод. У ході вивчення закономірностей теплових процесів, що відбуваються у відновлювальний період плавки і, які впливають на температуру розплаву, розроблена структура моделі (див. рис. 1) у вигляді двох взаємодіючих частин: електричної та теплової.

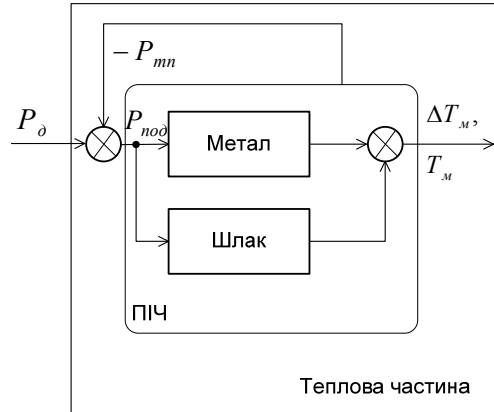


Рис. 1. Структура теплової математичної моделі ДСП

Виявлено керуючі параметри, від яких залежить зміна керованих величин – температури  $T_m$  і швидкості нагріву  $\Delta T_m$  рідкого металу. Таким параметром є величина підведеної потужності в піч  $P_{под} = P_\delta - P_{вт}$ , що визначається, як різниця потужностей на електричній дузі  $P_\delta$  (1) і теплових втрат  $P_{вт}$  [1].

Потужність на електричній дузі у  $\kappa$ -фазі, МВт:

$$P_{\delta\kappa} = \frac{1}{T_\delta} \int_0^{T_\delta} u_{\delta\kappa}^2(t) g_\kappa(t) dt, \quad (1)$$

де  $T_\delta$  – постійна часу дуги, при рафінуванні становить (3...8) мс;  $u_{\delta\kappa}(t)$  – діюча напруга на електричній дузі;  $g_\kappa = 1/R_{\delta\kappa}(t)$  – провідність електричної дуги, Ом<sup>-1</sup>;  $\kappa=1,2,3$  – номер фази пічного трансформатора.

Регулювання величини підведеної в піч потужності і напруги на електричній дузі здійснюється шляхом перемикавання шаблів напруги ( $\mathcal{N}_{zm}^2$ ) на пічному трансформаторі та варіюванням величини сили струму шляхом зміни міжелектродного проміжку.

Математична модель теплових параметрів шлаку і розплаву в ДСП при дуговому підігріві описана системою диференціальних рівнянь теплопровідності Фур'є [2, 3].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_m \cdot M_m} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

де  $t$  – час;  $z$  – координата, вздовж, якій здійснюється теплоперенесення зі швидкістю  $a = \frac{1}{C_m \cdot M_m}$ .

Рішенням рівняння (2), що задовольняють початковій умові:

$$T(0, x) = T_{нач}(x) \text{ при } t = 0, 0 < z \leq l \quad (3)$$

і граничній умові



$$T(t,0) = T_{ex}(t) \text{ при } z = 0, t > 0, \quad (4)$$

є

$$T(t,l) = \begin{cases} T_{нач}(l-ta), t < \frac{l}{a}; \\ T_{ex}\left(t - \frac{l}{a}\right), t \geq \frac{l}{a}. \end{cases} \quad (5)$$

З рішення (2) випливає, що передача тепла від шару схильного безпосередньому нагріву до кінцевого шару відбувається через час  $\tau$ . Виходячи з вище сказаного, можна уявити передавальну функцію ідеалізованого теплоперенесення в ковші печі у вигляді:

$$W(p) = \frac{1}{(1 + \tau p)^n} \quad (6)$$

Рішення рівнянь (2) отримано в аналітичному виді. При рішенні прийняті припущення з рівномірного розподілу потужності у фазах короткої мережі і температури в шарах рідкого металу.

Побудова динамічної моделі теплового процесу плавки металу в ДСП здійснюється на основі наведених вище рівнянь і відповідних узагальнених передаточних функцій для розглянутих математичних описів теплоперенесення

В процесі теплообміну беруть участь два тіла – рідкий метал і футерування. Зміна температури кожного тіла може бути представлено аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням або без нього. Запізнення вноситься в тих випадках, коли тіло що нагрівається не відразу реагує на підведене тепло, при зміні ступеня напруги пічного трансформатора. Як зазначалося вище, футеровка по міру нагрівання акумулює тепло в метал і швидше реагує на зміну потужності, що підводиться, ніж ванна рідкого металу. З огляду на це, передавальну функцію печі можна представити у вигляді:

$$W_{печи}(p) = W_m(p) + W_\phi(p) = \frac{\Delta T_m(p)}{P_{под}(p)} = \frac{K_m \cdot e^{-\tau \cdot p}}{1 + T_m \cdot p} + \frac{K_\phi}{1 + T_\phi \cdot p}, \quad (7)$$

З метою визначення правдивого характеру зміни теплових параметрів плавки математичне моделювання проводилося в два етапи. На першому етапі була отримана залежність зміни температури розплаву, коли в якості джерела підведеної потужності було прийнято  $P_{под} = P_D$ . Таке рішення не було адекватним реальним тепловим процесам, які протікають у печі, тому що не враховувалася величина потужності теплових втрат. На другому етапі проведена оцінка величини потужності теплових втрат через інші контрольовані параметри. У результаті експериментів і пасивних спостережень було встановлено, що величина теплових втрат залежить від типорозміру сталеплавильного ковша, маси розплаву і величини потужності на електричній дузі. Для визначення величини теплових втрат по всій кампанії плавки розроблена математична модель [4].

$$\Delta P_{mn}(p) = \left( \frac{1}{\frac{K_m}{T_m \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau p} + \frac{1}{T_\phi p + 1}} \right) \cdot \Delta T'(p). \quad (8)$$

Вихідним параметром моделі є поправка величини підведеної потужності в піч, а вхідним – оцінка температури рідкого металу  $\Delta T' = T_{мсп}^{мод}(t) - T_{мсп}^{изм}(t)$ , обумовлена як різниця

між змодельованою усередненою температурою по об'єму розплаву  $T_{мсп}^{mod}(t)$  і отриманої дослідним шляхом  $T_{мсп}^{изм}(t)$  у певні проміжки часу між вимірами температури  $\Delta t$ :

Оцінка величини потужності теплових втрат дозволила: визначити значення модельної потужності підведеної в піч, як  $P_{под} = P_d - P_{mn}$ , а також заповнити та корегувати, значення потужності теплових втрат у базі даних відповідно до розробленого алгоритму. Завдяки чому удалось зменшити погрішність швидкості нагріву до  $0,14 \text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$  і накопичену величину погрішності температури розплаву при моделюванні за всю кампанію плавки до  $8,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

За результатами теоретичних досліджень теплообміну в замкнутому просторі печі отримані поверхні зміни температури в процесі нагріву розплаву, а також графіки зміни в часі: усередненої по об'єму температури та швидкості нагріву рідкого металу, які залежать від потужності електричної дуги, теплових втрат, а також маси розплаву (див. рис. 2). Проведене моделювання показало, що протікання теплових процесів має затяжний характер. Електричні параметри плавки визначають не тільки температуру та швидкість нагріву рідкого металу, а також величини теплових втрат.

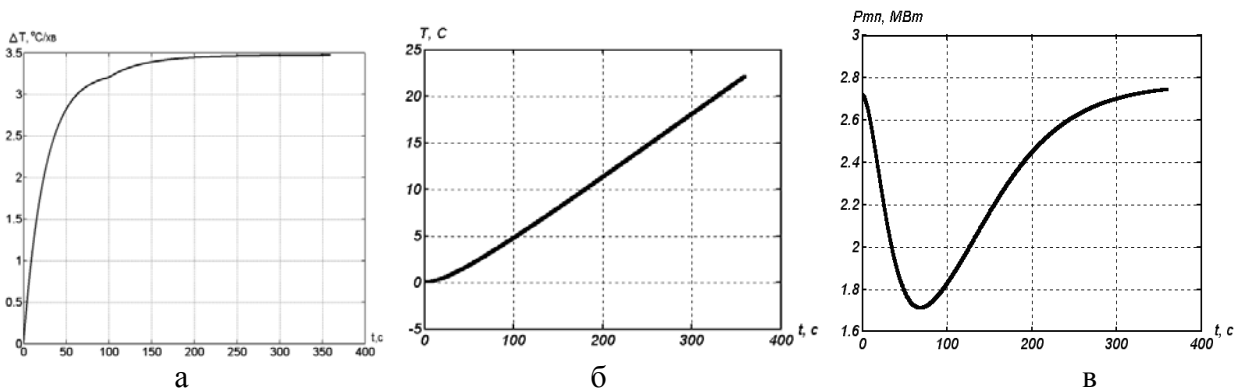


Рис. 2. Графіки зміни у часі усереднених по об'єму розплаву:

а – зміни швидкості нагріву; б – зміни температури рідкого металу; в – потужності теплових втрат  $P_{mn}$

Розроблена математична модель ЕПП дає можливість побудови автоматизованої системи керування тепловим режимом плавки та оцінки значення температури розплаву по всій кампанії плавки.

## ВИСНОВКИ

Отримали подальший розвиток математичні моделі теплових параметрів процесу плавки рідкого металу. На моделі отримані залежності зміни температури і швидкості нагріву розплаву в часі, з урахуванням, що змінюються в процесі відновного періоду плавки електричної потужності дуги і технологічних параметрів.

Розроблено математичну модель теплових параметрів плавки, на якій досліджені перехідні процеси і залежності, що описують взаємодію електричних і теплових параметрів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Никольский А. Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / А. Е. Никольский. – М. : Металлургия, 1981. – 320 с.
2. Гитгарц Д. А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ / Д. А. Гитгарц. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 136 с. – (Б-ка электротермиста; Вып. 73).
3. Егоров А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
4. Разживин А. В. Автоматизация процесса управления тепловым режимом плавки в электротермических печах. Монография : Научное издание. – Краматорск : ДГМА, 2011. – 132 с.

УДК 681.5:51-74

Лобинцев М. А. (АПП-17-1зт)

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ СЛЯБА У ЗВАРЮВАЛЬНІЙ ЗОНІ МЕТОДИЧНОЇ ПЕЧІ

*Дослідження особливостей технологічного процесу нагріву сляба у методичній печі, встановленні параметрів процесу керування. Удосконалена математична моделі і алгоритму температурного нагріву у зварювальній зоні. Запропонована автоматизована система керування режимом конвекційного теплообміну у зварювальній зоні методичної печі шляхом регулювання витрати газоповітряної суміші на горіння.*

*Investigation of the technological process of heating the slab in a methodical furnace, setting parameters of the control process. Improved mathematical model and algorithm of temperature heating in the welding zone. The automated control system of the convection heat exchange mode in the welding zone of the methodical furnace is proposed by controlling the flow rate of the gas-combustion mixture.*

Нагрів металу в методичній печі є найважливішою технологічною операцією, в значній мірі визначає економічні показники виробничого процесу в цілому. Технологія прокатки пред'являє жорсткі вимоги до якості нагріву. Розподіл температур по перетину заготовки, що забезпечує необхідну пластичність металу, має бути досягнуто за певний час без надмірного перегріву поверхні металу. Нагрівальні пристрої повинні забезпечити конвекційний нагрів металу в умовах змінного ритму роботи стану і при мінімальному витрачання палива. Якість нагріву визначається обраним графіком нагріву металу, тобто швидкістю і тривалістю нагріву в кожній із зон методичної печі. Кожному графіку нагріву відповідають кінцева температура поверхні металу, нерівномірність температур по перетину заготовки і величина угару металу. Дотримання такого графіка забезпечується високою температурою відхідних газів. Застосування його особливо доцільно при нагріванні товстих заготовок, так як теплопровідність металу зменшується з підвищенням його температури. З підвищенням температури в зварювальній зоні тризонних печей необхідний час витримки в томильній зоні часто подовжується більшою мірою, ніж скорочується час нагрівання в методичній та зварювальній зонах. У зв'язку з цим розробка визначення оптимального значення температури зварювальній зоні, для нагріву металу до заданих кондицій, яка відповідає в першу чергу, заданій нерівномірності температур по перетину заготовки є актуальною науково-технічною задачею.

Метою дослідження є підвищення економічної ефективності нагріву сляба у методичній печі за рахунок впровадження системи автоматизованого управління стабілізації температурного режиму зварювальній зоні.

Для отримання математичної моделі процесу нагрівання заготовок в методичній печі необхідно вирішити такі завдання:

- отримати динамічну модель температурного профілю печі;
- отримати математичний опис процесу нагріву заготовок;
- температури поверхні, але і її розподілу по перетинах;
- розробити структуру моделі процесу нагрівання заготовок в МНП з урахуванням зв'язності параметрів технологічних модулів.

Для математичного моделювання технологічних процесів теплової обробки матеріалів зручнішим в інженерному відношенні і універсальним являється перший метод побудови, що базується на фізичних законах теплопередачі: випромінюванням (закони Планка, Стефана - Больцмана, Ламберта та ін.), конвекції (закон Ньютона - Ріхмана), теплопровідністю (закон Фур'є) [1].

Для вирішення завдань управління технологічними процесами теплової обробки матеріалів найширше використовується математична модель нагріву масивного тіла з урахуванням ефектів теплопередач:

Проведено дослідження температурних режимів нагріву металу в багатозонних методичних печах з дуттьовими пальниками типу «труба в трубі» показує, що розподіл температури робочого простору по довжині зони носить істотно нерівномірний характер. Для всіх зон печі характерна екстремальність температурного профілю з перепадом температур по довжині зони до 100 °С. Однак в роботах, присвячених моделюванню і управлінню процесами нагріву металу, ця обставина до теперішнього часу не враховувалося.

Аналіз отриманих в результаті експериментів даних дозволяє визначити сукупність параметрів [1,2,3], що роблять найбільший вплив на вигляд температурного профілю зони методичної печі, це:  $G_T$  — витрата палива;  $G_0$  — співвідношення паливо-повітря;  $Q_H$  — теплота згоряння опалювального газу;  $M$  — продуктивність печі. Таким чином, моделювання температурного профілю печі зводиться до визначення функціональної залежності:

$$T_{II}(y, \tau) = \Phi[G_T(\tau), G_0(\tau), Q_H(\tau), M(\tau), y], \quad (1)$$

де  $T_{II}(y, \tau)$  — температурний профіль зони печі;  $y$  — координата по довжині зони печі,  $0 < y < X$ ,  $X$  — довжина всієї зони;  $\tau$  — час.

Для визначення виду функціоналу  $\Phi$  використовують відомі методи моделювання об'єктів автоматичного регулювання на основі статичних та динамічних характеристик. Припустимо, що в зоні встановлено  $n$  термопар і  $i = 1 \dots n$  — номер термопар. Тоді для кожної термопарі можна записати наступні рівняння:

$$T^i(p) = H_G^i G_T(p) + H_{G_0}^i G_0(p) + H_{Q_H}^i Q_H(p) + H_M^i M(p), \quad (2)$$

де  $H_G^i, H_{G_0}^i, H_{Q_H}^i, H_M^i$  — передаточні функції за відповідним каналом для  $i = 1 \dots n$ .

Передаточні функції по каналам температури печі-витрата палива, співвідношення паливо-повітря, продуктивність печі, теплота згоряння являють собою статичний об'єкт першого порядку з запізненням

$$H_v^i(p) = \frac{k_v e^{-p\tau_0^i}}{(\tau_a^i p) + 1}, \quad (3)$$

де індекс  $v$  може приймати значення:  $G, G_0, Q_H, M$  для відповідних передаточних функцій;  $k_v$  — відповідний коефіцієнт передачі;  $\tau_a^i, \tau_0^i$  — постійна часу та запізнення термопарі  $i$ .

Найважливішим параметром, що характеризує роботу пічного агрегату, є температура металу заготовок що нагріваються.

Для математичного моделювання процесу нагрівання в системах управління температурним режимом зон можна використовувати більш спрощені математичні моделі, що враховують процеси, управління якими забезпечують необхідне кінцеве становище заготовки, що видається з печі. Таким процесом є власне нагрівання заготовки по всій довжині печі з протягом часу, а динамічна модель, що описує його матиме вигляд [1]:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right] \quad (4)$$

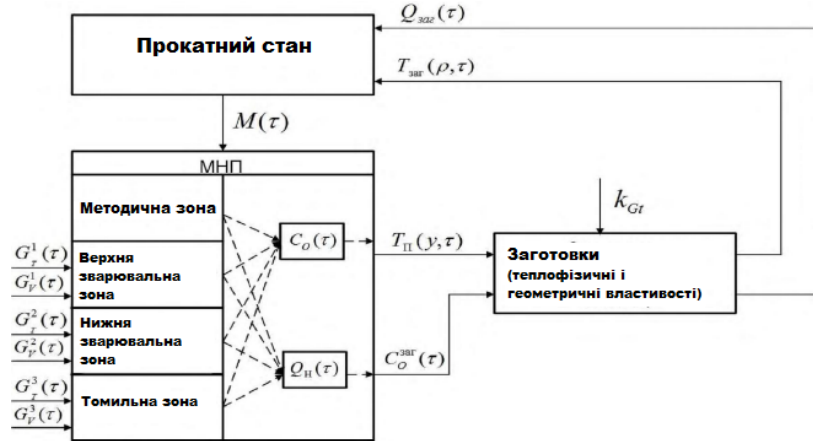
$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \sigma_1 \left\{ [T_{II}^1(y, \tau)]^4 - [T(0, \tau)]^4 \right\} + \alpha_1 [T_{II}^1(\tau)] - [T(0, \tau)] \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(s, \tau)}{\partial x} = \sigma_2 \left\{ [T_{II}^2(\tau)]^4 - [T(s, \tau)]^4 \right\} + \alpha_2 [T_{II}^2(\tau)] - [T(s, \tau)] \quad (6)$$

$$T(X, U) = T_0(X) \quad (7)$$

Математична модель (4)-(7) задає розподіл температури  $T(X, \tau)$  в заготовці по її перетину і часу і дозволяє більш точно описати процес нагріву з урахуванням залежності теплофізичних характеристик металу від температури.

В результаті аналізу та узагальнення вищевикладеного матеріалу виконаний синтез структури моделі процесу нагрівання заготовок в МНП з урахуванням продуктивності прокатного стану (см. рис. 1).



$G_T^i(\tau), G_V^i(\tau), i = 1, 3$  відповідно витрати палива і повітря для  $i$  зон;  $C_0(\tau)$  - співвідношення паливо-повітря загальне по печі;  $Q_H(\tau)$  — сумарна по печі теплота згоряння палива;  $T_{II}(y, \tau)$  — температура печі;  $C_0^{zac}(\tau)$  — співвідношення паливо-повітря, при якому нагріваються заготовки;  $k_{Gi}$  — коефіцієнт передачі по каналу витрата палива – температура поверхні заготовки;  $T_{zac}(\rho, \tau)$  — температура заготовок;  $Q_{zac}(\tau)$  — кількість заготовок;  $M(\tau)$  — продуктивність прокатного стану.

Рис. 1. Структурна схема математичної моделі процесу нагрівання заготовок в МНП

Температура в печі визначається інтенсивністю підведення і спалювання палива і в цьому сенсі вона є регульованим параметром. В даному випадку температура в печі – перша вихідна змінна для МНП.

Дослідження динамічних характеристик показує, що:

1. Передаточні функції (ПФ) по каналах температура в зоні печі - витрата палива, продуктивність печі, теплота згоряння є виразом:

$$W_v(p) = \frac{k_v e^{-p\tau}}{Tp + 1} \quad (8)$$

де індекс  $v$  може приймати одне з наступних значень:  $G_T$  – витрати палива,  $Q_G$  – теплота згоряння опалювального газу,  $M$  – продуктивність печі;  $k_v$  – відповідний коефіцієнт передачі;  $p$  – оператор Лапласа;  $\tau$  – запізнювання.  $T$  – постійна часу.

2. ПФ по каналу співвідношення «газ-повітря» в зоні печі - витрата повітря:

$$W_{C_0}(p) = \frac{k_{iC_0} e^{-p\tau}}{Tp + 1} \quad (9)$$

Для ПФ співвідношення паливо-повітря коефіцієнт передачі  $k_{iC_0}$  в  $i$ -ої зоні печі згідно (9) може бути знайдений за формулою:

$$k_{iC_0} = \frac{\Delta t_i}{\Delta C_0^i} \quad (10)$$

де  $\Delta t$  - зміна температури в  $i$ -ої зоні печі;  $\Delta C_0^i$  - відхилення  $\Delta$  співвідношення паливо-повітря від оптимального значення в  $i$ -ої зоні печі. Чисельно співвідношення «газ-повітря» визначається так званим коефіцієнтом витрати повітря, зазвичай позначається  $\alpha$ .

Коефіцієнт витрати повітря дорівнює [2,3]:

$$\alpha = \frac{B_v}{B_v^0} = \frac{B_v}{V_v^0 G_T}, \quad (11)$$

де  $B_v$  - дійсний витрата повітря;  $B_v^0$  - теоретичний витрата повітря, необхідний для повного спалювання газу;  $V_v^0$  - теоретичне кількість повітря, необхідне для повного спалювання одиниці газу;  $G_T$  - витрати палива.

Схема взаємозв'язку між вихідними і вхідними змінними приведена на рис. 2.

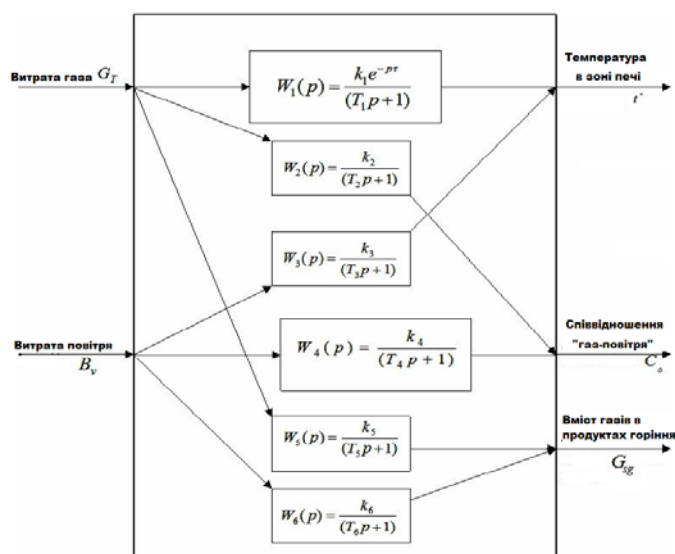


Рис. 2. Схема взаємозв'язку між вихідними і вхідними змінними в зварювальній зоні МНП

Для моделювання використаний пакет прикладних програм MatLab. На підставі розробленої схеми взаємозв'язку розроблена структурна схема багатозв'язної системи з дійсними елементами передавальних функцій в Simulink MatLab (див. рис. 3)

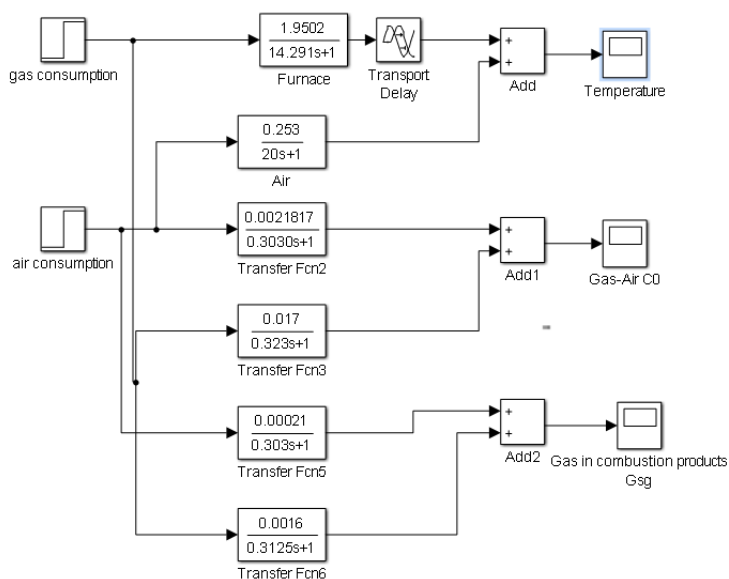


Рис. 3. Структурна схема математичної моделі МНП в MatLab

При моделюванні прийняті наступні розрахункові параметри:

– температура продуктів згоряння в верхніх зонах печі:  $T_I^B = 1220$  °С;  $T_{II}^B = 1343$  °С;  
 $T_{III}^B = 1380$  °С;  $T_{IV}^B = 1300$  °С;

– температура продуктів згоряння в нижніх зонах печі:  $T_I^H = 1010$  °С;  $T_{II}^H = 1110$  °С;  
 $T_{III}^H = 1320$  °С.

За результатами математичного моделювання отримані графіки зміни температури сляба по зонах печі, які представлені на рис. 5.

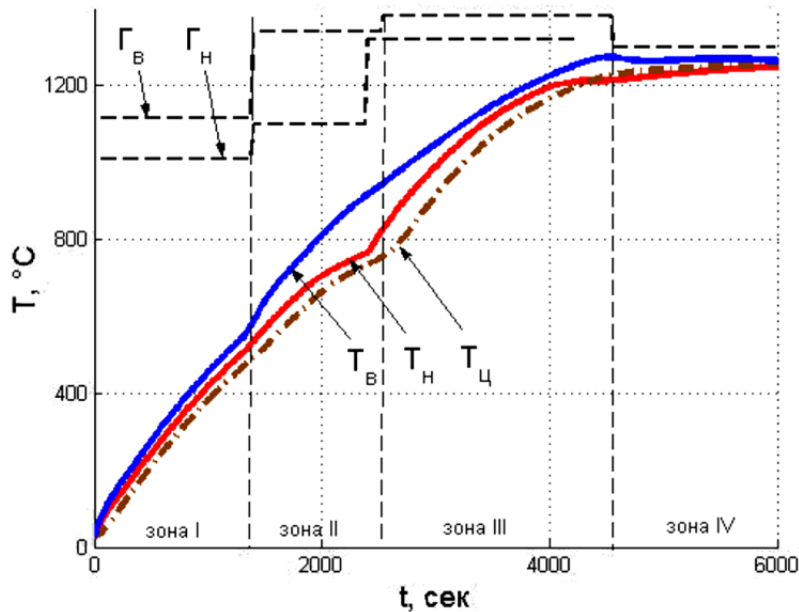


Рис. 5. Графік переходного процесу температури на поверхні

За результатами математичного моделювання видно, що результати статистичних розрахунків температури поверхні сляба рівній  $1287$  °С відрізняються від модельної  $1279$  °С на  $8$  °С, що становить  $0,6$  % похибки.

## ВИСНОВКИ

Підвищено якісні показники технологічного процесу нагріву слябів, за рахунок підвищення точності вимірювання температури в зонах печі і регулювання витрати компонентів газоповітряної суміші.

Зменшено собівартість процесу нагріву шляхом зниження витрат природного газу за рахунок автоматизованої підтримки та контролю витрат суміші повітря і природного газу на горіння.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко В. Н. Подсистема оперативного прогноза теплового состояния слитков на участке нагревательных колодцев // Научные труды ДонНТУ. Серия: Вычислительная техника и автоматика, выпуск 25, 2001. – С. 130–134.
2. Дружинин Г. М. Способы снижения термической неоднородности массивных стальных слябов при нагреве в методических нагревательных печах / Г. М. Дружинин, Ю. А. Самойлович, Е. В. Попов // Черная металлургия. – 2013. – № 7. – С. 27–32.
3. Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов / Кравцов А. Ф., Зайцева Е. В., Чуйко Ю. Н. – К., Донецк : Вища школа, 1981. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2018 р.

УДК 681.5:621.77

Пчелинцева К. О. (АПП-17-1зт)

## ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРОЦЕСУ ГАЗООЧИЩЕННЯ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ ПІД КОЛОШНИКОМ

*У статті розроблена математична модель регулювання тиском під колошником доменної печі, яка відрізняється тим, що враховує змінні технологічні параметри. Удосконалено структуру та алгоритм керування тиском колошникового газу з використанням дросельної групи системи газоочищення доменного газу. Розроблено інформаційне забезпечення, а також структура САР, які необхідні для побудови систем керування процесом регулювання тиску колошникового газу протягом плавки металу у доменної печі.*

*In the article a mathematical model of pressure regulation under a blast furnace flue is developed, which differs in that it takes into account the variables of technological parameters. Structure and algorithm for controlling blast furnace gas pressure using a throttle group of gas blast furnace gas purification system has been improved. The information support, as well as the structure of the SAR, which are necessary for the construction of control systems for the process of regulation of the pressure of the blast furnace gas during the melting of the metal in the blast furnace, is developed.*

Одним з важливих параметрів роботи доменної печі є тиск під колошником. Цей параметр впливає на рівний хід печі, інтенсивність виробництва чавуну, час перебування шихтових матеріалів в печі до перетворення в чавун. Основним збурюючим впливом системи регулювання тиску під колошником є робота наповнювальних клапанів. При роботі завантажувального пристрою необхідно вирівнювати тиску в шлюзовий камері (простір між малим конусом і тарілчастими клапанами) з тиском в печі. Це здійснюється за допомогою наповнювальних клапанів. Після відкриття наповнювальних клапанів, тиск під колошником різко падає. Постійний тиск газу на колошнику доменної печі досягається введенням додаткового опору на шляху руху газу на виходу з доменної печі. Додатковим опором є дросельна група.

Внаслідок підвищення підпору газів перед додатковим опором зростає тиск газів не тільки на колошнику, але і у всьому об'ємі печі, що викликає необхідність збільшення тиску дуття в піч. Таким чином, при підвищенні тиску газів в робочому просторі доменної печі збільшується кількість дуття, а також стає можливим підвищення температури дуття (без порушення рівного ходу). З цього виходить що:

- підвищується продуктивність печі;
- знижується витрата коксу за рахунок збільшення частки непрямого відновлення (так як зменшується швидкість руху газу в печі);
- скорочується винос колошникового пилу (внаслідок зниження швидкості і підйомної сили газів у верхній частині печі), в результаті чого зменшується крупність частинок що захоплюються газом в газовідводи.

У зв'язку з цим розробка механізмів регулювання тиском під колошником доменної печі, а також алгоритмів управління є актуальною науково-технічною задачею.

Метою дослідження є зниження енерговитрат процесу газоочищення доменної печі шляхом впровадження автоматизованої системи керування тиском під колошником доменної печі з використанням дросельної групи.

Відомо, що висока ефективність доменного процесу досягається, як правило, при рівному ході печі, який характеризується стабільністю і рівномірним сходом шихтових матеріалів, а також певним газодинамічним режимом. Однією з найважливіших завдань управління доменною плавкою є забезпечення раціонального для даних шихтових умов розподілу матеріалів і газів за площею поперечного перерізу печі.



Як показано в роботах К. М. Бугаєва [1], І. Г. Товаровського [2], Б. М. Раковського [3], при інших рівних умовах показники плавки залежать в основному від газорозподілу і визначається ступенем використання газів. Загальновізвано, що рівність ходу печі визначається газорозподілом якій регулюється положення заслінок дросельної групи системи газоочищення колошникового газу.

Проаналізовано впливу підвищеного тиску газу в робочому просторі доменної печі. Виявлено що він є одним з інтенсифікаторів процесу плавки в ній, так як дозволяє підвищити продуктивність печі і знизити питомі витрати коксу. Підвищення тиску газу на колошнику доменної печі досягається введенням додаткового опору на шляху руху газу по виходу з доменної печі, а саме в дросельної групі системи газоочищення.

Проведено аналіз взаємозв'язку корисного об'єму доменної печі і тиску газу на колошнику. Графіки побудовані за цими даними, наведеними Бокланом Б. В., і зображені на рис. 1 та 2 [4].

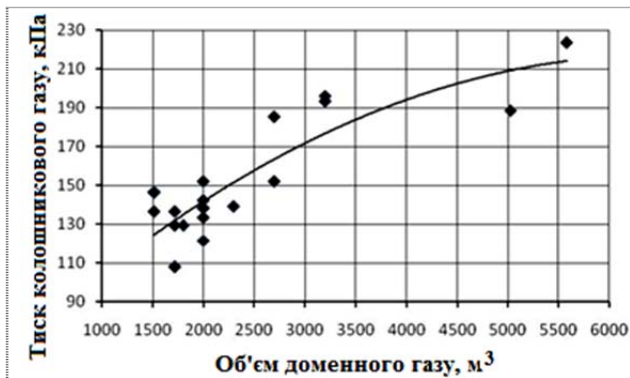


Рис. 1. Взаємозв'язок тиску колошникового газу і об'єму печі

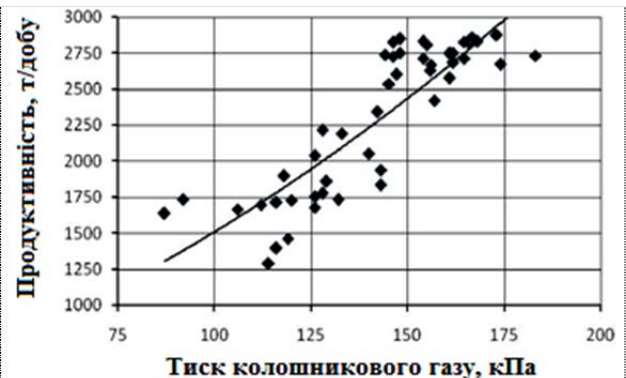


Рис. 2. Залежність продуктивності доменних печей від тиску газу на колошнику

Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) Більший обсяг доменної печі дозволяє збільшити тиск газу на колошнику за рахунок вдосконалення завантажувальних пристроїв. Підвищення тиску газу на колошнику сприяє збільшенню продуктивності доменної печі і зниження питомої витрати коксу.
- 2) Поряд із зазначеним позитивним впливом підвищеного тиску колошникового газу на показники доменної плавки, слід зазначити як недолік зменшення терміну служби завантажувальних пристроїв.

Далі проаналізовані способи регулювання тиску під колошником та його вплив на газодинамічні процеси у доменній печі. Газодинамічна структура доменної печі зображена на рис. 3.

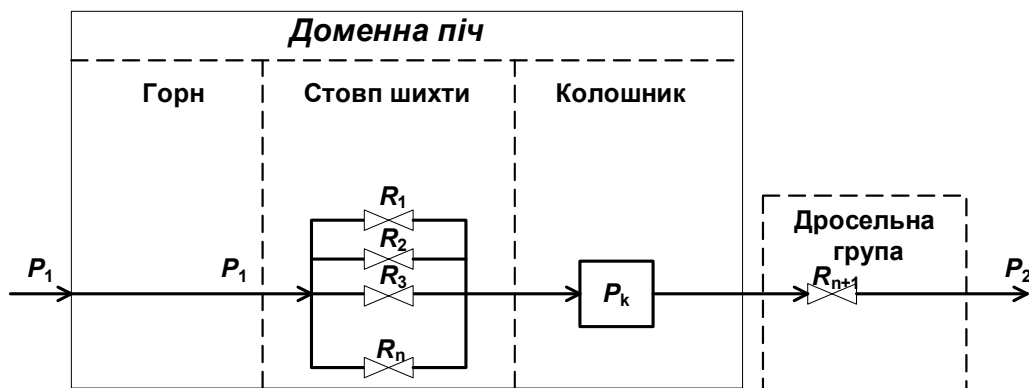


Рис. 3. Газодинамічна структура доменної печі

Виявлено два основних способи регулювання подачі дуття у доменну піч. Перший – це подача дуття з постійним заданим тиском гарячого дуття  $P_{20}$  і другий – подача дуття із постійними заданими витратами  $F_{20}$ . Питанню газодинаміки печі при підвищеному тиску в ній присвячені фундаментальні роботи проф. В.М. Щедрина [5]. Детально розглядаються питання газодинаміки печі в роботі проф. В. П. Тарасова [6].

Швидкість зміни тиску газу на колошнику визначається балансом потоку, який приходить на колошник і який уходить з нього.

$$C_k \frac{dP_k}{d\tau} = (P_1 - P_k) \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} - \frac{(P_k - P_2)}{R_{n+1}} \quad (1)$$

Оперуючи тільки середніми сумарними величинами  $F_{k21}$   $F_{k22}$ , рівняння (1) можливо записати так:

$$C_k \frac{dP_k}{d\tau} = (P_1 - P_k) F_{k21} - (P_k - P_2) F_{k22}, \quad (2)$$

де  $F_{k21}$  – середні сумарні витрати газу, який приходить на колошник;  $F_{k22}$  – середні сумарні витрати газу, який уходить із колошника.

У виразі (2) перенесемо величину  $P_k$  у ліву частину. Позначаючи через  $T = \frac{C_k}{(F_{k21} + F_{k22})}$ , одержимо

$$T \frac{dP_k}{d\tau} + P_k = P_1 \frac{F_{k21}}{(F_{k21} + F_{k22})} + P_2 \frac{F_{k22}}{(F_{k21} + F_{k22})}. \quad (3)$$

Одержане диференціальне рівняння описує зміну тиску газу на колошнику  $P_k$  в залежності від тиску  $P_1$  та витрат  $F_{k21}$  колошникового газу, який приходить на колошник, а також від тиску  $P_2$  у колекторі чистого доменного газу та витрат  $F_{k22}$  газу, який покидає колошник.

Розглянемо усталений режим автоматичної стабілізації тиску газу на колошнику на заданому рівні, тобто  $P_k = P_{зад}$ . В цьому режимі  $T \frac{dP_k}{d\tau} = 0$  і тоді із (3) маємо:

$$P_k = \frac{P_1 - P_2}{2}. \quad (4)$$

Проведений аналіз дозволив зробити висновки:

- 1) Одержано диференціальне рівняння зміни тиску газу на колошнику доменної печі в залежності від балансу газу на колошнику і газодинамічного опору стовпа шихти.
- 2) В сталому режимі при автоматичній стабілізації тиску газу на колошнику задане значення цього тиску повинно складати половину тиску гарячого дуття.

На підставі проведених теоретичних досліджень проведено синтез АСК тиском під колошником.

Виходячи з особливостей функціонування існуючої системи управління тиском під колошником доменної печі можна виділити наступні структурні елементи: дросельна група; кроковий електропривод заслінки дросельної групи; доменна піч; регулятор тиску під колошником («ходу печі»).

Структурна схема проєктованої математичної моделі САР тиску під колошником приведена на рисунку 4.

Мета аналізу і синтезу динамічної математичної моделі дросельного регулювання тиску під колошником є перевірка стійкості роботи САР за характером перехідного процесу і при визначення параметрів коригувальних пристроїв.

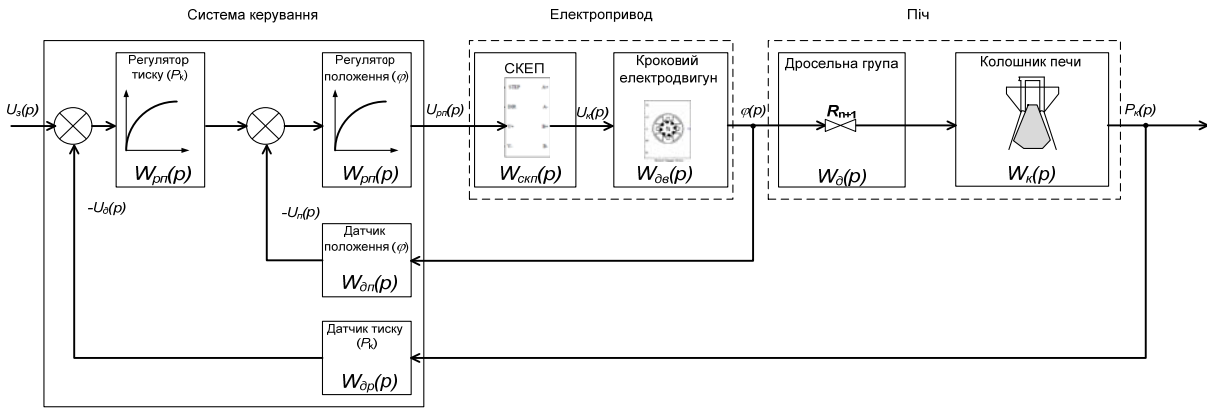


Рис. 4. Структурна схема математичної моделі САР тиску під колошником

Передаточна функція дросельної групи з пропорційним електричним управлінням має вигляд:

$$W_{\delta}(p) = \frac{Q_{\delta}(p)}{I_y(p)} = \frac{K_{\delta}}{T_{\delta}p + 1} \cdot \frac{K_n}{T_{\delta}^2 p^2 + 2\varepsilon T_{\delta} p + 1} K_{\delta}. \quad (5)$$

Зворотній зв'язок забезпечується датчиком тиску. Передаточна функція зворотного зв'язку:

$$W_{oc}(p) = K_{oc} = 1. \quad (6)$$

Для підвищення запасу стійкості системи та поліпшення якості перехідного процесу в систему був введений стандартний ПІ-регулятор, який має такі передавальні функції:

$$W_{1k}(p) = K_1, \quad W_{2k}(p) = \frac{K_2}{T_2 p + 1}. \quad (7)$$

де  $T_1, T_2$  – постійні часу регулятора;

Дослідження перехідного процесу здійснено на ПЕОМ за допомогою програмного продукту Matlab. На рисунку 5 представлений графік перехідного процесу САР тиску під колошником доменної печі. Як видно з графіка тривалість перехідного процесу (час, через яке система входить в зону 5-ти відсоткової помилки) в системі становить 1,5 с, що не перевищує встановленої тривалості перехідного процесу:  $t_{nm} = 1,5c \leq t_{nm}^3 = 2c$ .

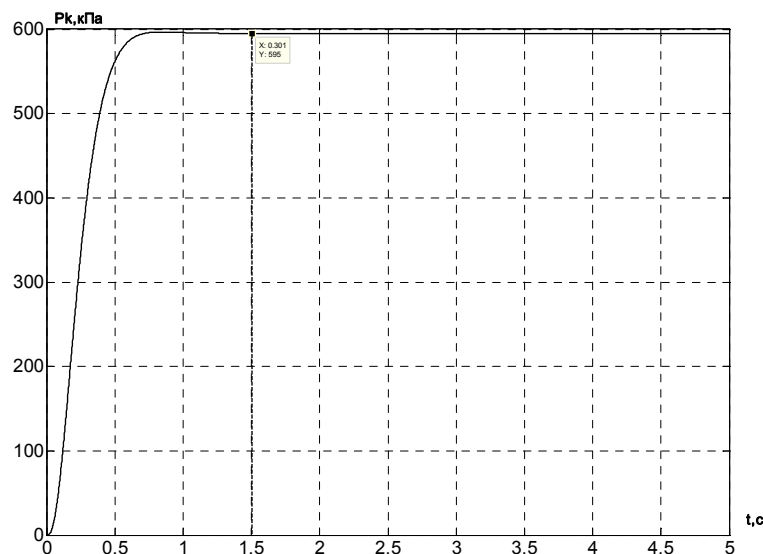


Рис. 5. Графік перехідного процесу тиску під колошником

На другому етапі математичного моделювання проведено експериментальні дослідження в замкнутій системі управління з ПІ-регулятором тиску (7). В результаті експериментальних досліджень на синтезованій математичній моделі САР тиску під колошником отримані графіки перехідних процесів по положенню дросельної заслінки і тиску під колошником (див. рис. 6), за якими можливо зробити висновки:

- час відпрацювання впливу, що обурює при перепаді тиску на 100 кПа викликаного сходом шихти становить 1,2 с.
- перерегулювання склало 5 кПа.

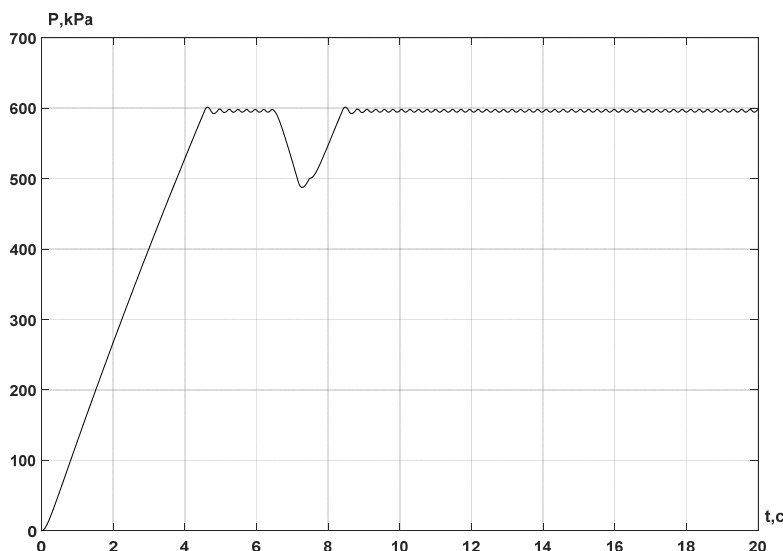


Рис. 6. Графік перехідного процесу тиску під колошником

Слід зазначити, що час відпрацювання обурюючого впливу не змінилося. Це викликано тим, що інерційністю приводної системи заслінки дросельної групи є постійною. Проведені експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок, що САР тиску під колошником може бути практично реалізованою.

### ВИСНОВКИ

- досліджено особливості технологічного процесу регулювання тиску доменного газу під колошником, встановлення параметрів процесу керування;
- удосконалена математична модель і алгоритм регулювання тиску доменного газу під колошником з використання дросельної групи;
- створена автоматизована система керування тиском доменного газу під колошником в залежності від ходу плавки газу і температури газу на виході.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бугаев К. М. Распределение газов в доменных печах / К. М. Бугаев. – М. : Металлургия, 1974. – 176 с.
2. Товаровский И. Г. Доменная плавка : монография. 2-е издание / И. Г. Товаровский – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
3. Раковский Б. М. Аналитический расчет рациональной формы кривой газораспределения по радиусу колошника доменной печи / Б. М. Раковский, Л. З. Ходак, Г. Д. Фуфаев // Восстановительно-тепловая обработка железорудного и марганцевого сырья : Научные труды института металлургии им. А. А. Байкова. - М. : Наука, 1974. – С. 112–120.
4. Боклан Б. В. Исследование распределения потока газа в доменных печах большого объема и разработка методов регулирования их хода : дис. ... канд. техн. наук / Б. В. Боклан. – Днепропетровск, 1970. – 154 с.
5. Щедрин В. М. Теория доменной плавки под давлением / В. М. Щедрин. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 452 с.
6. Тарасов В. П. Газодинамика доменного процесса / В. П. Тарасов. – М. : Металлургия, 1990. – 216 с.

УДК 681.5:629.3

Радченко В. В. (АВП-17-2м).

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

*У статті вирішено актуальне науково-технічне завдання дослідження процесу керування електроприводом сушильного барабану в перехідних режимах. Проведено дослідження особливостей технологічного процесу регулювання швидкості електроприводу, встановлення параметрів процесу керування. Розроблена математична модель електромеханічної системи ПЧ – АД – сушильний барабан. Удосконалена математична модель і алгоритм регулювання частотного регулювання швидкості електроприводу. Запропонована практична реалізація автоматизована система керування швидкістю обертання електроприводу сушильного барабану. Розроблена структура і алгоритм функціонування автоматизованої системи управління сушильним барабаном.*

*In the article solved the actual scientific and technical problem of studying the process of controlling the electric drive of a drying drum in transient conditions. A study of the features of the technological process of controlling the speed of the electric drive has been carried out, the control parameters have been established. A mathematical model of the electromechanical system IF - AD - dryer drum was developed. Advanced mathematical model and algorithm for regulating the frequency control of the speed of the electric drive. The proposed practical implementation of an automated system for controlling the speed of rotation of the electric drive of a drying drum. The structure and algorithm of functioning of the automated control system of the drying drum*

Розвиток виробництва будівельної індустрії нерозривно пов'язане зі збільшенням попиту на продукцію при одночасному підвищенні вимог до якості товару. Зважаючи на це, прагнення модернізувати діючі виробництва і знизити собівартість товару сприяє розвитку виробництва цементу. Одним із способів зменшення собівартості продукції є скорочення найбільш істотних статей витрат на виробництво, тому з науково-практичної точки зору найбільший інтерес представляють енергоємні процеси [1].

Одним з таких технологічних процесів в цементній промисловості є сушка в барабанних сушарках, на режим якої впливає безліч факторів, які по-різному впливають на енерговитрати. Оскільки на випаровування рідини витрачається значна кількість теплоти, відповідно, потрібні значні енерговитрати, то проблема оцінки роботи існуючого обладнання та вибору режиму сушіння, що забезпечує підвищення ефективності використання сушильної установки, є актуальним завданням [2, 3].

У зв'язку з цим розробка механізмів регулювання швидкості обертання сушильного барабана, а також алгоритмів управління є актуальною науково-технічною задачею.

Мета дослідження – зниження енерговитрат та підвищення ефективності процесу сушки цементу завдяки впровадженню автоматизованої системи керування електроприводом сушильного барабану.

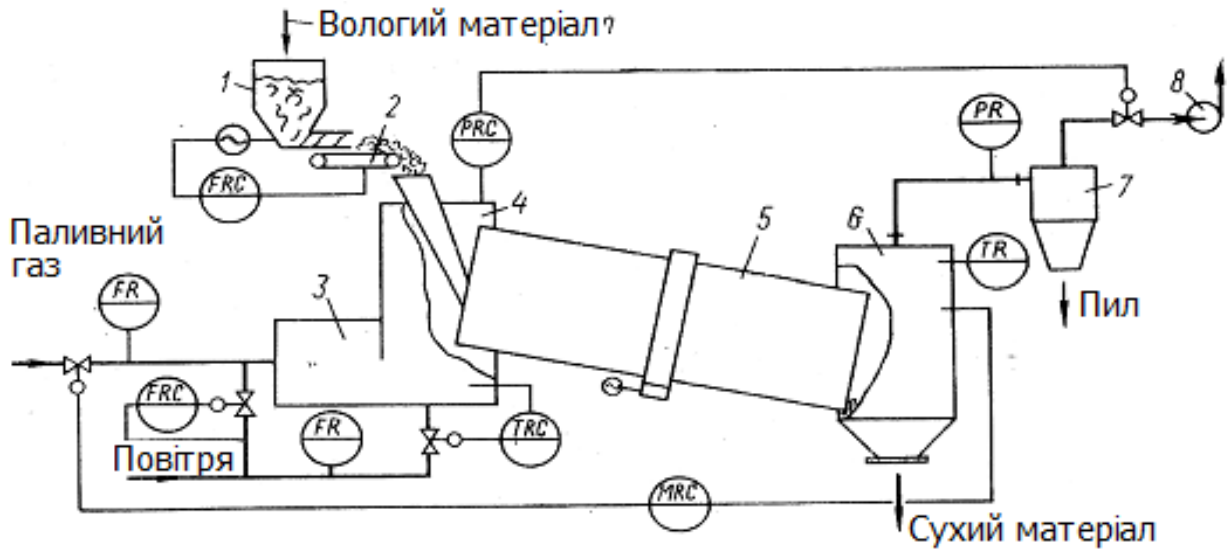
Об'єкт дослідження. Процес керування електроприводом сушильного барабану в перехідних режимах пуску, стопоріння і завантаження.

У цементній промисловості для сушіння добавок (доменний шлак, опока, і ін.), що вводяться в цемент, в основному застосовують сушильні барабани. У зв'язку з фізичними властивостями добавок для їх сушки застосовують сушильні барабани прямооточного типу, тобто такі, в яких топкові гази і висушуваний матеріал рухаються в одному напрямку [4, 5].

Схема процесу сушіння в сушильному барабані наведена на рис. 1.

Математичні моделі сушильного барабана будуються на основі визначальних рівнянь, що протікають в них фізичних процесів, а їх достовірність – від прийнятих у вихідних рівняннях припущень.

Обертання сушильного барабану здійснюється частотно-регульованим електроприводом, тобто АСУ електроприводом сушильного барабану структурно має наступні послідовні елементи: ПЧ-АД, як приводна система обертання та сушильний барабан як об'єкт управління.



1 – бункер вологого матеріалу; 2 – дозатор; 3 – топка; 4 – змішувальна камера; 5 – сушильний барабан; 6 – бункер сухого матеріалу; 7 – циклон; 8 – вентилятор

Рис. 1. Схема процесу сушіння в сушильному барабані

Структурна схема системи ПЧ-АД з зворотним зв'язком за швидкістю має вигляд, як представлено на рис. 2.

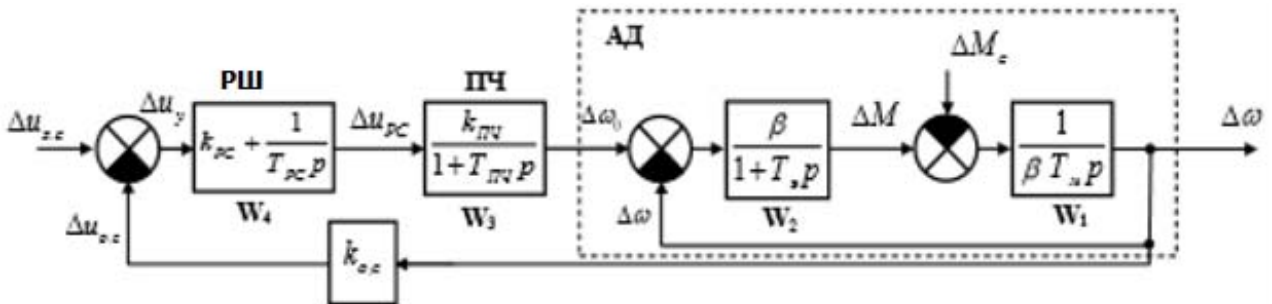


Рис. 2. Структурна схема системи ПЧ-АД зворотним зв'язком за швидкістю

Математичний опис модель ПЧ-АД зі зворотним зв'язком за швидкістю - сушильний барабан має вигляд [6]

$$\begin{cases}
 \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_m p} (\Delta M - \Delta M_c); \\
 T_m \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta (\Delta\omega_0 - \Delta\omega); \\
 T_{ПЧ} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = K_{ПЧ} \Delta U_{пу}; \\
 T_{пу} \frac{d\Delta U_{пу}}{dt} = \Delta U_y - \frac{d\Delta\omega_0}{dt} K_{пу} T_{пу} K_{зз} - K_{пу} T_{пу} K_{зз} \Delta\omega; \\
 T_n \frac{dz}{dt} + z = h_0 \omega^2 + b \omega.
 \end{cases} \quad (1)$$

Для синтезу передавальних функції здійснено запис систему рівнянь у формі Коші

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\beta T_{\text{мр}}} (x_2 - A); \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{\beta}{T_3} x_3 - \frac{\beta}{T_3} x_1 - \frac{1}{T_3} x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{T_{\text{ПЧ}}} x_4 - \frac{1}{T_{\text{ПЧ}}} x_3; \\ \frac{dx_4}{dt} = u - \frac{dx_1}{dt} K_{\text{пу}} K_{33} - K_{\text{пу}} K_{33} x_1; \\ \frac{dx_5}{dt} = \left( \frac{2h_0 x_0}{T_n} + \frac{b}{T_n} \right) x_1 + \frac{1}{T_n} x_5. \end{cases}, \quad (2)$$

де  $x_1 = \Delta\omega$ ;  $x_2 = \Delta M$ ;  $x_3 = \Delta\omega_0$ ;  $x_4 = \Delta U_{\text{рс}}$ ;  $x_0$  – коефіцієнт лінеаризації змінної  $\omega^2$ .

На основі рівнянь 2 синтезована математична модель системи ПЧ-АД – сушильного барабана, яка зображена на структурній схемі рис. 3.

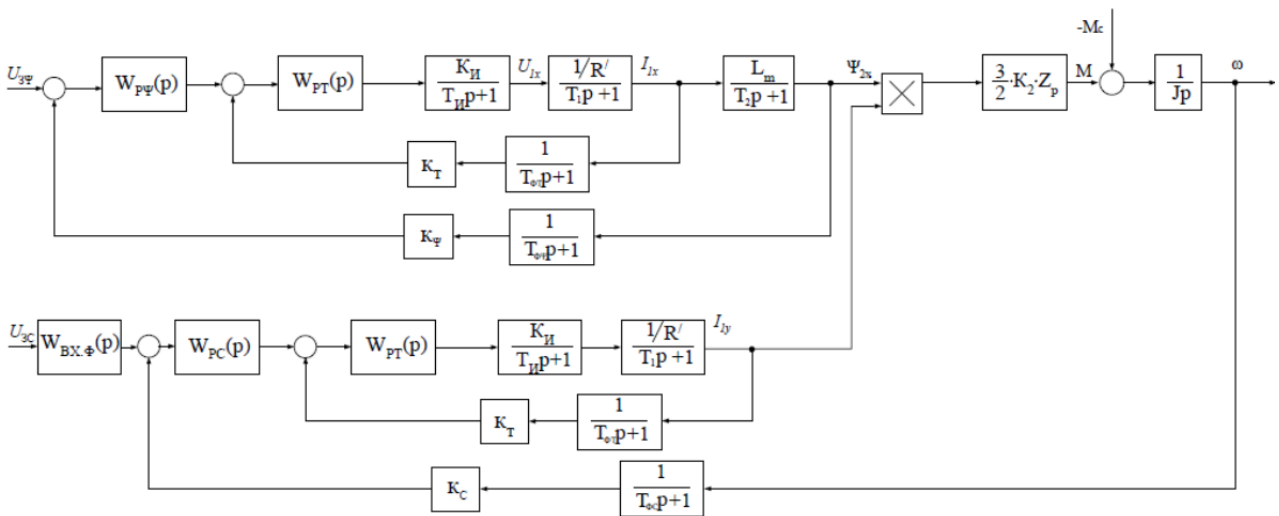


Рис. 3. Структурна схема математичної моделі електромеханічної системи ПЧ-АД – сушильний барабан

Проведено синтез регуляторів струму, поточкозчеплення та швидкості системи управління електроприводом з використанням принципу модального оптимуму [7]. Передаточні функцій синтезованих регуляторів мають вигляд

– Контуру струму

$$W_{\text{рс}}(p) = K_{\text{рс}} \frac{T_{\text{рс}} p + 1}{T_{\text{рс}} p}, \quad (3)$$

де  $T_{\text{рс}} = T_1$  – постійна часу регулятора струму, с;  $K_{\text{рс}} = \frac{T_1 R'}{K_u K_c a_c T_{\mu c}}$  - коефіцієнт поси-

лення регулятора;  $K_{\text{сх}} = \frac{U_{\text{зс.мах}}}{I_{\text{ен.мах}}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму, В/А;  $a_m$  – коефіці-

єнт оптимізації контуру струму по модальному оптимуму.

– Контур поточкозчеплення

$$W_{\text{р\psi}}(p) = K_{\text{р\psi}} \frac{T_{\text{р\psi}} p + 1}{T_{\text{р\psi}} p}, \quad (4)$$

де  $K_{p\psi} = \frac{K_c T_2}{2K_\psi L_m T_{\mu\psi}}$  – коефіцієнт посилення регулятора потокозчеплення;

$T_{p\psi} = a_m T_{\mu m} + T_{\phi}$  – постійна часу регулятора потокозчеплення, с.

На вхід контуру потокозчеплення встановлюється фільтр:

$$W_{BX.\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi\psi} p + 1}, \quad (5)$$

– Контур швидкості

$$W_{p\omega}(p) = K_{p\omega} \frac{T_{pc} p + 1}{T_{pc} p}, \quad (6)$$

де  $K_{p\omega} = \frac{2K_c J_\omega}{6K_2 Z_p K_{\omega u} \Psi_{2x} T_{\mu u}}$  – коефіцієнт посилення регулятора швидкості;

$T_{\mu u} = a_m T_{\mu c} + T_{\phi c}$  – постійна часу контуру швидкості.  $K_{\omega u} = \frac{U_{zc.maxc}}{\omega_{max}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості;  $T_{p\omega} = \nu_c a_m T_{\mu u}$  – постійна часу регулятора швидкості, с.

На вхід контуру швидкості встановлюється фільтр:

$$W_{BX.\phi}(p) = \frac{1}{(4T_{\mu u} + T_{\phi u})p + 1}, \quad (7)$$

На підставі математичного опису (1-7) та структурної схеми (рис. 2) побудована імітаційна модель ПЧ-АД – сушильний барабан, яка наведена на рис. 4.

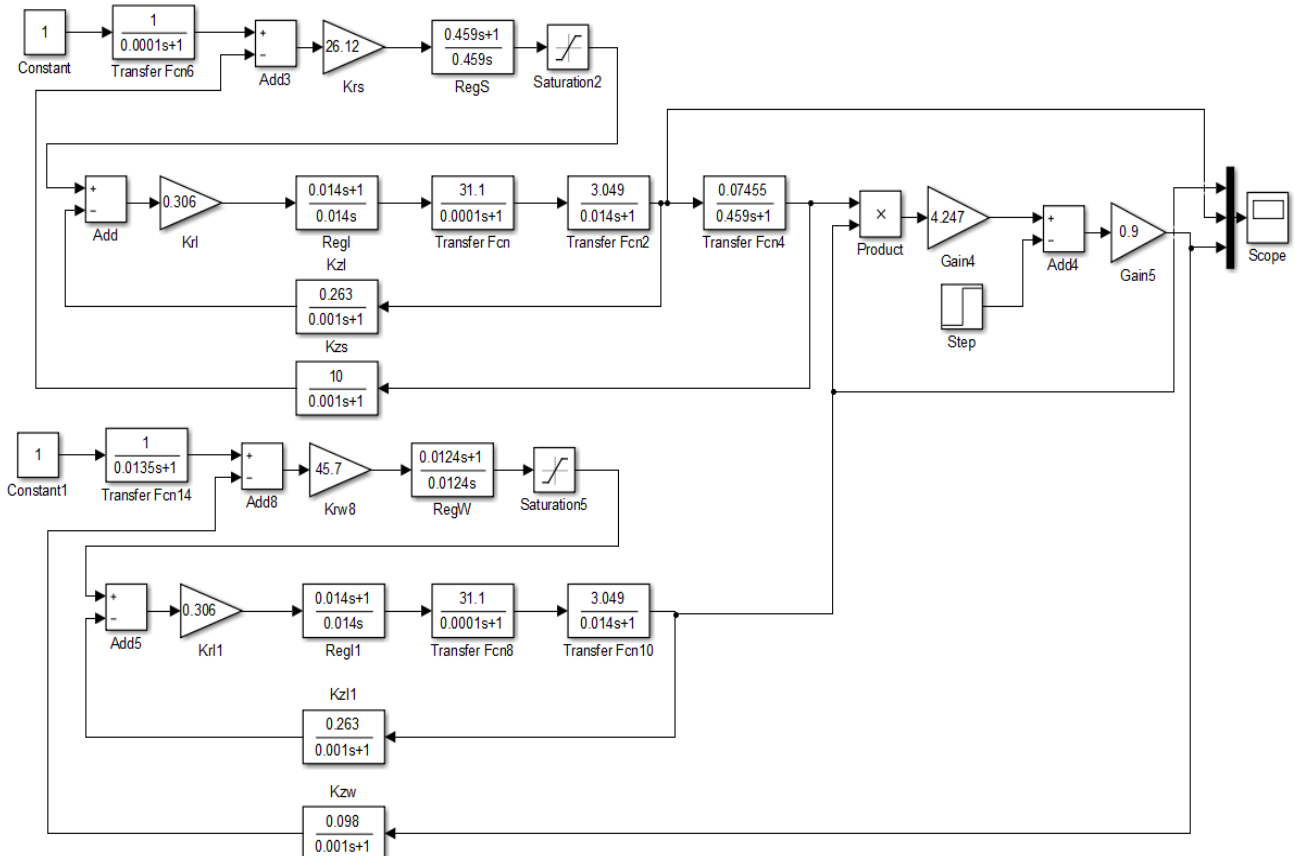


Рис. 4. Імітаційна модель ПЧ-АД-сушильний барабан в МПП MatLab



Результати перехідних процесів при моделюванні контуру швидкості, при відпрацюванні ступеневої вхідного впливу  $U_{зи} = 0,1В$ , представлені у вигляді характеристики  $\omega(t)$  на рис. 5.

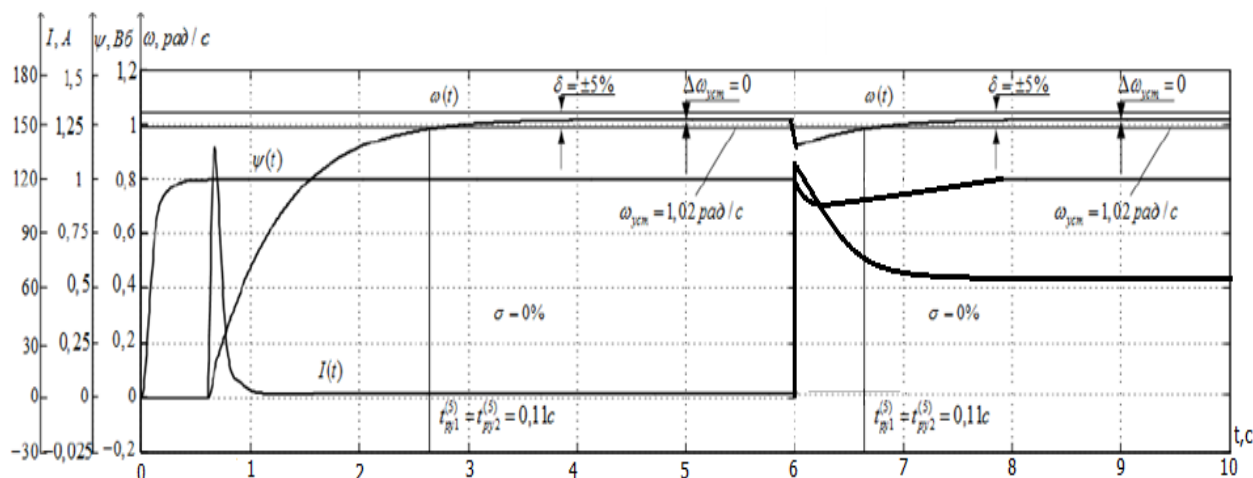


Рис. 5. Перехідні процеси  $\Psi(t)$ ,  $I(t)$  та  $\omega(t)$  контуру швидкості при пуску на холостому ходу та накладенні навантаження

Розроблену математичну модель доцільно використовувати для адаптації алгоритму регулювання швидкості обертання сушильного барабану до заданих змінних умов експлуатації, тобто коливання моменту при завантаженні.

## ВИСНОВКИ

Проведено дослідження особливостей технологічного процесу регулювання швидкості електроприводу, встановлення параметрів процесу керування. Розроблена математична модель електромеханічної системи ПЧ – АД – сушильний барабан. Удосконалена математична модель і алгоритм регулювання частотного регулювання швидкості електроприводу. Створена автоматизована система керування швидкістю обертання електроприводу сушильного барабану.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баранцева Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». Иваново. – 2008. – 116 с.
2. Демин О. В. Интенсификация смешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе / О. В. Демин, Д. О. Смолин, В. Ф. Першин // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55. – № 8. – С. 108–111.
3. Демин О. В. Оперативное управление процессом смешивания / О. В. Демин, О. Д. Смолин, В. Ф. Першин // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 4. – С. 356–366.
4. Демин О. В., Першин В. Ф., Свиридов М. М. Управление технологическим процессом в одновальном лопастном смесителе // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 16–17.
5. Ди Джэннаро А. И., Першина С. В., Першин В. Ф. Определение коэффициента внутреннего трения сыпучих материалов при различных значениях плотности // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2011. – № 3. – С. 366–368.
6. Москаленко В. В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. Проф. Образования. – М. : Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368с., ил.
7. Куропаткин П. В. Теория автоматического управления : нач. пос. для электротехнических специальностей. – М. : Вища школа, 1973. – 528 с.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2018 р.

УДК 621.982: 669.295

Зоря Я. І. (ЕСА-17м)

## МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ КРАНІВ

*Вирішення проблеми підвищення надійності та безпечної експлуатації мостових кранів багато в чому визначається особливостями та якісними показниками електроприводу. При цьому підвищення надійності силового перетворювача досягається максимальним спрощенням його структури. Для підвищення надійності важливе значення має суворе дотримання технології виробництва не тільки перетворювачів, а й в першу чергу комплектуючих виробів. Надійність технічної системи обумовлюється поєднанням властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності. Для неремонтуємих об'єктів основною властивістю може бути безвідмовність. Для ремонтваних об'єктів одним з найважливіших властивостей, що складають поняття надійності, може бути ремонтпридатність. У статті розглянуті основні методи забезпечення надійності електроприводів за відомими значеннями інтенсивності відмов та інтенсивності відновлення.*

*Solution of the problem of increasing the reliability and safe operation of overhead cranes is largely determined by the features and qualitative characteristics of the electric drive. At the same time, the reliability of the power converter is increased by the maximum simplification of its structure. To improve reliability, it is important to strictly adhere to the production technology not only of converters, but also first of all component parts. The reliability of the technical system is determined by a combination of reliability, maintainability and durability. For non-repaired objects, the main property can be trouble-free operation. For repairable objects, one of the most important properties that make up the notion of reliability can be maintainability. The article considers the main methods of ensuring the reliability of electric drives based on known values of the failure rate and recovery intensity.*

Мостові крани виконують більшу частину підйомно-транспортних робіт на різних підприємствах. Вони виконують не тільки обслуговуючі функції, а й нерідко включені безпосередньо в технологічний процес. Від їх надійної та безперебійної роботи залежать продуктивність підприємства, його техніко-економічні показники, безпека обслуговуючого персоналу [1].

Вирішення проблеми підвищення надійності та безпечної експлуатації мостових кранів багато в чому визначається особливостями та якісними показниками електроприводу (ЕП) механізму підйому, до якого пред'являють ряд жорстких вимог, найважливішими з яких є забезпечення високої продуктивності, безперебійності в роботі, безпеки обслуговування, простота експлуатації і ремонту [2].

Надійність автоматизованого електроприводу (АЕП) мостових кранів в основному визначається надійністю системи управління та силового перетворювача (СП), тому що з підвищенням ступеня інтеграції мікросхем цифрової системи управління надійність асинхронних двигунів (АД) визначається надійністю СП. Підвищення надійності СП досягається максимальним спрощенням структури СП, суворим дотриманням технології виробництва не тільки перетворювачів, а й в першу чергу комплектуючих виробів, а також введенням пристроїв захисту від аварійних режимів роботи за рахунок поелементного діагностування СП перед пуском та контролю найбільш уразливих вузлів під час роботи СП [3].

Метою роботи є аналіз основних методів визначення надійності електроприводів вантажопідіймальних кранів.

Одним з напрямків щодо спрощення СП з ускладненням управління частотно-струмових електроприводів з круговим обертовим магнітним полем є формування керованої нульової складової струму, зі струмом в обмотках статора несинусоїдної форми [4–8]. Регульовальні властивості приводу з нульовою складовою струму аналогічні властивостям приводів з синусоїдальною формою струму. Використання таких приводів дозволяє в 2 рази знизити розрахункову інтенсивність відмов за рахунок спрощення СП [9].

Найбільшого поширення в якості базової структури отримала структура з явно вираженою ланкою постійного струму з СП, виконаним за шестіключевою схемою, як найбільш простий варіант СП.

Будь-який технічний виріб, в тому числі електропривод, в процесі свого функціонування проходить три характерних періоди роботи: приробітку (інтервал початкових відмов), нормальна експлуатація (інтервал випадкових відмов), старіння або знос (інтервал втомних відмов) [9].

Одним з найбільш важливих критеріїв техніко-економічної оцінки як експлуатованих так і розроблюваних електроприводів мостових кранів є надійність. Згідно з класичним визначенням під надійністю слід розуміти властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати всі необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування. За ДСТУ 2860-94 «Надійність в техніці. Терміни та визначення» надійністю обладнання називають комплексну властивість, що складається в загальному випадку з безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та зберігання. Для об'єктів, які не ремонтуються, основною властивістю може бути безвідмовність. Для об'єктів, які можна ремонтувати, одною з найважливіших властивостей, що складають поняття надійності, може бути ремонтпридатність [10].

Подію, що полягає в порушенні працездатності, називають відмовою пристрою. Всі відмови класифікуються за ознаками. Конструктивні відмови виникають внаслідок помилок, допущених при проектуванні виробів, наприклад, вихід з ладу комплектуючих виробів через неправильний вибір теплового, електричного або експлуатаційного режиму їх використання.

Виробничі відмови виникають внаслідок порушення технології виготовлення (недостатній вхідний контроль комплектуючих виробів, недотримання технологічного циклу випуску пристрою).

Експлуатаційні відмови виникають внаслідок порушення обслуговуючим персоналом правил експлуатації, транспортування, ремонту. Ці правила регламентовані в технічних умовах (ТУ). Ці відмови можуть виникнути в будь-який момент часу, їх передбачити дуже складно, наприклад пробій ізоляції частини обмотки статора або вихід з ладу обмотки статора та її загоряння.

За характером всі відмови підрозділяються на раптові та поступові (рис. 1).

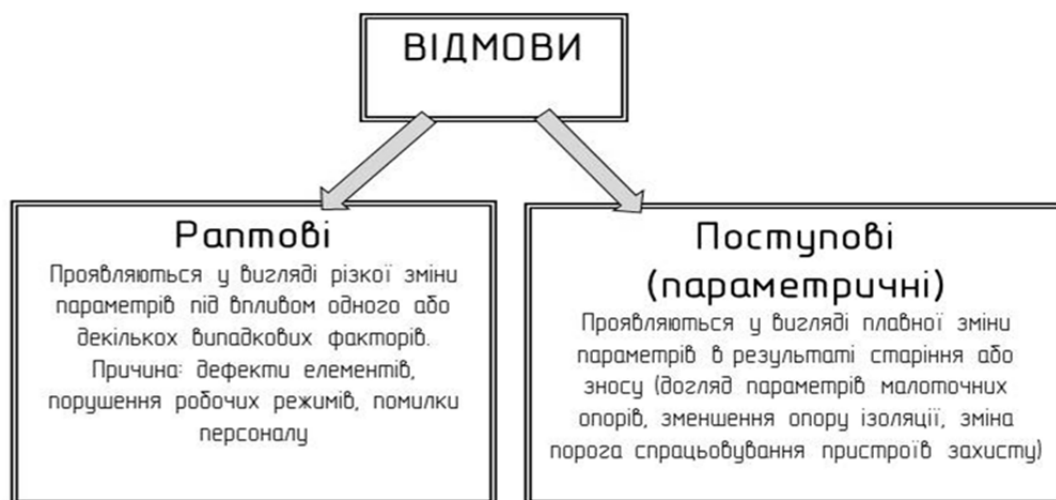


Рис. 1. Класифікація відмов по характеру прояви

За способом виявлення відмови діляться на явні (для їх виявлення не треба проводити спеціальні тести контролю несправностей) та приховані (можуть бути виявлені в результаті перевірки функціонування при періодичних ТО (поріг спрацьовування пристроїв захисту, опір ізоляції електродвигуна тощо)).

Надійність технічної системи обумовлюється поєднанням властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності (мал. 2).

Розрахунок надійності при проектуванні виконується зазвичай з використанням аналітичних методів. Під розрахунком надійності слід розуміти визначення чисельних значень показників надійності по наявним вихідним даним. Методики розрахунку показників надійності розрізняються залежно від того, чи є пристрої, що розглядаються, ремонтваними (відновлюваними) або такими, що не ремонтуються (невідновлювані) виробами в процесі експлуатації.

Відновлювані системи в разі виникнення відмови піддаються відновленню та продовжують виконувати свої функції. Невідновлювані системи при виникненні відмови не підлягають відновленню з економічних або технічних причин.

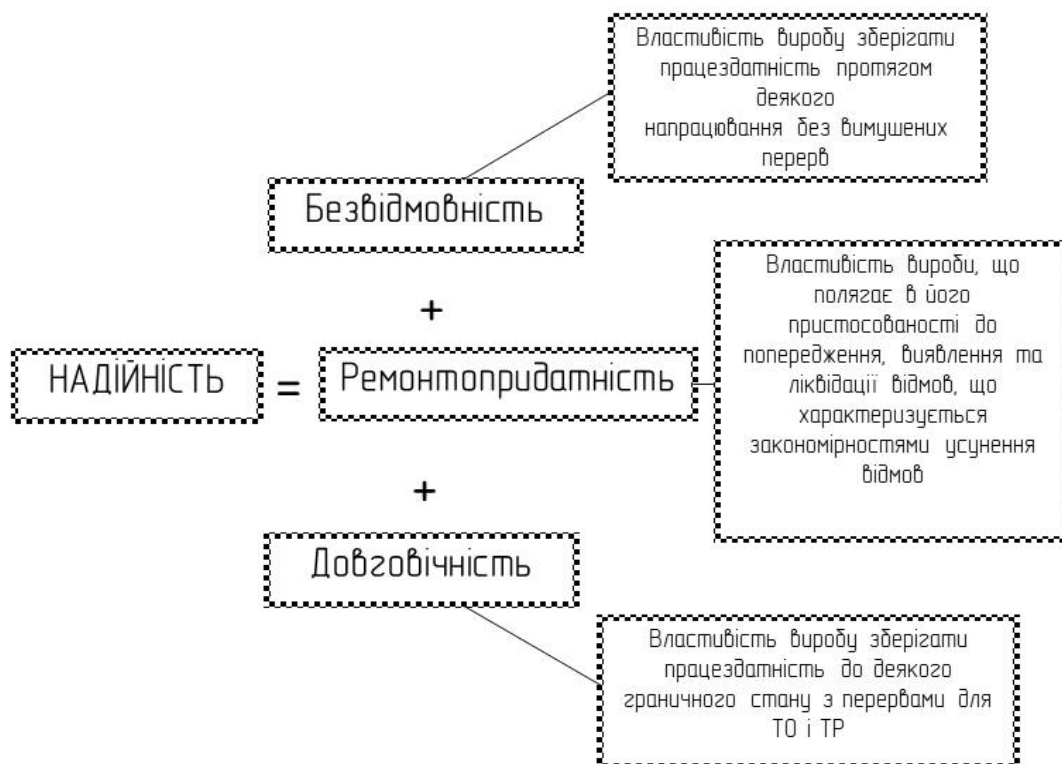


Рис. 2. Структура забезпечення надійності

Основними, найбільш часто вживаними кількісними характеристиками невідновлювальних систем є ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  та напрацювання до відмови  $T_j$ . Завдання розрахунку надійності при проектуванні полягає в розрахунку їх значень по відомим величинам інтенсивності відмов елементів  $\lambda_i(t)$ . [10].

Якщо в пристрої немає зарезервованих елементів, то для нього інтенсивність відмов окремих елементів, що входять в систему:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

де  $n$  – загальне число елементів, які входять до складу пристрою.

У технічній літературі наводяться значення інтенсивностей відмов елементів  $\lambda_{in}$  при номінальному режимі їх завантаження та нормальних кліматичних умовах використання, наприклад  $T^\circ = 20^\circ\text{C} \pm 5\%$ , а також значень поправочних коефіцієнтів, які враховують можливість їх роботи при відмінних від номінальних умов експлуатації. З урахуванням цього:

$$\lambda_i = \lambda_{iH} \sum_{r=1}^S K_r,$$

де  $S$  – загальна кількість поправочних коефіцієнтів;

$K_r$  – значення  $r$ -го поправочного коефіцієнту.

Для відновлюваних в процесі експлуатації систем, до яких відноситься електропривод, крім наведених параметрів кількісної оцінки надійності застосовуються також середній час простою (відновлення), інтенсивність відновлення виробів, готовність пристрою до відновлення.

Згідно використовуваної номенклатури показників надійності електротехнічних пристроїв для загального режиму експлуатації (безперервної, циклічної, оперативної) в якості узагальненого показника якості рекомендується використовувати коефіцієнт готовності ( $K_g$ ). Коефіцієнт готовності характеризує частку часу протягом якого система працездатна, а коефіцієнт простою – частку часу, протягом якого вона ремонтується [10].

Метод поєднується з зображенням структури схеми у вигляді графа станів та переходів. Устаткування без резервування може знаходитися в двох станах:  $P_0$  – працездатні,  $P_i$  – непрацездатні. Якщо  $\lambda$  – інтенсивність відмов, то  $\mu$  – інтенсивність відновлення (рис. 3).

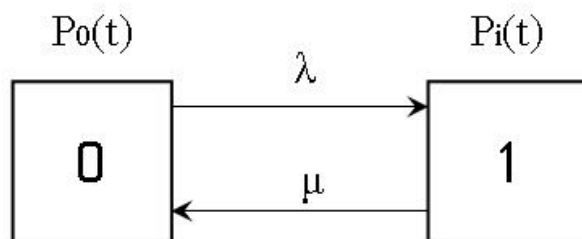


Рис. 3. Граф стану установки

За причиною, що призвела до відмови, всі відмови можна розділити на дві категорії – електричні і механічні.

До електричних відмов відносяться відмови через пробій ізоляції на корпус та між фазами, обрив провідників в обмотці, замикання між витками обмотки, порушення контактів та з'єднань (паяних або зварних), неприпустиме зниження опору ізоляції внаслідок її старіння або надмірного зволоження, порушення межлістової ізоляції магнітопроводів.

До механічних відмов відносяться відмови через виплавки бабіту в підшипниках ковзання, руйнування сепаратора, кульок або роликів в підшипниках кочення, деформації вала ротора, обриви бандажів або їх сповзання, ослаблення пресування сердечників, погіршення охолодження машини через засмічення охолоджуючих каналів.

Розглянемо характерні причини відмов електродвигунів змінного струму та їх наслідки [3].

Пробій ізоляції ротора на корпус призводить до повільного збільшення частоти обертання при пуску АД. Ротор сильно нагрівається навіть при невеликому навантаженні. До тих же явищ призводить порушення ізоляції між контактними кільцями та валом ротора.

Пробій ізоляції між фазами призводить до короткого замикання в обмотці. При короткому замиканні обмотки статора спостерігаються сильні вібрації двигуна змінного струму, які припиняються після відключення його від мережі, сильне гудіння, несиметрія струмів в фазах, швидке нагрівання окремих ділянок обмотки. У разі короткого замикання спостерігається такий же ефект, як і при порушенні ізоляції між контактними кільцями і валом.

Обрив провідників обмотки статора АД викликає несиметрію струмів та швидке нагрівання однієї з фаз (в крайньому режимі – обрив фази, ротор не обертається або його частота обертання мала, спостерігається сильний шум і швидкий нагрів двигуна).

Обрив стрижня короткозамкнутою обмотки ротора призводить до підвищених вібрацій, зменшення частоти обертання під навантаженням, пульсація струму статора послідовно у всіх фазах.

Виткове коротке замикання обмотки статора або ротора призводить до надмірного нагрівання електричної машини при номінальному навантаженні.

Неприпустиме зниження опору ізоляції може бути наслідком сильного забруднення ізоляції, зволоження та часткового руйнування, що викликано старінням ізоляції.

Порушення міжлистової ізоляції сердечників магнітопроводів призводить до неприпустимого підвищення температури окремих ділянок магнітопроводів та всього магнітопроводу в цілому, підвищеного нагрівання обмоток, вигорання частини магнітопроводу (пожежа в стали).

У більшості випадків (85–95 %) відмови асинхронних двигунів [9] потужністю понад 5 кВт відбуваються через пошкодження обмоток та розподіляються наступним чином: міжвиткові замикання – 93 %, пробій міжфазної ізоляції – 5 %, пробій пазової ізоляції – 2 %. На підшипниковий вузол доводиться 5–8 % відмов та невеликий відсоток пов'язано з такими причинами, як розпаювання вивідних кінців, скручування валів, розрив стрижнів ротора і ін.

Як видно з аналізу наведених можливих несправностей електродвигунів змінного струму і їх впливу на робочі властивості електричних машин, одні і ті ж ефекти можуть бути викликані різними причинами. Це не дозволяє однозначно назвати несправність електричної машини по її зовнішньому прояву, а змушує обмежитися переліком можливих несправностей, які будуть уточнюватися при дефектації з метою подальшого їх усунення.

## ВИСНОВКИ

Рішення проблеми забезпечення підвищеної надійності та безпеки експлуатації кранів мостового типу багато в чому визначається особливостями і якісними показниками його електроприводу. Для механізмів підйому існує проблема створення надійних, простих в обслуговуванні електроприводів, які відповідають всім технологічним вимогам та мають високу надійність.

Асинхронні двигуни в даний час є основою для електроприводів механізмів мостового крана, завдяки вдалому поєднанню комплексу експлуатаційних і конструктивних характеристик, здатності автоматично змінювати момент обертання відповідно до зміни моменту опору на валу (в межах перевантажувальної здатності).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Масандилов Л. Б. *Электропривод подъемных кранов* / Л. Б. Масандилов. – М. : Изд-во МЭИ, 1998. – 100 с.
2. Шишков Н. А. *Надежность и безопасность грузоподъемных машин* / Н. А. Шишков. – М. : Недра, 1990. – 252 с.
3. Брауде В. И. *Надежность подъемно-транспортных машин* / В. И. Брауде, Л. Н. Семенов. – Л. : Машиностроение, 1986. – 182 с.
4. Герасимьяк Р. П. *Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов*. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
5. Казак С. А. *Динамика мостовых кранов* / С. А. Казак. – М. : Машиностроение, 1968. – 332 с.
6. Орлов Д. Ю. *Повышение надежности и безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов мостового типа* / Д. Ю. Орлов, Г. И. Однокопылов, Ю. А. Орлов // *Архитектура и строительство. Наука, образование, технологии, рынок : тез. докл. науч.-техн. конф. Секция «Совершенствование технологий строительного производства, повышение эффективности труда, уровня технической надежности»*. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2002. – С. 93.
7. Александров М. П. *Грузоподъемные машины : учебник для вузов*. – М. : Высшая школа, 2000. – 552 с.
8. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. *Крановый электропривод: справочник* / А. Г. Яуре, Е. М. Певзнер. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 344 с.; ил.
9. Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л. *Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособ. для вузов по спец. «Электро-механика»*. – М. : Высш. шк., 1988. – 232 с.
10. Оськин С. В. *Автоматизированный электропривод: учебное пособие для студентов вузов* / С. В. Оськин. – Краснодар: Изд-во ООО «КРОН», 2013. – 489 с.

УДК 62-523: 681.51

Мостовий А. Ю. (ЕСА-17м)

## ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

*Вирішення проблеми підвищення надійності та безпечної експлуатації мостових кранів багато в чому визначається особливостями та якісними показниками електроприводу. При цьому підвищення надійності силового перетворювача досягається максимальним спрощенням його структури. Для підвищення надійності важливе значення має суворе дотримання технології виробництва не тільки перетворювачів, а й в першу чергу комплектуючих виробів. Надійність технічної системи обумовлюється поєднанням властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності. Для неремонтуємих об'єктів основною властивістю може бути безвідмовність. Для ремонтваних об'єктів одним з найважливіших властивостей, що складають поняття надійності, може бути ремонтпридатність. У статті розглянуті основні методи забезпечення надійності електроприводів за відомими значеннями інтенсивності відмов та інтенсивності відновлення.*

*Energy saving along with informatization and computerization is one of the main directions of technical policy in all developed countries of the world. At present, increasing the energy efficiency of the equipment is put at the forefront of the development of the national economy. The purpose of the article is to analyze energy saving problems during using a frequency-controlled asynchronous electric drive. The generalized structural scheme of a modern asynchronous electric drive is presented in article. The importance of accounting for losses in steel is considered. For the construction of highly efficient energy-saving frequency-controlled asynchronous electric drives, it is necessary to use the theory of optimal control of induction motor currents.*

На сучасному етапі розвитку науки і техніки системи електроприводу міцно займають лідируюче положення серед приводних пристроїв та забезпечують безперебійну та надійну роботу технологічних механізмів у багатьох галузях промисловості та спеціальної техніки [1].

Енергозбереження, точніше раціоналізація виробництва, розподілу та використання всіх видів енергії, стало в останні 15-20 років поряд з інформатизацією і комп'ютеризацією одним з основних напрямків технічної політики у всіх розвинених країнах світу. Це пов'язано, по-перше, з обмеженістю та неможливістю поповнення всіх основних енергоресурсів, по-друге, з безперервно зростаючими складністю їх видобутку і, відповідно, вартістю, по-третє, з глобальними екологічними проблемами, які з'явилися останнім часом [2].

В даний час підвищення енергоефективності роботи обладнання висувається на перший план розвитку національної економіки. Витрати на заходи по економії 1 кВт потужності обходяться в 4–5 разів дешевше вартості обладнання такої ж потужності, яке знову вводиться в експлуатацію. Економія 1 кВт год при споживанні електричної енергії призводить до економії 3 кВт год первинної енергії природних ресурсів [3].

Метою роботи є аналіз проблем енергозбереження при використанні частотно регульованого асинхронного електроприводу.

В наш час найбільшого поширення для різноманітних електроприводів знаходить асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором. Сучасний асинхронний електропривод реалізується на базі силової напівпровідникової техніки із застосуванням мікропроцесорного управління. Його можливості дозволяють організувати регулювання вихідних координат електроприводу в широкому діапазоні, з високою точністю та швидкодією. Однак навіть в складі частотно-регульованого електроприводу не завжди забезпечуються режими роботи з максимальними енергетичними показниками.

Питання теорії асинхронних електроприводів розглядаються в [1, 3].

На підставі проведеного аналізу складено узагальнену структурну схему сучасного асинхронного електроприводу, яку наведено на мал. 1 [3].

У схемі на рис. 1 ротор АД через передавальний пристрій (ПП) механічно пов'язаний з об'єктом управління (ОУ). АД і ОУ пов'язані з інформаційним пристроєм (ІП), до складу якого можуть входити датчики фазних струмів і напруг, магнітного потоку, кутової швидкості  $\omega$  і кута повороту  $\alpha$  ротора.

По каналах зворотного зв'язку сигнали поточного кута повороту  $\alpha$ , кутової швидкості  $\omega$ , компоненти векторів фазних струмів статора  $\bar{I}_1$  і основного потокозчеплення  $\bar{\Psi}_0$  надходять на входи пристрою управління (ПУ) та обчислювального пристрою (ОП). На вхід ПУ надходить задаючий сигнал – необхідний кут повороту  $\alpha^0$  і необхідна кутова швидкість ротора  $\omega^0$ . На виході ОП формується сигнал завдання необхідного електромагнітного моменту  $M_e^0$ , який повинен створити двигун.

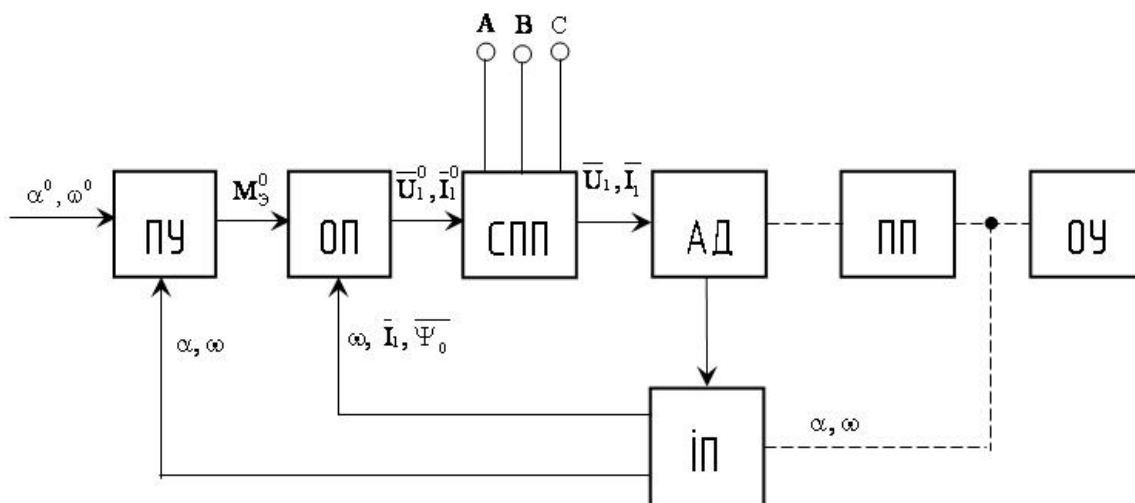


Рис. 1. Узагальнена структурна схема асинхронного електроприводу

На основі цього сигналу і поточного значення  $\omega$ , а також компонент векторів  $\bar{I}_1$  і  $\bar{\Psi}_0$  ОП формує сигнали завдання компонент векторів фазних напруг  $\bar{U}_1^0$  або струмів статора  $\bar{I}_1^0$ . Ці сигнали надходять на входи силового напівпровідникового перетворювача (СПП), який формує компоненти векторів фазних напруг  $\bar{U}_1$  або струмів  $\bar{I}_1$  статора. Управління кутовою швидкістю ротора та кутом повороту ОУ здійснюється за допомогою регулювання електромагнітного моменту  $M_E$  відповідно до рівнянь руху електроприводу:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_E - M_C \qquad \frac{d\alpha}{dt} \frac{d\omega}{dt} = \omega,$$

де  $J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції рухомих частин електроприводу;

$M_C$  – статичний момент.

Відповідно до алгоритму управління, закладеного в ПУ, асинхронний електропривод може працювати в одному з наступних режимів: регулювання, програмний рух, сканування, стеження.

Асинхронні двигуни (АД) перетворюють до 40% вироблюваної в Україні електроенергії. АД при повному завантаженні протягом року перетворює обсяг електроенергії, вартість якої в 6–8 разів перевищує номінальну вартість самого АД. Так при ККД асинхронного двигуна 90 % за рік в ньому виділяються втрати енергії вартістю до 60–80 % самого АД.

Для побудови високоефективних з точки зору енергозбереження частотно-регульованих асинхронних електроприводів необхідно використовувати теорію оптимального управління струмами АД за критерієм мінімуму потужності втрат або максимуму ККД.

Для ефективного управління асинхронним двигуном, що працює в складі частотно-регульованого електроприводу, необхідно знати поточні значення його параметрів – таких як активні опори й індуктивності фаз обмоток статора і ротора, взаємна індуктивність, сумар-



ний момент інерції рухомих частин і статичний момент. Перераховані параметри в процесі функціонування електроприводу можуть змінюватися в силу багатьох причин, наприклад, таких, як нагрівання та охолодження обмоток, зміна стану магнітного ланцюга і ін. Таким чином, для реалізації більш точних алгоритмів управління, що забезпечують ефективне енерго- і ресурсозбереження, необхідна оцінка (ідентифікація) перерахованих параметрів в режимі нормального функціонування електроприводу.

Асинхронний електропривод з векторним керуванням є найбільш досконалим, проте алгоритми векторного керування в більшості випадків не враховують насичення магнітоприводу та втрати в сталі і не забезпечують оптимальних режимів роботи.

З урахуванням зростаючих вимог до енергетичних характеристик асинхронних електроприводів і їх впливу на мережу розвиток отримують перетворювачі, що забезпечують економічні способи управління електроприводами. Зміни схем перетворювачів головним чином пов'язані з появою нових приладів – потужних польових транзисторів (MOSFET), біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT), тиристорів, що замикаються (GTO, IGCT).

Існують наступні тенденції розвитку СПП: розширення меж застосування повністю керованих приладів (транзисторів потужністю до 3-5 МВт, тиристорів потужністю до 5–20 МВт); поширення методів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ); блокові принципи побудови перетворювачів на основі уніфікованих силових гібридних модулів, які виконуються на базі транзисторів і тиристорів; можливість виконання перетворювачів постійного та змінного струму та їх комбінацій на єдиній конструктивній основі, в тому числі на базі інтелектуальних силових модулів.

У системах частотного регулювання швидкості АД переважно використовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму (ПЧЛПС) з автономними інверторами напруги (АІН) або струму (АІС), живлення яких здійснюється від керованих (КВ) або некерованих випрямлячів (НВ). Між випрямлячами та автономними інверторами встановлюються згладжувальні фільтри (ЗФ). Структурні схеми ПЧЛПС наведено на рис. 2, а і рис. 2, б.

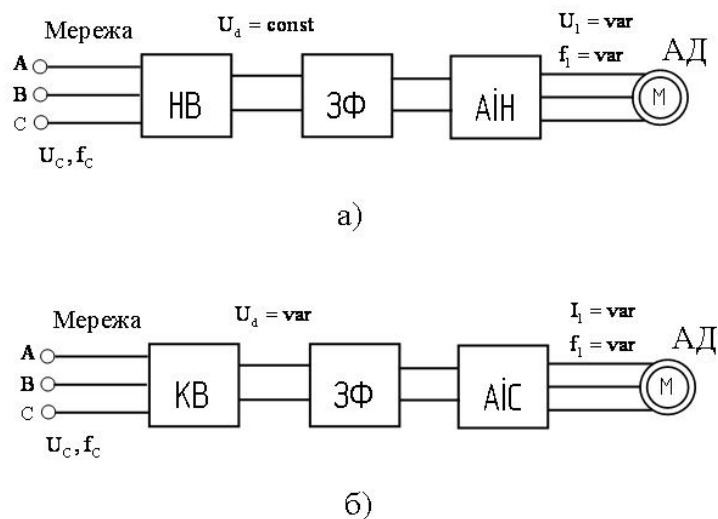


Рис. 2. Структурні схеми СПП для харчування АД з короткозамкненим ротором

Можливість застосування повністю керованих приладів і ШІМ роблять ці схеми найбільш часто використовуваними в широкому діапазоні потужностей. У схемі на рис. 2б існує можливість рекуперації енергії в мережу змінного струму. При цьому КВ переводиться в режим веденого мережею інвертора.

АІН і АІС можуть бути виконані на тиристорах, на тиристорах, що замикають, (GTO і IGCT) або на біполярних, MOSFET і IGBT транзисторах.

Для отримання високих значень ККД в перетворювальній техніці транзистори використовуються переважно в ключовому режимі. При цьому вихідні напруги мають прямокутну або ступінчасту форму. Найбільш поширеною схемою для побудови АІН і АІС є трифазна

мостова, для управління силовими транзисторами може бути використаний 120- або 180-градусний закон комутації.

На сучасному етапі розвитку асинхронного електроприводу найбільшого поширення набули ПЧЛПС, складовою частиною яких являються автономні інвертори на IGBT транзисторах з ШІМ [4-7].

Розробниками та виробниками перетворювачів частоти (ПЧ) є провідні світові електротехнічні фірми – ABB (Швеція, Швейцарія), Control Techniques (Англія), Delta Electronics (Тайвань), Emotron (Швеція), Fuji Electric (Японія), Hitachi (Японія), КЕВ (Німеччина), Leroy Somer (Франція), Mitsubishi Electric (Японія), Omron (Японія), Prostar (Китай), Schneider Electric (Франція), Siemens (Німеччина), ТЕСО (Тайвань), Toshiba (Японія), Yaskawa Electric (Японія) та ін. На території колишнього СРСР виробляються ПЧ наступних марок: «Веспер», «КЕУ», «ОВЕН», «ПЧА», «Сапфір», «Тріол», «Універсал» та ін.

До числа якостей, що забезпечують високі техніко-економічні показники ПЧ, відносяться: висока надійність, що досягається використанням високонадійних спеціальних мікросхем; малі габарити перетворювача, що досягається, поряд з використанням інтегральних модулів та IGBT, застосуванням високоефективного охолодження при малогабаритних радіаторах, а також продуманою конструкцією пристрою; хороші статичні і динамічні характеристики, що роблять привід на базі цих перетворювачів конкурентоспроможним з приводом постійного струму та є результатом використання нових алгоритмів управління, зокрема, векторного управління з датчиком швидкості і без нього; простота введення приводу в експлуатацію завдяки наявності автоматичного підстроювання перетворювача до характеристик двигуна; зручність настройки і обслуговування.

Експлуатаційну надійність електроприводу забезпечує система захистів перетворювача, що включає в себе максимально-струмовий захист, захист від перегріву двигуна та перетворювача, від перевантаження, надмірних відхилень напруги живлення, обриву фази, міжфазного короткого замикання, замикання фази на землю і ін.

Для опису динамічних процесів в АД з урахуванням насичення магнітопроводу широко використовуються два методи: метод статичних індуктивностей [8] і метод динамічних індуктивностей [9]. Останній є істотно складнішим і застосовується рідше. Порівняння результатів розрахунку перехідних процесів прямого пуску АД, виконаного в [10] з використанням обох методів при інших рівних умовах, показує їх близькість один до одного. В [5] вважається, що насичення проявляє себе тільки в зміні коефіцієнта, який зв'язує основний магнітний потік з намагнічувальним струмом, а зв'язок між потоками розсіювання статора і ротора та відповідними струмами залишається таким же, як і в ненасиченої машині і характеризується постійними індуктивностями розсіювання статора і ротора. Аналогічний підхід використовується в [1, 3]. По-суті в [3, 5, 6] використовується лінійна математична модель узагальненої електричної машини зі змінною індуктивністю, що не зовсім коректно.

Втрати в сталі складаються з втрат на гістерезис та вихрові струми. В [5] облік впливу вихрових струмів в сердечниках статора і ротора в перехідних процесах реалізується шляхом введення в схему заміщення двох інтегральних контурів вихрових струмів, тобто математична модель АД з двома обмотками на статорі і роторі та круговим полем в повітряному проміжку складається з чотирьох обмоток по осях узагальненої електричної машини.

Фундаментальні дослідження з метою підвищення енергетичних показників асинхронних машин за рахунок оптимального управління магнітним потоком виконано в [11, 12,]. Там же зроблено справедливий в загальному випадку висновок про те, що необхідною умовою оптимізації по мінімуму потужності втрат є облік насичення магнітопроводу у машині.

В [13] запропонована розширена модель втрат потужності в асинхронній машині. Вона включає активні і магнітні втрати в статорі і роторі, додаткові і механічні. У межах моделі одержано рівняння восьмого ступеня щодо енергетично оптимального значення потоку ротора асинхронної машини та знайдено аналітичне рішення цього рівняння.

В [13] запропоновано математичну модель загальних (сумарних) втрат потужності в частотно-регульованих асинхронних електроприводах, що складаються з втрат потужності у випрямлячі, інверторі та двигуні. Потім за допомогою даної моделі проведена оптимізація загальних втрат потужності в асинхронному електроприводі з АІН - ШІМ.

В [3] вимоги оптимальності по втратах розглянуто по відношенню до двигуна, перетворювача частоти і в цілому до електроприводу. Запропоновано аналітичні та чисельні методи розв'язання задачі оптимізації роботи системи «перетворювач частоти-асинхронний двигун».

Розглянуто вплив режимів двигуна на характеристики ПЧ і в першу чергу на потужність втрат в ПЧ при постановці завдання оптимізації по мінімуму сумарних втрат електроприводу. Результати досліджень статичних характеристик двигуна показують, що АД як об'єкт управління має екстремальні характеристики по ряду приватних критеріїв якості. Наявність екстремумів струму статора і активної потужності обумовлює екстремальний характер окремих складових електричних втрат випрямляча, інвертора і сумарних електричних втрат перетворювача. Зокрема, режим мінімальних втрат АД забезпечує мінімум електричних втрат в джерелі живлення АІН.

### ВИСНОВКИ

Актуальною є побудова математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітопроводу і втрат в сталі, що дозволить підвищити точність розрахунків при моделюванні, а також розробляти енергозберігаючі алгоритми управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу.

Для вирішення проблеми енергозбереження потрібна розробка алгоритму функціонування і функціональної схеми асинхронного електроприводу з оптимальним частотно-струмовим керуванням при врахуванні насичення магнітопроводу і втрат в сталі за умови максимуму ККД та мінімуму потужності втрат в обмотках і сердечниках.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Булгаков. – М. : Наука, 1966. – 297 с.
2. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко – М. : Издательский дом «Академия», 2008. – 208 с.
3. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Академия, 2004. – 256 с.
4. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М. : Академия, 2004. – 576 с.
5. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М. : Академия, 2006. – 272 с.
6. Терехов В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М. : Академия, 2006. – 304 с.
7. Фираго Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячек. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
8. Суптель А. А. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / А. А. Суптель. – Чебоксары: Изд-во Чуваши, ун-та, 2000. – 164 с.
9. Фильц Р. В. Дифференциальные уравнения напряжений насыщенных неявнополюсных машин переменного тока / Р. В. Фильц // Изв. вузов. Электротехника. – 1966. – № 11. – С. 1195–1203.
10. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
11. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М. : Энергия, 1974. – 328 с.
12. Шрейнер Р. Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. – Кишинев : Штиинца, 1982. – 234 с.
13. Приймак Б. И. Аналитическое определение энергетически оптимального значения потока ротора асинхронной машины / Б. И. Приймак // Электричество. – 2005. – № 12. – С. 36–43.

УДК 62-523: 681.51

Нікітінській Е. С. (ЕСА-17М)

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ МАШИН ТА МЕХАНІЗМІВ ЗВОРотно-ПОСТУПАЛЬНОЇ ДІЇ

*Одним з найважливіших завдань сучасного електроприводу є перехід до регульованих по швидкості електроприводів змінного струму. Можливе застосування синхронних електроприводів на базі синхронних двигунів, які працюють в режимі безконтактних двигунів постійного струму для регулювання швидкості, а також працюють в режимі моментних двигунів. При аналізі та синтезі синхронних електроприводів застосовується теорія узагальненої машини, яка дозволяє, використовуючи систему координат  $d, q$ , пов'язану з ротором-індуктором, уявити СД в сталому режимі стаціонарним об'єктом регулювання. Важливою перевагою СД є їх робота з постійною швидкістю обертання. Жорсткість механічної характеристики синхронної машини дорівнює нескінченності. Одним із завдань теоретичного дослідження є підвищення точності математичного опису СЕП з урахуванням нелінійності магнітопроводу та втрат в сталі.*

*One of the most important tasks of the modern electric drive is the transition to variable-speed AC electric drives. It is possible to use synchronous electric drives on the basis of synchronous motors operating in the mode of contactless DC motors for speed control, as well as operating in the torque motors mode. In the analysis and synthesis of synchronous electric drives, the theory of a generalized machine is applied, which allows, using the coordinate system  $d, q$ , associated with the inductor rotor, to represent the synchronous motor in steady state by a stationary control object. An important advantage of synchronous motor is their work with a constant speed of rotation. The rigidity of the mechanical characteristic of a synchronous machine is equal to infinity. One of the tasks of the theoretical study is to increase the accuracy of the mathematical description of the synchronous electric drive taking into account the nonlinearity of the magnetic core and the losses in steel.*

У тих областях застосування, де потрібні висока та стабільна точність виконання технологічних операцій, висока динаміка системи, великі швидкості обробки, доцільно використовувати синхронні електроприводи. Основою такого електроприводу є синхронний двигун з електромагнітним збудженням, обмотка ротору якого одержує живлення від перетворювача частоти. При цьому управління перетворювачем частоти здійснює пристрій автоматичного регулювання, до якого вводиться завдання швидкості електропривода, а також надходить інформація від датчиків кутового положення та струмів ротора. Унікальна властивість синхронного електромеханічного перетворювача – абсолютна жорсткість механічної характеристики – дозволяє будувати синхронні електроприводи, як з точним підтриманням частоти обертання, так і з точним підтриманням електромагнітного моменту [1, 2, 3].

Метою роботи є аналіз перспектив розвитку та основних методів дослідження синхронного електроприводу.

Одним з найважливіших завдань сучасного електроприводу є перехід до регульованих по швидкості електроприводів змінного струму. У країнах Західної Європи концепція побудови регульованих електроприводів змінного струму розділена між асинхронними машинами з перетворювачами частоти та електроприводами з синхронними машинами різного конструктивного виконання [4]. Кожен з видів двигунів змінного струму має свою доцільну область практичного застосування в регульованих електроприводах [5]. Для синхронного двигуна (СД) такою областю є перш за все електроприводи середньої і великої потужності з досить великим діапазоном регулювання швидкості.

Основною вимогою, що пред'являється до робочих машин зі спокійним режимом навантаження, є економічність. Для машин з високою динамічним режимом навантаження першорядними вимогами є швидкодія, діапазон та якість регулювання швидкості, а також висока кратність максимального моменту, а вимоги до економічності самого електропривода грають підпорядковану роль.

На безперервно-потоківих виробництвах різноманітних галузей промисловості – металургійної, целюлозно-паперової, текстильної, хімічної, шинної та ін. – виникає необхідність забезпечити регулювання швидкості і підтримки заданого натягу оброблюваних виробів.

У таких системах можливе застосування синхронних електроприводів на базі синхронних двигунів, що працюють в режимі безконтактних двигунів постійного струму для регулювання швидкості, а також працюють в режимі моментних двигунів для регулювання натягу стрічкового виробу [3].

Традиційно при аналізі та синтезі синхронних електроприводів застосовується теорія узагальненої машини, яка дозволяє, використовуючи систему координат  $d, q$ , пов'язану, з ротором-індуктором, отримати в стаціонарному режимі постійні струми та напруги синхронного двигуна, а в перехідних режимах – струми та напруги, які плавно змінюються. Однак при використанні теорії узагальнених машин нехтують нелінійністю магнітопроводу та втратами в сталі статора. Разом з тим насичення за основним магнітним потоком впливає на параметри та властивості синхронного двигуна, але не перешкоджає реалізації можливостей синхронного двигуна в регульованих електроприводах, якщо вплив насичення якимось чином буде враховано при розробці електроприводу. Вихрові струми також впливають на характеристики синхронного двигуна [3].

Все більшої актуальності набуває на сьогоднішній день проблема раціонального використання електричної енергії. Знизити енерговитрати в синхронному електроприводі можливо шляхом зменшення втрат, використовуючи алгоритми оптимізації за критерієм мінімуму сумарної потужності втрат в міді та в сталі.

Таким чином, завдання розробки синхронного електроприводу з регульованим моментом, підвищення точності його математичного опису та зменшення втрат в міді і сталі синхронного двигуна є актуальними.

Блок-схему силової частини синхронного електроприводу (СЕР) представлено на рис. 1.

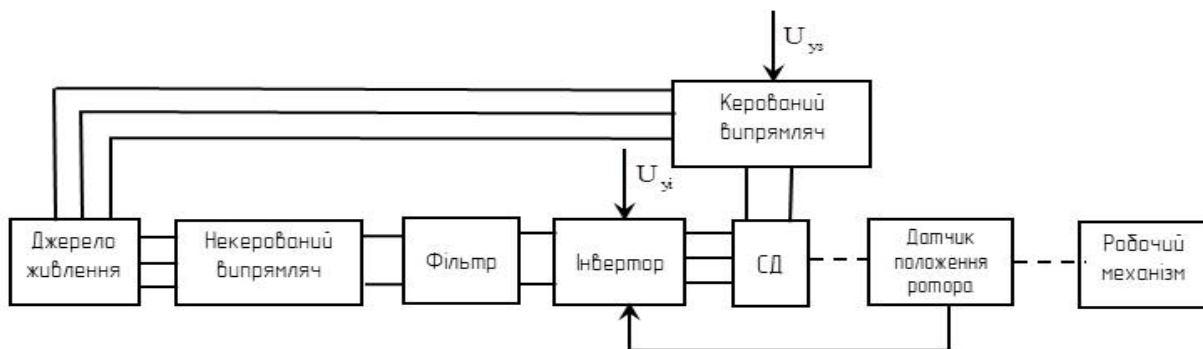


Рис. 1. Блок-схема силової частини СЕР

Сучасні регульовані електроприводи з СД мають певну спільність щодо складу, взаємозв'язку основних частин, принципу дії. Ці загальні риси відображено на функціональній схемі рис. 2.

Обмотка ротора синхронного двигуна СД живиться від напівпровідникового перетворювача частоти ПЧ, обмотка збудження – від напівпровідникового збудника НЗ. Управління перетворювачем частоти (ПЧ) та збудником здійснює пристрій автоматичного регулювання ПАР. У цей пристрій вводиться завдання швидкості електропривода. Крім цього надходить інформація про стан ротора двигуна від датчика кутового положення ротора ДПР, механічно з'єднаного з двигуном, а також про електричний стан двигуна від датчиків струму ротора ДСР та збудження ДСЗ. Особливістю управління ПЧ є використання сигналів датчика кутового положення ротора двигуна, який визначає кутове відносне розташування осей обмотки збудження ротора та осей статорних обмоток двигуна. При цьому в будь-якому сталому режимі вихідна частота перетворювача частоти буде в точності співпадати з частотою ЕРС обертання СД. Такий принцип дії – принцип вентильного двигуна (ВД) або безконтактного двигуна постійного струму (БДПС). Режими вентильного двигуна істотно відрізняються від режимів звичайного СД, що живиться від мережі, тим, що за своїми характеристиками ВД є альтернативою колекторного двигуна постійного струму.

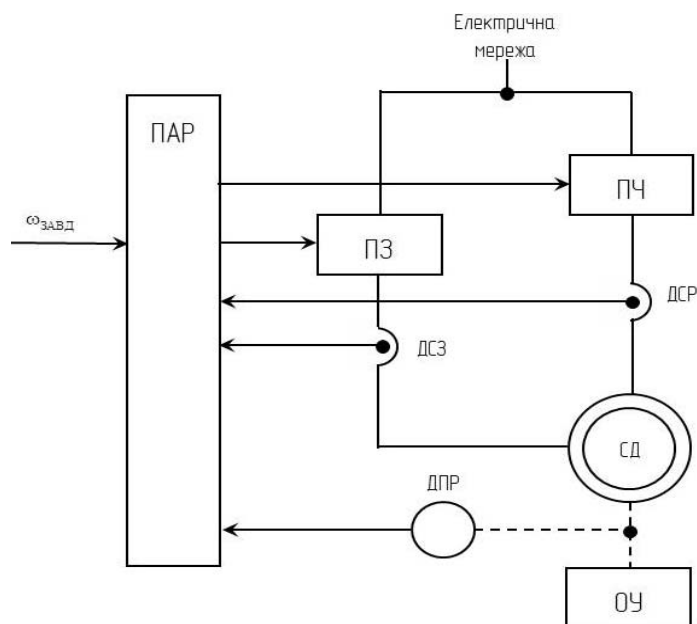


Рис. 2. Функціональна схема синхронного електроприводу

Коефіцієнт корисної дії сучасних СД досягає значення 96-98%. Важливою перевагою СД в конструктивному відношенні є більший повітряний зазор, ніж у асинхронних двигунів. Тому зношування підшипників майже не змінює властивостей СД. З точки зору перевантажувальної здатності СД займають особливе становище в порівнянні з іншими електродвигунами. По-перше, СД характеризуються лінійною залежністю статичної перевантажувальної здатності від напруги мережі живлення, тоді як асинхронні двигуни – квадратичною залежністю. По-друге, СД в силу властивостей синхронного режиму володіють різною перевантажувальною здатністю при поступовому та миттєвому підвищенні навантаження. Перевантажувальна здатність СД при різкоперемінному навантаженні вище, ніж при статичному (поступовому) збільшенні навантаження внаслідок виникнення в обмотці збудження перехідних струмів. При автоматичному регулюванні збудження перевантажувальну здатність СД можна змінювати. Для збереження постійної перевантажувальної здатності двигуна в більшості схем автоматичного регулювання передбачається автоматичне збільшення струму збудження при прикладанні ударного навантаження або зниженні величини напруги живлення [3].

І, нарешті, важливою перевагою СД є їх робота з постійною швидкістю обертання. Жорсткість механічної характеристики синхронної машини дорівнює нескінченності. Оскільки ротор двигуна обертається з синхронною швидкістю та ковзання відсутнє, то вся потужність електромагнітного поля статора перетворюється в механічну потужність на валу синхронного двигуна.

Наприклад, використання регульованих безредукторних тихохідних електроприводів для цементних та рудорозмельних млинів дозволяє встановлювати оптимальний технологічний режим, створювати агрегати великої одиничної потужності без використання редукторів на величезні моменти. Швидкохідні електроприводи турбокомпресорів, що використовуються в хімічній промисловості, дозволяють найбільш економічно регулювати продуктивність при змінах технологічних режимів.

Поряд з цим є цілий ряд робочих машин, на яких традиційно використовувалися електроприводи постійного струму, де перехід до регульованим СЕП також дасть значний ефект підвищення продуктивності, якості продукції агрегатів, надійності конструкції. Тут грають роль такі властивості СД, як практично необмежена одинична потужність, висока перевантажувальна здатність, швидкодія системи автоматичного регулювання, широкі можливості вибору габаритних розмірів двигуна, можливість роботи в агресивних та вибухонебезпечних середовищах, при різних тисках, вологості та температурах [3].

Наприклад, для головних приводів редуційних трубопрокатних станів, як показують розрахунки, перехід до синхронних приводів дозволить в 2–3 рази знизити динамічне падіння та час відновлення швидкості, отже, зменшити довжину зтовшених кінців труб, підвищити вихід придатної продукції при штучній прокатці. На основі регульованих електроприводів з СД може бути вирішена також проблема безредукторних головних приводів безперервних станів прокатки труб на оправці, що входять до складу найбільш продуктивних агрегатів, які випускають безшовні труби.

Вибір конструкції двигуна обумовлено вимогами, що пред'являються до електроприводу. Так, якщо це низькочастотний високодинамічний електропривод, то неявнополюсний СД з електромагнітним збудженням в одній осі має переваги перед явнополюсним СД по механічній надійності, але поступається йому в відношенні втрат на збудження. Крім того, неявнополюсному СД потрібен підвищений запас по напрузі ротора, що викликається підвищеним еквівалентним значенням поперечної складової індуктивного опору, тому дана конструкція рекомендована для приводів зі спокійним режимом роботи.

Для приводів середньої та великої потужності доцільно використовувати явнополюсний з електромагнітним збудженням СД, для високодинамічних приводів – явнополюсний з електромагнітним збудженням компенсований СД. Такий двигун має електромагнітне збудження в двох осях, тобто на індукторі в пазах розміщена друга обмотка збудження, МДС якої спрямовано по поперечній осі. Ця поперечна обмотка призначена для компенсації реакції ротору, тобто грає таку ж роль, як компенсаційна обмотка в двигуні постійного струму [2, 3].

Дуже широке використання серед синхронних електроприводів в промисловості отримали моментні електроприводи, які можуть бути призначені для кутового переміщення об'єкта управління, для його обертання з необхідною частотою – постійної або змінною по деякому закону, а також для прикладання до об'єкту управління необхідного моменту.

Моментний електропривод (МЕП) знаходить застосування в гіроскопічних та гіродіних системах. У приладових системах моментний двигун використовується як корекційний; в системах з силовими гіроскопами МЕП дозволяє керувати положенням приладової платформи або космічного літального апарату.

В електромеханічних системах управління становищем антен, телескопів, фото- і кіноапаратів, сонячних, зоряних датчиків, прицілів, далекомірів, дзеркал та інших оптичних і оптико-електронних приладів, а також в роботах і маніпуляторах широко застосовуються одно- та багатодвигунні МЕП. При їх експлуатації на рухомих платформах – на наземному транспорті, на морських судах і літальних апаратах – виявляється унікальні властивості МЕП.

При аналізі та синтезі СЕП широко використовується теорія узагальнених машин. Вона дозволяє, використовуючи систему координат  $d, q$ , пов'язану з індуктором, уявити СД в сталому режимі стаціонарним об'єктом регулювання. В цьому випадку система рівнянь електромеханічного перетворення енергії не містить параметри, які явно залежать від часу або кута повороту ротора, а струми та напруги відображаються не синусоїдальними, а постійними функціями [2, 6, 7, 8].

Слід зазначити, що при використанні теорії узагальнених машин приймається ряд припущень, зокрема, нехтують нелінійністю магнітопроводу статора та втратами в сталі. Однак насичення по основному магнітному потоку впливає на параметри і властивості СД. Разом з тим цей вид насичення не перешкоджає реалізації можливостей СД в регульованих електроприводах, якщо вплив насичення якимось чином буде враховано при розробці електроприводу. Крім цього в магнітопроводі статора СД є замкнуті контури – контури вихрових струмів. Вихрові струми впливають на характеристики СД і тому їх також необхідно враховувати [9]. Таким чином, одним із завдань теоретичного дослідження є підвищення точності математичного опису СЕП з урахуванням нелінійності магнітопроводу та втрат в сталі.

Основним шляхом вирішення даного завдання є застосування теорії багатообмоточного трансформатора, з точки зору якої магнітний потік машини можна уявити таким, що складається з двох складових – проекції вектора основного магнітного потоку на вісь фази або обмотки та магнітного потоку розсіювання. При цьому нелінійність магнітопроводу слід враховувати введенням в математичну модель елемента, який описується кривою намагнічування, а втрати в сталі – введенням трифазної обмотки вихрових струмів.

Джерелом живлення служить трифазна мережа змінного струму промислової частоти. У цьому випадку обов'язкова наявність ланки постійного струму, яке складається з напівпровідникового випрямляча та фільтра, що згладжує. Випрямлена напруга надходить на вхід трифазного транзисторного інвертора, до виходу якого підключається обмотка статора СД, що приводить в дію робочий механізм. Залежно від кутового положення ротора щодо статора, датчик положення ротора виробляє комбінацію сигналів, що надходять на управління силових ключів інвертора. Це забезпечує їх перемикання таким чином, щоб розташування векторів МДС статора та ротора становило  $\pi/2$ . Ця умова є найкращою в сенсі забезпечення максимуму електромагнітного моменту, який виникає при взаємодії полів статора та ротора.

З огляду на наявність в СЕП електромеханічного перетворювача – електричного двигуна та напівпровідникових перетворювачів – перетворювача частоти і керованого випрямляча, його можна віднести до класу електромашинних вентильних систем зі змінною структурою.

Одним з методів математичного дослідження, що застосовуються при аналізі електромашинних вентильних систем, є чисельно-аналітичний метод [8, 9]. Аналітичне дослідження полягає в розробці та описі схеми заміщення електромеханічного перетворювача, визначенні параметрів його окремих елементів, запису алгебраїчних та інтегрально-диференціальних рівнянь окремих ланок і всієї системи в цілому та перетворенні отриманих рівнянь до вигляду, зручного для розрахунку їх на ЕОМ. Чисельне дослідження полягає в розробці програмного забезпечення для розрахунку характеристик на ЕОМ та систематизації отриманих результатів.

## ВИСНОВКИ

Проведений аналіз можливостей роботи СД в різних режимах показує великі перспективи широкого практичного застосування регульованих синхронних електроприводів і разом з тим масштабність і складність завдань в цій області.

При аналізі та синтезі СЕП широко використовується теорія узагальнених машин. Вона дозволяє, використовуючи систему координат  $d, q$ , пов'язану з індуктором, уявити СД в сталому режимі стаціонарним об'єктом регулювання.

Одним із завдань теоретичного дослідження є підвищення точності математичного опису СЕП з урахуванням нелінійності магнітопроводу і втрат в сталі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Онищенко Г. Б. *Автоматизированный электропривод промышленных установок* / Под ред. Г. Б. Онищенко. – М. : РАСХН, 2001. – 520 с.
2. Аракелян А. К. *Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод: В 2 т.* / А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – Т. 1-2.
3. Белов М. П. *Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и производственных комплексов: Учебник для вузов* / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
4. Бут Д. А. *Бесконтактные электрические машины* / Д. А. Бут. – М. : Высшая школа, 1985. – 255 с.
5. Постников С. Г. *Разработка и исследование системы электропривода на базе индукторного двигателя с независимым возбуждением* / С. Г. Постников, Л. А. Садовский // *Приводная техника*. – 2002. – № 1. – С. 48–54.
6. Вейнгер А. М. *Регулируемый синхронный электропривод* / А. М. Вейнгер. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
7. Горев А. А. *Переходные процессы синхронной машины* / А. А. Горев. – Д. : Паука, 1985. – 502 с.
8. Копылов И. П. *Математическое моделирование электрических машин* / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
9. Фильц Р. В. *Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин* / Р. В. Фильц, П. Н. Лябук. – Львов : Світ, 1991. – 176 с.



**Розділ 1. Машинобудування**

<i>Берус С. М. (ТМ-17-1м)</i> Зняття внутрішніх напружень композиційного покриття деталей ролику рольгангу	3
<i>Каמיшина А. В. (ТМ-17-1зм)</i> Метод зміцнення робочих поверхонь деталей машин шляхом обробки високовольтними імпульсними розрядами електричного струму	8
<i>Кравцов И. Д. (ТМ-17зм)</i> Диагностика и технологическое обеспечение производства центробежного насосного агрегата	11
<i>Нос Р. С. (ТМ-17-1зм)</i> Автоматична гнучка система для виробництва гідроциліндрів	17
<i>Орленко М. В. (ТМ-17-1зм)</i> Дослідження акустичної дефектоскопії зразків деталей машин	21
<i>Стукалова О. В. (ТМ-17м)</i> Розробка нового способу вібростабілізації залишкових напружень	26
<i>Ткач М. М. (ТМ-17-2м)</i> Розробка та дослідження способу підготовки до експлуатації ріжучого інструменту з механічним кріпленням пластин	29
<i>Бойко О. О., Буглак С. С., Баган А. В. (ЗВ-2м)</i> Матеріали для підвищення стійкості деталей, виготовлених з хромистих сталей	33
<i>Гайворонський О. О., Величко Є. О., Буряк С. С., (ЗВ-2м), Прайс Л. А. (ЗВ-16-1)</i> Порошкові дроти для збільшення твердості наплавленого металу, що працює при підвищених температурах	37
<i>Кейс В. С., Адилін О. М. (ЗВ-17м)</i> Вплив магнітного поля на процеси кристалізації металу при виготовленні конструкцій	40
<i>Малієв І. В. (ЗВ-17-м)</i> Підвищення продуктивності при ремонтному зварюванні	44
<i>Мельников І. І., Пашетнєв А. Г. (ЗВ-19м)</i> Порошкові дроти для зменшення неметалевих та шлакових включень наплавленого металу, що працює при підвищених температурах	49
<i>Пустовіт Р. М., Прокопенко М. А., Сичков А. В. (ЗВ-18м)</i> Формування складу порошкового дроту методом статистичного моделювання	53
<i>Шилюк І. К., Терещенко М. С., Юраков М. О. (ЗВ-18м)</i> Дослідження властивостей наплавленого металу	57

## Розділ 2. Економіка

<i>Матюшин І. В. (МН-1м)</i> Інноваційні підходи щодо навчання персоналу	62
---	----

## Розділ 3. Загальний розділ

<i>Бавика А. Ю. (АВП-17-1м)</i> Підвищення ефективності роботи ШПМ шляхом дослідження системи управління	69
<i>Карягін Ж. Г. (КН-17-1м)</i> Дослідження методів моделей та інформаційних технологій для розробки математичної моделі оцінки значень параметрів імпульсного процесу	74
<i>Коробкін В. О. (АВП-17-2м)</i> Контроль ступеню завершеності процесу графітації вугільних електродів	78
<i>Кохан Д. С. (АПП-17-1зм)</i> Математичне моделювання теплових параметрів відновлювального періоду плавки в дуговій сталеплавильній печі	81
<i>Лобинцев М. А. (АПП-17-1зм)</i> Математичне моделювання теплового стану сляба у зварювальній зоні методичної печі	85
<i>Пчелинцева К. О. (АПП-17-1зм)</i> Зниження енерговитрат процесу газоочищення доменної печі шляхом розробки системи автоматичного регулювання тиску під колошником	90
<i>Радченко В. В. (АВП-17-2м)</i> Дослідження системи керування електроприводу сушильного барабану	95
<i>Зоря Я. І. (ЕСА-17м)</i> Методи забезпечення надійності електроприводів вантажопідіймальних кранів	100
<i>Мостовий А. Ю. (ЕСА-17м)</i> Проблеми енергозбереження при використанні частотно-регульованого асинхронного електроприводу	105
<i>Нікітінський Е. С. (ЕСА-17м)</i> Перспективи розвитку синхронного електроприводу для машин та механізмів зворотно-поступальної дії	110

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації у збірнику приймаються матеріали обсягом від 4 до 10 повних сторінок. Матеріали подаються надруковані у 1 примірнику і (*обов'язково*) електронний варіант.

Текст розмістити на білому папері формату А4 (210 × 297 мм) з полями 2 см з усіх боків. Абзац повинен мати наступний формат: відступ зліва і справа – 0 см; новий рядок – відступ 1,25 см; інтервал до і після абзацу – 0 см. Сторінки не нумерувати. Орієнтація сторінки для розміщення тексту – книжкова. Для розміщення табличних даних, графіків, схем, малюнків при необхідності допускається альбомна орієнтація сторінки.

Структура статті повинна містити наступні розділи:

– **постановка проблеми**, завдання в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

– **аналіз останніх публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор (*не менше 3-х статей, що вийшли за останні 10 років*); виокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття;

– **формулювання мети статті** (з нового рядка – «*Метою роботи є ...*») і постановка приватних завдань, які вирішуються в статті;

– **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

**Текст статті** оформити в редакторі Word 10.0 (HE XP), шрифтом Times New Roman розміром 12 пт; між рядками – один інтервал; новий рядок – відступ 1,25 см; вирівнювання по ширині сторінки з переносами. Текст анотацій і список літератури оформити шрифтом Times New Roman Суг (*курсив*) розміром 10 пт; між рядками – один інтервал.

**Ілюстративний матеріал** монтується безпосередньо у тексті. Дозволяється обтікання малюнків текстом. Назва повинна бути короткою і відображати зміст малюнка. Підпис розміщують під малюнком, вирівнювання – по ширині, з нового рядка.

**Формули** набираються у редакторі Microsoft Equation 2.0/3.0 з параметрами: звичайний – 12 пт; крупний індекс – 10 пт; дрібний індекс – 8 пт; великий символ – 14 пт; дрібний символ – 8 пунктів. Вирівнювання – по центру, без відступу, номер – по правому краю, до і після формули – порожній рядок.

**Таблиці** відділяються від попереднього тексту порожнім рядком. Назва таблиці має бути стислою і відбивати зміст таблиці. Напис - Таблиця 1 - по правому краю. Назва таблиці - на наступному рядку по центру.

**Порядок оформлення статей.** На першій сторінці статті, в першому рядку з абзацу набирається індекс УДК. Через рядок з абзацу – прізвище та ініціали автора, в дужках вказати групу. Нижче з абзацу, шрифтом Times New Roman (звичайний), розміром 12 пт, прописними буквами без переносів, з вирівнюванням по центру – назва статті. Потім шрифтом Times New Roman Суг (*курсив*), розміром 10 пт з вирівнюванням по ширині сторінки – анотації на мові статті та англійською мовою, з нового рядка кожна, загальним обсягом до 10 рядків. Через рядок з абзацу – текст статті. У тексті статті допускаються підзаголовки, розміщені в окремому рядку з абзацу, маркери.

Заголовок **ВИСНОВКИ** починається з нового рядка, набраний прописними буквами, шрифтом Times New Roman (звичайний), розміром 12 пт, вирівнювання – по центру. Вирівнювання основного тексту висновків – по ширині.

**Список літератури** озаглавлювати словами СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ, набраними шрифтом Times New Roman Суг (звичайний) розміром 12 пт прописними літерами по центру сторінки через рядок від тексту ВИСНОВКІВ. Список літератури оформити згідно ДСТУ ГОСТ 7.1: 2006 шрифтом Times New Roman Суг (*курсив*) розміром 10 пт. Кожне найменування з нового рядка, вирівнювання – по ширині, одинарним інтервалом набирається нумерований список літератури.

Як приклад з оформлення можна розглядати статті цього збірника.

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**СТУДЕНТСЬКИЙ  
ВІСНИК  
ДДМА**

**Тематичний збірник наукових праць**

Технічне редагування, коректування, розробка оригінал-макета:  
Катюха О. Л.

Формат 60 × 90 1/8.  
Ум. друк. арк. 13,72.  
Тираж 30 прим. Замовлення № 57.

---

Засновник, видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
серія ДК № 1633 від 24.12.03.