

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри МЛВ
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр КУЗИК
« ____ » _____ 20 ____ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему:
“Проектування і розрахунок індукційного каналного міксера
продуктивністю 16 т/год.”

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ПМ-22мб-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Артем БУРКУТЕНКО
« ____ » _____ 20 ____ р.

Керівник бакалаврської роботи
Старший викладач
_____ Микола БОСИЙ
« ____ » _____ 20 ____ р.

Рецензент
канд. техн. наук, доцент
_____ Любова ОЛІЙНИЧЕНКО
« ____ » _____ 20 ____ р.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: механіко-технологічний

Кафедра: матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри МЛІВ

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Буркутенка Артема Сергійовича

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок індукційного каналного міксера продуктивністю 16 т/год.
2. Керівник роботи: Старший викладач Босий Микола Вікторович
3. Строк подання роботи до захисту
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: вивчення конструкції роботи індукційно каналного міксера та розрахувати основні його розміри, виконати електротехнічний розрахунок. Визначити матеріальний і тепловий баланси проектованого обладнання.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури		
2	Проведення розрахунку основних розмірів, електротехнічних характе-		

	ристик, матеріальний та тепловий баланси проєктованого обладнання, обробка фактичного матеріалу		
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівнику		
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту		
5	Перевірка роботи на плагіат		
6	Зовнішнє рецензування роботи		
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії		

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 20__ р.

Підпис керівника

_____ Микола БОСИЙ

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 20__ р.

Підпис здобувача

_____ Артем БУРКУТЕНКО

АНОТАЦІЯ

Буркутенко А. С. "Проектування і розрахунок індукційного каналного міксера продуктивністю 16 т/год." спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025. 38 с. Матеріали ілюстрації 2 іл.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи полягає у вивченні, перше – конструкції та роботи даного індукційного каналного міксера, а подруге – це розрахунок розмірів ІКМ, а також електротехнічних параметрів та визначення матеріального та теплового балансу проєктованого ІКМ продуктивністю 16 т/год.

Проектування та розрахунок ІКМ полягає в наступному: це розрахунок плавильного агрегату ІКМ та визначення основних розмірів, також визначення його електротехнічних параметрів, розрахунок та визначення матеріального і теплового балансів для його проєктування.

Графічна частина ІКМ включає перше загальний вигляд ІКМ, а також його індуктора.

ІКМ, матеріальний баланс, електротехнічний розрахунок, тепловий баланс

ABSTRACT

Burkutenko A. S. "Design and calculation of an induction channel mixer with a capacity of 16 t/h." specialty 131 "Applied mechanics", OPP – "Computer engineering technologies, robotics and 3D printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025. 38 p. Illustration materials 2 ill.

The purpose of the qualification bachelor's thesis is to study, first, the design and operation of this induction channel mixer, and secondly, the calculation of the dimensions of the PCM, as well as electrical parameters and the determination of the material and heat balance of the designed PCM with a capacity of 16 t/h.

The design and calculation of the PCM consists of the following: this is the calculation of the melting unit of the PCM and the determination of the main dimensions, as well as the determination of its electrical parameters, the calculation and determination of the material and heat balance for its design.

The graphic part of the PCM includes, first, a general view of the PCM and its inductor.

PCM, material balance, electrical calculation, heat balance

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ІНДУКЦІЙНІ КАНАЛЬНІ ПЕЧІ (ІКП) ТА МІКСЕРИ (ІКМ).....	9
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА РОБОТА ІНДУКЦІЙНОЇ КАНАЛЬНОЇ ПЕЧІ ТА МІКСЕРА	19
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ ІКМ.....	22
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ.....	23
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ.....	24
РОЗДІЛ 6. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	27
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33
ДОДАТКИ.....	34
Додаток 1. Індуктор (Індукційна одиниця) ІКМ.....	35
Додаток 2. Загальний вигляд каналного міксера.....	36

ВСТУП

В сучасних галузях виробництва, таких як машинобудування, агропромисловий комплекс, виробництво сільськогосподарської техніки, хімічна промисловість використовуються якісні метали та сплави з добрими механічними та фізичними властивостями, які виплавляються в індукційно каналних печах. Вимоги, які ставляться до металів та сплавів, таких як висока міцність, високотемпературність, жароміцність наразі задовольняються при виплавленні їх в сучасних індукційних каналних печах та міксерях.

В індукційних каналних печах виплавляють метал та сплави різних видів, але з однорідним і точним складом за допомогою перемішування металу та відсутністю температурних перепадів. Періоди плавлення в індукційних каналних печах наступні: перше – завантаження та плавлення металеві шихти, друге – доведення металу або сплаву по хімічному складу, а також температурі, третє – це вже випуск і розливка металу у ливарні форми.

Перевага ІКП полягає в наступному: це нагрівання та перегрів металу до відповідних високих температур; в процесі нагрівання металу відсутнє його науглецювання; продуктивність ІКП в порівнянні з іншими плавильними агрегатами має високе значення, так ККД печі становить 70%; в ІКП отримуємо однорідний хімічний склад сплаву при його обов'язковому перемішуванні; плавлення та перегрів металу можна виконувати в різних середовищах.

Недоліки ІКП полягають в наступному: це перше – низька температура та рафінуюча здатність самого шлаку; друге – невелика поверхня розділу метал-шлак в порівнянні з іншими плавильними печами; третє – також недостатня стійкість футеровки при порівнянні з другими агрегатами для виплавки металу.

Наряду з наведеними вище перевагами ІКП та ІКМ, які звісно забезпечують відповідність якості литва, та з найменшими втратами при індукційному плавленні металу ІКП має також і ще найбільшу продуктивність. Також треба враховувати більш сприятливі умови роботи та більш високу продуктивність праці при роботі на ІКП при індукційному плавленні металів та

сплавів. Врахувавши всі ці переваги індукційної плавки та недоліки натепер ІКП дуже широко застосовують для плавлення та перегріву різних металів та сплавів.

В індукційних печах також можна легко здійснити вакуум, а також поєднати атмосферну плавку та вакуумну обробку, та використання без захисної атмосфери. Застосування вакуумної індукційної плавки дає можливість отримувати добрі показники при виробництві, наприклад, напівпровідників, а також високотемпературних та жароміцних сплавів. Використовуючи поєднання індукційної атмосферної плавки та вакуумної обробки, яка буде здійснюватися під шаром захисної атмосфери, отримуємо добрі показники при виробництві також і безкисневої міді, яку можна плавити у відкритій індукційній печі, а потім розливати під шаром так званої захисної атмосфери [1].

Наразі в наш час ІКП використовують також і для плавлення багатьох металів та сплавів, але за виключенням, наприклад, таких як тугоплавких, тобто це ніобієвих, вольфрамових, танталових, молібденових і т.п., треба використовувати такі способи електронагріву як електронно-променевий та плазмовий [1,2].

Тугоплавкі метали та сплави можна отримувати при використанні індукційної плавки – це так звана безтигельна плавка, тобто у такому вільно підвішеному стані доречі в електромагнітному полі; можна використовувати також метод послідовного оплавлення стержня тому, що він швидко пересувається крізь сам індуктор; ще можна також плавлення у автоматичному тиглі і т.п.).

Наразі визначення матеріальних і теплових балансів дає можливість використовувати індукційну плавку, що призводить до значного покращення конструкції ІКП, це враховується при проектуванні печей великої ємності.

Наразі у наш час працюють каналні індукційні печі та міксери власного виробництва для плавлення кольорових сплавів, наприклад, алюмінію, а також міді продуктивністю 10 т, а також тигельні індукційні печі відповідно промислової частоти продуктивністю 4 т для плавки алюмінієвих сплавів.

РОЗДІЛ 1. ІНДУКЦІЙНІ КАНАЛЬНІ ПЕЧІ (ІКП) ТА МІКСЕРИ (ІКМ)

Перша канална індукційна піч виконана з відкритим горизонтальним каналом та кільцеподібною формою жолобу із тигельної маси, була побудована у 1890 році. В цій КІП після плавки половина металу повинна зливатися, а друга половина залишалася у печі, для підтримування замкненого вторинного ланцюга. Індуктор першої каналної печі виготовляли з мідної трубки з наближено біля 28 витків, він охолоджувався водою. Для трансформатора каналної печі використовували однофазний магнітопровід. Все ж таки перша канална піч не отримала такого бажаного розповсюдження на виробництві тому, що недоліком була її незручність – вона швидко виходила із роботи, так як мала недосконалу футеровку плавильного каналу [1].

Промислова канална піч була побудована в 1900 р. вона використовувалася для плавлення сталі, це піч зроблена з горизонтальним відкритим каналом з перевагою індукційного нагріву. До недоліків можна віднести їх металургійні і електротехнічні параметри, це обмежувало їх застосування, тому вчені в подальшому працювали над створенням більш досконалих конструкцій, що стосується металургійних і електротехнічних показників індукційних плавильних каналних агрегатів.

Так в 1906 році, покращуючи металургійні якості каналних печей, були створені конструкції каналних печей, щодо розширення плавильного простору. Проектували також і комбіновані каналні печі з горизонтальним відкритим каналом, а також з компенсуючою обмоткою – це для покращення їх електротехнічних якостей.

В 1908 році спроектовані каналні печі вже із секціонованою первинною котушкою, при створенні неї звели до мінімуму від'ємні наслідки центробіжного ефекта котушки.

Спроектовані в 1916 році каналні індукційні печі зі сталевим сердешником та закритим каналом для плавлення латуней вони вже стали відповідно прототипом для печей такого типу.

Нині каналні печі з закритим каналом використовуються для плавки як кольорових, важких, так і легких металів та сплавів, а також можна застосовувати для отримання високоякісного чавуну. Наразі ємність таких каналних печей може досягати біля десятків тон. Індукційні плавильні каналні печі з сталевим сердешником почали використовувати з 1930 року.

Сучасні індукційні каналні печі можна використовувати для лиття металів та сплавів як міксери, роздавальні та плавильні печі.

У цих каналних печах рідкий метал завжди оточений з усіх боків вогнетривким матеріалом, яким викладається сталевий корпус печі. Робочий простір вигнутого каналу печі з вогнетривкого матеріалу заповнюється рідким металом. Робочий простір плавильної каналної печі з'єднується з каналом двома отворами, а рідкий метал при заповненні печі утворює замкнутий контур та відбувається робота печі. При подачі напруги на котушку в каналі вона є вторинним витком, тому при цьому створюється вихрове електричне поле та відповідна напруга. Так коли протікає струм як по каналу, так і довкола нього, створюється магнітне поле, а також і магнітний потік. Напрямок магнітного потоку каналу звісно буде протилежний напряму магнітного потоку магнітопроводу. Канал відповідно треба розташовувати навколо тієї частини магнітопроводу, на якій буде знаходитись котушка – це для зменшення впливу магнітного потоку. Виконується це так, що магнітний потік каналу залежить від відстані до самої котушки, отже відстань від каналу до котушки можна вибирати мінімальною.

При роботі каналної печі здійснюється сталий рух рідкого металу в каналі, а також в місці його з'єднання з ванною каналної печі. Постійний рух металу в каналі безбечно виникає в результаті його перегріву, а особливо в результаті впливу на нього магнітного поля. Тому температура рідкого металу в каналі має бути на 50 – 150 °C вище температури рідкого металу у робочому просторі ванни каналної печі, отже при цьому нагрітий метал з каналу почне піднімається у ванну, а з неї вже далі надходить більш холодний метал. Так як магнітне поле повинно впливати на рідкий метал, то вини-

кають електродинамічні сили, вони будуть намагатися стиснути і виштовхнути метал з каналу. Також чим більший струм у каналі, то тим більша буде величина електродинамічної сили, яка впливає на метал. При скачуванні металу з каналної печі менше припустимого рівня, він також буде скачуватися з каналу, при цьому відбудеться вимушене відключення каналної печі через розривання електричного контуру.

Для нормальної роботи каналної печі кількість металу, яка необхідна, визначається врахуванням того, що маса рідкого металу повинна над каналом перевищити електродинамічну силу, це умова виштовхування металу з каналу. Індукційні каналні печі в залежності від виробничого застосування поділяють на плавильні печі, міксери і роздавальні печі.

Плавильні печі. Канальні печі в порівнянні з тигельними мають переваги: ціна каналних печей складає 50 - 70 % ціни тигельної печі; низька втрата теплоти, робочий простір ванни каналної печі має добру теплову ізоляцію та вищий ККД індуктора каналної печі.

В каналних печах також є недоліки: попри все це відсутність гнучкості регулювання хімічного складу металу, який виплавляють; наявність болота в каналній печі – це, в свою чергу, затрудняє перехід від плавлення одного сплаву до іншого; доволі сталий рух металу у ванні каналної печі.

ІКП складається з таких вузлів. **Каркас** каналної печі виготовляють з сталі 0,1% С вона низько вуглецева, товщина листа 30 - 70 мм. В нижній частині каркаса розташовуються вікна з фланцями, до них відповідно кріпляться індуктори. Вся поверхня каркаса каналної печі має також отвори діаметром біля 5 мм із кроком, який становить 300 мм, через ці отвори видаляється пара, яка утворилася при сушці футеровки.

В залежності від конструкції та призначення каналних печей і часу плавки металу використовують різні вогнетривкі матеріали. Футеровка виготовляється з обпаленої цегли, допускається швидкість нагрівання до 45 °С/год, футеровка, наприклад, з заливальної маси 10-20 °С/год, для набивної маси маємо 20-40 °С/год, для сухої маси до 100 °С/ч.

Внутрішня футеровка має з металом спільну поверхню їх стикання, вона знаходиться в несприятливих умовах в каналній печі, тому піддається достатньо великим механічним навантаженням, а також хімічному та тепловому впливу. Внутрішній шар футеровки треба виконувати з вогнетривкої заливної маси, яка містить до 90% Al_2O_3 . Вона повинна мати високу механічну міцність та вогнетривкість, а також шлакостійкість та термостійкість. Вже наступний шар вогнетривкого матеріалу застосовують з 60% Al_2O_3 , третій шар – це використовують шамотний вогнетривкий матеріал, застосовують теплоізоляційний шар, як приклад – це азбестові плити, їх викладають по всій поверхні внутрішнього каркаса каналної печі.

Індуктор каналної печі виготовляють з сталевого корпусу, він включає: футеровку, магнітопровід, котушки і елементи охолодження. Корпус індуктора виконують рознімним, а окремі його частини ізолюють один від одного тому, що на ньому буде індуктуватись струм. Отже корпус індуктора не повинний утворювати замкнутий електричний контур навколо магнітопроводу.

Що стосується вогнетривких матеріалів, які використовують для індуктора, впершу чергу – це вологі або сухі вогнетривкі маси. Вологі вогнетривкі маси використовують у вигляді заливних або набивних матеріалів.

Заливні вогнетривкі маси, їх використовують при складному профілю індуктора, коли набивну масу неможливо ущільнити по всьому індуктору. Заливну масу заливають відразу у весь індуктор та ущільнюють електричними вібраторами, які занурюють в заливну масу. Індуктор заповнюють набивною масою пошарово та ущільнюють її пневматичними трамбовками. Сухі вогнетривкі маси засинають в індуктор відразу та ущільнюють їх електричними вібраторами. Для індуктора, наприклад, використання сухих вогнетривких мас дозволяє виключити процес сушки самого індуктора перед тим як його треба встановити на каналну піч. При виробництві чавуна футеровка індуктора виконана з вогнетривких мас, які містять до 98% Mg.

Магнітопровід індуктора збирається з трансформаторної сталі з окремих пластин, товщина якої становить 0,5 мм. Окремі пластини треба ізолювати один від одного – це потрібно для зменшення втрат від вихрових струмів. Розміри поперечного переріза стержня магнітопроводу, це та частина, на яку встановлюють котушку, залежать від потужності індуктора печі. Після складання магнітопровод стягують відповідно шпильками або болтами. Стяжні планки, шпильки та болти обов'язково ізолюють від пластин магнітопроводу електрокартоном – роблять це для запобігання утворення так званих короткозамкнених витків навколо магнітопроводу.

Котушку індуктора каналної печі виготовляють з мідного профільованого проводу. Перетин витка котушки вибирають в залежності від значення номінального навантаження струму, а також і способу її охолодження. Наприклад, при повітряному охолодженні котушки допускають силу струму до 4 А/мм², при водяному до 20 А/мм². Котушку звісно закріплюють на магнітопровод за допомогою клинів при використанні ізоляційного матеріалу. Зазор, який є між котушкою та магнітопроводом можна використовувати для подачі повітря, це охолоджує котушку. Водоохолоджуваний екран треба встановлювати між котушкою та футеровкою з сталі або міді, це надає можливості перегрівати котушку. Котушки виготовляють або одношарові або багатшарові – на це впливає число витків.

Щоб не перегрівалися елементи індуктора (корпус, екран котушки, та сама котушка) їх треба примусо охолоджувати.

В індукторі встановлюють шаблон – це профіль, який повинен відповідати профілю самого каналу до заповнення вогнетривкою масою. Кінці шаблону, які виступають з індуктора, треба з'єднувати один з одним перемичкою за допомогою електрозварювання. Шаблон застосовують для отримання реальних розмірів каналу і для виконання сушки та розігріву футеровки індуктора перед заповненням його рідким металом. Індуктор має відповідно повітряне охолодження котушки за допомогою встановленого відцентрового вентилятора та необхідне водяне охолодження корпусу та екрана.

Індуктор кріпиться до каркаса каналної печі за допомогою болтів. Для транспортування та монтажу індуктора використовують два штирі, які приварені до корпусу індуктора.

Стан футеровки індуктора оцінюють, вимірюючи температуру води, яка охолоджує елементи індуктора. Коли буде руйнуватися футеровка, рідкий метал, який заповнює канал, звісно буде наближатись до водоохолоджувальних елементів, а температура води якщо підвищується – це вже є сигнал для заміни самого індуктора, бо він може вийти з ладу. Контролюється активний та індуктивний опір індуктора каналної печі. Активний опір R каналу залежить від площі поперечного перерізу та його довжини. При роботі каналної печі якщо відбувається збільшення каналу, то це може призвести до збільшення опору R , а розширення каналу, може призвести до зменшення опору R . Тобто якщо подовжується канал опір R буде збільшуватися, при його укороченні опір R буде зменшуватися.

Відомо, що індуктивний опір каналу залежить від його розташування саме до котушки індуктора. Якщо, наприклад, канал розташований ближче до котушки, то індуктивний опір буде меншим і, навпаки, чим більша відстань між каналом та котушкою, тому значення індуктивного опору буде більше.

Механізм нахилу каналної печі забезпечує плавний нахил печі, коли відбувається зливання металу, а також для заміни індуктора використовують гідравлічний привід, що включає насосну станцію і гідроциліндр, або електромеханічний привід, він складається з електродвигуна, редуктора та ланцюгової передачі.

Електроустаткування печі включає трансформатор, конденсаторну батарею за допомогою них відбувається компенсації коефіцієнта потужності каналної печі, конденсаторна батарея та дросель для підключення однофазного індуктора до трифазної мережі, а також щитів керування та кабелів живлення.

Трансформатор каналної печі під'єднавшись до електричної мережі має напругу 6 - 10 кв. На вторинній стороні трансформатора передбачається до 10 ступіней напруги – це регулює потужність каналної печі в заданому інтервалі.

Система водяного охолодження каналної печі її використовують для охолодження всіх її елементів. Спеціально підготовлена вода циркулює по замкнутому контурі, він складається з теплообмінника, який охолоджується звичайною промисловою водою. На зливних патрубках, які розташовані від елементів каналної печі можна встановити індуктори витрати води і термометри, які показують температуру води.

Міксери. Використовують міксери для накопичення відповідної кількості рідкого металу, а потім його витримка до необхідно заданої температури. В міксері також відбувається процес одноріднення по хімічному складу металу або сплаву стосовно різних плавок, а сама місткість міксера повина мати дворазову годинну продуктивність плавильної печі.

Індукційна канална піч марки ІЧКМ для виробництва чавуну може працювати як міксер. Наприклад, маючи продуктивність печі: 40 т, корисна буде 28 т, а болота 10 т. ІКП має вертикально розташований циліндр, а його зовнішній діаметром становить 3160 мм при висоті до 2 м. Внутрішній діаметр печі внизу становить біля 2200 мм, а вгорі він становить 2340 мм. Індуктор застосовують потужністю біля 700 кВт. Верх каналної печі повинен закриватися футерованою кришкою. В каналній печі є також сифонний жолоб він призначений для зливання металу. Шлак з каналної печі треба скачувати через вікно, воно повинно закриватися за допомогою дверцят. За допомогою двох гідроциліндрів виконують нахил каналної печі. Для нахилу каналної печі використовують дві стійки, а також отвори у корпусі печі.

На дні каналної печі є отвори, вони використовуються для приєднання індуктора до печі. Отвори звісно розширені вбік робочої частини печі, це виключає процес перегріву самого металу в цій частині печі, а також покращує умови роботи футеровки печі. Індуктор каналної печі також має за-

мкнутий магнітопровід та котушку, яка охолоджується повітрям. Коли заміняють індуктор, відповідно каналну піч повертають так, щоб кожух каналної печі розташовувався вертикально. Індукційну каналну піч необхідно встановлювати в прямку, він має поглиблення та призначений для збору рідкого металу, а також шлаку.

Промисловість виготовляє КІП за призначенням для витримки і звісно перегріву чавуну відповідних марок ІЧКМ-6/0,5; ІЧКМ-16/0,5; ІЧКМ-40/1,0 продуктивністю, т/год для перегрівання чавуну на 100 °С.

Роздавальні печі. Викорисовують роздавальні печі для заливки рідкого металу прямо у ливарну форму. Для випуску металу з печі використовують механізм нахилу печі та електродинамічні насоси і надлишковий тиск газу над рівнем металу в печі.

Індукційна канална піч, яка застосовує надлишковий тиск газу для видачі металу з ванни каналної печі закривається кришкою дуже герметично. Заливка металу у плавильний агрегат виконується через заливний сифон, а у ливарну форму відповідно через розливочний сифон, верхня частина його виконується у видгляді ванни з отвором. Стиснене повітря або інший інертний газ подається в робочий простір печі через трубку. Під дією тиску повітря рідкий метал повинен витіснитися з ванни в заливний та розливочний сифони. Кількість металу регулюється з необхідною точністю при подачі через отвір у ливарну форму. За допомогою індуктора відбувається обігрівання печі.

Печі подібної марки мають місткість до 20 т. Промисловість виготовляє для заливки рідкого чавуна безпосередньо в ливарні форми такі печі наступних марок: ІЧКР-0,6/0,06; ІЧКР-2,5/0,15; ІЧКР-6,0/0,15 з продуктивністю т/год при перегріванні чавуна на 100°С.

Наразі на сучасних машинобудівних та металообробних підприємствах промисловості плавка металів і сплавів виконується, головним чином, в каналних індукційних печах (рис. 1.1, рис.1.2, рис.1.3) [1,2].

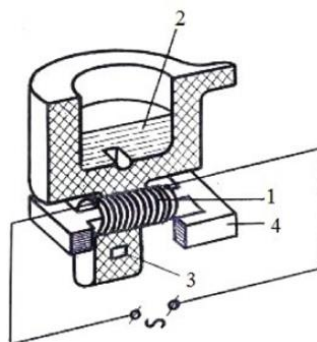


Рис. 1.1 Схема КІП з вертикальним плавильним каналом
 1 – індуктор; 2 – сплав; 3 – плавильний канал; 4 – магнітопровід

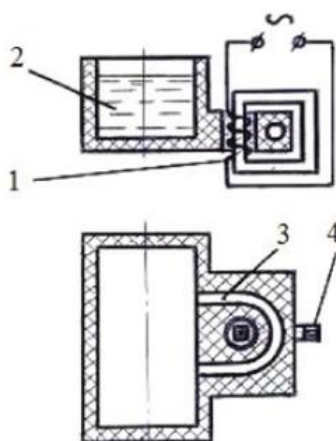


Рис. 1.2 Схема КІП з горизонтальним плавильним каналом
 1 - індуктор; 2 - сплав; 3 - замкнутий плавильний канал;
 4 - магнітопровід

На рис 1.3 наведено три типи КІП.

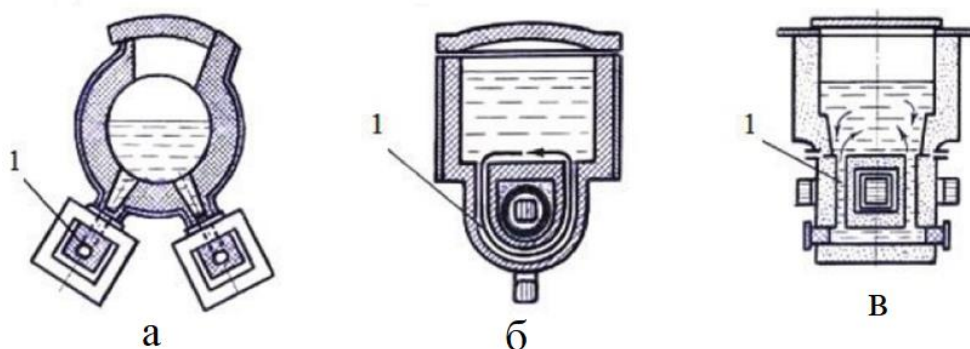


Рис. 1.3 Схеми з вертикальним каналом індукційно каналних печей
 а – барабанні; б – вертикальні з овальним каналом; в – вертикальні з прямокутним каналом; 1 – індуктор

Наприклад, канали, які мають прямокутну форму використовують для плавки швидкоокислювальних металів, алюмінієвих сплавів.

Канальні індукційні печі при розрахунку мають високий ККД, він становить біля 70-80%, а також вони можуть працювати безперервно, маючи високу продуктивність та добру чистоту поверхні сплаву з мінімальними втратами.

Індукційні канальні печі також можна використовувати для плавки різних марок кольорових сплавів, наприклад, мідних – це печі марки ІЛК, для плавлення алюмінію ІАК, а для плавлення та перегріву в міксері чавуну марки ІЧКМ.

Канальні індукційні печі складаються з таких основних елементів: це профіль каналу плавки металу та сплаву; магнітопровода; індуктора. Ванна канальної печі виконана зі сталі, а під печі відповідно з немагнітних сплавів. Футеровка подової частини канальної індукційної печі повина знаходитись в захисному циліндрі тобто сердешнику трансформатора з індуктором, а також і вертикальні канали де відбувається плавлення металу. Трансформатор виконаний з спеціальної трансформаторної сталі, її товщина листа становить біля 0,35 мм. Готовий виплавлений рідкий метал в індукційній канальній печі треба розливати через зливний жолоб у ливарні форми [1, 2 ,3].

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА РОБОТА ІНДУКЦІЙНОЇ КАНАЛЬНОЇ ПЕЧІ ТА МІКСЕРА

Індукційний каналний міксер (ІКМ) використовують для накопичення потрібної кількості рідкого металу, а потім його витримання при заданій відповідній температурі. Приймаємо, що місткість міксера повинна бути не менше, ніж двочасова продуктивність каналної печі. На рис.2.1 показана індукційна канална піч типу ІЧКМ-16, яка працює як міксер при виробництві чавуну.

ІКМ являє собою горизонтально розташований циліндр із зовнішнім діаметром та внутрішнім діаметром печі. ІКМ має два індуктори 6, які можна знімати. Для випуску рідкого металу в каналній печі передбачено сифонний жолоб 4. Наявність сифонного жолоба попереджає попадання повітря в каналний міксер а також зменшує угар елементів. Нахил каналної печі виконується навколо поздовжньої осі, за допомогою котків, на яких устанавлюють ІКМ. Зусилля для повертання ІКМ повинно передаватися від приводу 3, який змонтований поряд. Для приєднання індукторів в необхідній частині ІКМ є отвори, які розширені в сторону робочого простору ІКМ, який виключає перегрівання металу в цій частині ІКМ, та покращення умов роботи футеровки каналної печі. Кожний індуктор має як замкнутий магнітопровід 7, так і котушку 8, їх треба охолоджувати повітрям [1,2,3].

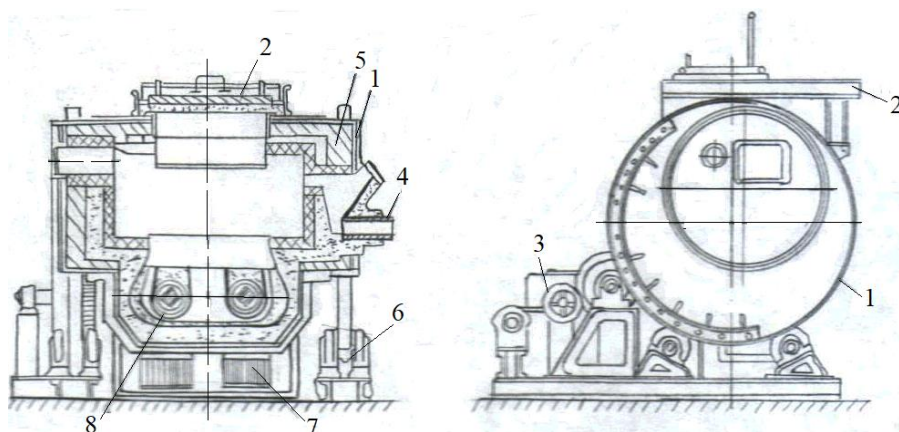


Рис. 2.1. Схема ІКМ марки ІЧКМ-16

- 1 – каркас (металевий кожух); 2 – футерована кришка; 3 – механізм нахилу; 4 – сифонний зливний жолоб; 5 – футеровка; 6 – гідроциліндр; 7 – магнітопровід; 8 – котушка

На рис. 2.2 та рис. 2.3 приведено ІКП з вертикальними каналами при виготовленні чавуну

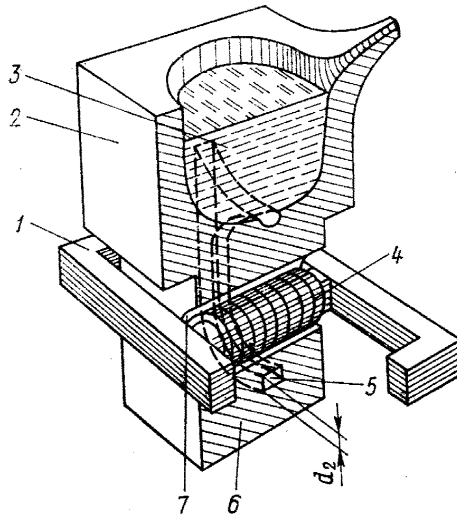


Рис 2.2. Канальна піч

1 – магнітопровід; 2 – футерована ванна; 3 – рідкий метал; 4 – індуктор;
5 – плавильний канал; 6 – подовий камінь; 7 – циліндричний отвір

ІКП має основні елементи: плавильну ванну футеровану, кришку футеровану, індукційну одиницю (індуктор), магнітопровід, подовий камінь, плавильний канал [1,2,3,4].

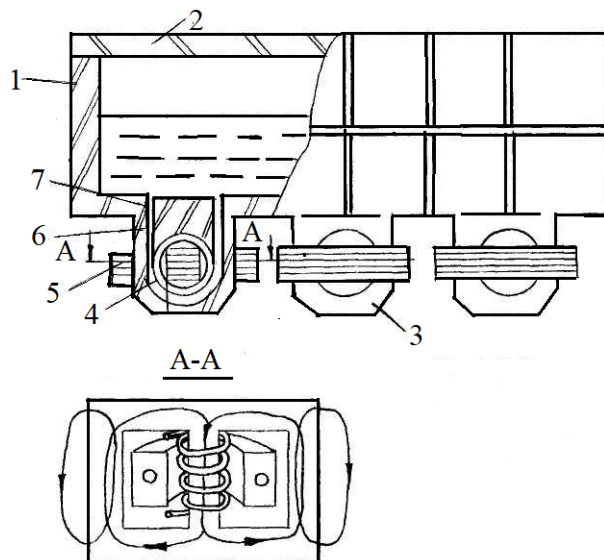


Рис 2.3. ІКП з закритим вертикальним каналом

1 – футерована ванна; 2 – футерована кришка; 3 – індуктор; 4 – плавильний канал; 5 – магнітопровід; 6 – подовий камінь; 7 – циліндричний отвір

Принцип дії та робота КПП побудована наступним чином, що змінний магнітний потік пронизує замкнений контур, він цей контур утворюється рідким металом та при цьому виникає в контурі напруга, а також струм.

Напруга, яка відповідно утворюється в каналі, повина бути меншою напруги, яка буде підводитись до котушки. Сила струму, яка необхідна для протікання по каналу, буде залежати від повного опору каналу. Отже при протіканні струму по каналу, завжди буде утворюватися магнітне поле навколо нього, а також і магнітний потік. Як відомо, від магнітного потоку звичайно залежить індуктивна потужність і $\cos \varphi$ каналної печі. Якщо маємо більший магнітний потік каналу, то буде і більша індуктивна потужність.

Коли працює КПП відбувається безперервний сталий рух рідкого металу в каналі, а також в місці з'єднання самого каналу з ванною печі. В результаті перегріву рідкого металу в каналі, а також, враховуючи взаємодії магнітного поля, виникає сталий рух рідкого металу. Температура металу в каналі при цьому на 50-150 °С вища температури металу, який знаходиться у ванні каналної печі, тому нагрітий рідкий метал з каналу повинен завжди підніматися у ванну, а з неї вже тоді повинен поступати більш холодний метал. При більшому струмі в каналі, відповідно буде більша електродинамічна сила, яка звичайно діє на рідкий метал.

При випуску металу з печі нижче допустимого рівня він повинен залишати канал, при цьому відбудеться самостійне відключення каналної печі тому, що розривається електричний контур, який утворювався відповідно рідким металом в каналі печі. Мінімальна кількість металу КПП, яка необхідна для нормальної її роботи завжди визначається, враховуючи те, що маса рідкого металу (болото) над каналом перевищує електродинамічну силу, яка виштовхує метал із каналу [1,2,3,4].

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ ІКМ

Проектування основних геометричних розмірів ІКМ продуктивністю 16 т/год необхідно проводити його на основі однотипного ІКМ ємністю 40 т/год. Так як ІКМ, який ми проектуємо, подібний до типового, то основні розміри можливо визначати відповідно за допомогою коефіцієнта, на який потім треба ділити всі основні розміри ІКМ продуктивністю 40 т. Врахувавши це в результаті розрахунку одержуємо реальні розміри міксерів, який ми проектуємо [1,5].

При визначенні основних розмірів знаходимо коефіцієнт як корінь кубічний із числа, яке дорівнює відношенню продуктивностей даних міксерів.

За відомими продуктивностями ІКМ визначаємо коефіцієнт:

$$k = \sqrt[3]{40/16} = 1,357 \quad (3.1)$$

Потім за допомогою визначеного коефіцієнта k розраховуємо основні розміри ІКМ, який проектуємо. Результати цих розрахунків наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

ІКМ продуктивністю 16 т/год. та його основні геометричні розміри

№ п/п	Основні геометричні розміри	Відстань, мм
1.	Діаметр зовнішнього кожуха	2022
2.	Довжина і ширина завантажувального вікна	355
3.	Довжина внутрішнього простору	1240
4.	Внутрішній діаметр сифонного жолоба	138
5.	Товщина футеровки	170
6.	Діаметр внутрішнього простору	1408
7.	Зовнішній діаметр ванни	1473
8.	Рівень металу	431
9.	Рівень болота	187
10.	Габаритний розмір по висоті	2752

РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ

Матеріальний баланс ІКМ включає наступне [1,3,5]:

- визначення характеристик складових вихідних матеріалів;
- показ хімічних явищ ливарного процесу;
- визначення способу складання шихти;
- формування загального матеріального балансу.

Так як ІКМ, який ми проектуємо, повинен виконувати роботу в комплексі з іншим плавильним агрегатом продуктивністю 16 т. і він використовується тільки для перегрівання чавуну, то на вході і на виході ІКМ буде чавун в кількості 16 т. (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Матеріальний баланс ІКМ на одне перегрівання

Показник	Маса, т	В результаті отримано	Маса, т
Чавун	16	Чавун	16

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ

Розрахунок теплового балансу ІКМ полягає у визначенні теплоти, яка отримується від трансформації електричної енергії, коли працює ІКМ. Тепловий баланс ІКМ виражається рівнянням, яке відповідно поєднує як статті прибутку і статті видатку теплоти, коли працює ІКМ. Для наведеного рівняння теплового балансу статтею прибутку буде теплота, яка отримується внаслідок трансформації електричної енергії, коли працює ІКМ, а статтями видатку буде корисна витрата теплоти, коли працює ІКМ, витрата теплоти кладкою в довкілля тобто – це конвекція теплоти в простір, також витрата теплоти випромінюванням та витрата теплоти з вихідними газами [1,3,4,6].

Рівняння теплового балансу ІКМ має такий вигляд:

$$Q_{ел.ен.} = Q_1 + \sum Q_{5i} ; \sum Q_{5i} = Q_{5кл} + Q_{5випр} + Q_{5виб} \quad (5.1)$$

де $Q_{ел.ен.}$ – теплота, отримана від трансформації електроенергії;

Q_1 – корисна витрата теплоти;

$Q_{5кл}$ – витрата теплоти в довкілля через кладку;

$Q_{5випр}$ – втрата теплоти випромінюванням;

$Q_{5виб}$ – втрата теплоти з вихідними газами.

Корисна витрата теплоти

$$Q_1 = P \cdot c_u \cdot \Delta t_u, \quad (5.2)$$

де P – продуктивність ІКМ;

c_u – теплоємність чавуну; $c = 0,83$ кДж/кг;

Δt_u – температура перегрівання чавуну; $\Delta t_u = 100$

$$Q_1 = 16000/3600 \cdot 0,83 \cdot 100 = 369$$

Втрата теплоти через кладку в довкілля

$$Q_{5кл} = \alpha(t_{нов} - t_n)F, \quad (5.3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кладки в довкілля випромінюванням і вільною конвекцією, $\alpha = 15$;

$t_{нов}$ – температура зовнішньої поверхні стінки, $t_{нов} = 90$ °С;

t_n – температура повітря, $t_n = 20$ °С;

F – зовнішня поверхня кладки, м².

Так як проєктований ІКМ барабанного типу – внутрішня поверхня і, відповідно, зовнішня поверхня кладки має циліндричну форму. Відповідно з цього випливає, що площа зовнішньої поверхні кладки буде дорівнювати:

$$F = 2F_{бок} + F_{зов}, \quad (5.4)$$

де $F_{бок}$ – площа бокової стінки ІКМ;

$F_{зов}$ – площа зовнішньої циліндричної стінки ІКМ.

Визначивши основні геометричні розміри, розраховуємо площу зовнішньої поверхні кладки:

$$F_{бок} = \pi D^2 / 4 = 3,14 \cdot 1,47^2 / 4 = 1,69 \text{ м}^2 \quad (5.5)$$

$$F_{зов} = \pi DL = 3,14 \cdot 1,47 \cdot 1,2 = 5,27 \text{ м}^2 \quad (5.6)$$

$$F = 2 \cdot 1,69 + 5,27 = 8,65 \text{ м}^2 \quad (5.7)$$

Визначивши площу зовнішньої поверхні кладки, розраховуємо $Q_{5кл}$:

$$Q_{5кл} = 15(90 - 20) \cdot 8,65 = 9,1 \text{ кВт}. \quad (5.8)$$

$Q_{5випр} + Q_{5виб}$ чисельно становить (0,10...0,15) $Q_{ел.ен.}$.

Приймаємо

$$Q_{5випр} + Q_{5виб} = 0,15 Q_{ел.ен.} \quad (5.9)$$

Дані статей прибутку і видатку теплоти підставимо в рівняння теплового балансу:

$$Q_{ел.ен.} = 369 + 9,1 + 0,15Q_{ел.ен.} \quad (5.10)$$

Розв'яжемо отриманий вираз теплового балансу і визначаємо $Q_{ел.ен.}$:

$$0,85Q_{ел.ен.} = 378 \quad (5.11)$$

$$Q_{ел.ен.} = 374,83 / 0,85 = 445 \text{ кВт} \quad (5.12)$$

Визначимо термічний ККД ІКМ

$$\eta_m = Q_1 / Q_{ел.ен.} = 369 / 445 = 0,83 \quad (5.13)$$

Визначені результати теплового балансу ІКМ приведемо в табл. 5.1

Таблиця 5.1

Тепловий баланс ІКМ

№ п/п	Назва статті	Поз.	кВт	№ п/п	Назва статті	Поз.	кВт
	Прибуток теплоти				Видаток теплоти		
1.	Теплота, яка виділяється від трансформації електричної енергії	$Q_{ел.ен.}$	445	1.	Корисна витрата теплоти	Q_1	369
	Всього		445	2.	Втрата теплоти через кладку	$Q_{5кл}$	9,1
				3.	Втрата теплоти випромінюванням	$Q_{5випр}$	33,5
				4.	Втрата теплоти вихідними газами	$Q_{5виб}$	33,5
					Всього		445

РОЗДІЛ 6. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

В електротехнічний розрахунок індукційного каналного міксера входить [1,3,5]:

- розрахунок основних електричних і геометричних параметрів індуктора;

- вибір трансформатора.

Розрахунок індуктора проводимо за такими вихідними даними:

- продуктивність 16 т/год;

- температура перегріву чавуну 100 °С;

- напруга електромережі 10 кВт

- частота струму 50 Гц.

Корисна теплова потужність, яка передається рідкому металу

$$W_{теор} = 0,23 \text{ кВт} \cdot \text{Г/Т} \quad (6.1)$$

$$P_{кор} = W_{теор} \Delta t \Pi = 0,23 \cdot 100 \cdot 16 = 368 \text{ кВт} \quad (6.2)$$

Активна потужність печі. Приймаємо $\eta_{терм} = 0,8$

$$P = P_{кор} / \eta_{терм} = 368 / 0,8 = 460 \text{ кВт} \quad (6.3)$$

З метою запасу потужності приймаємо $P = 500 \text{ кВт}$.

Активна потужність індуктора. Приймаємо, що дана піч буде мати два індуктори, $N = 2$.

$$P_{інд} = P / N = 500 / 2 = 250 \text{ кВт} \quad (6.4)$$

Площа поперечного перерізу стержня магнітопроводу. Приймаємо: $\psi = 7$, ψ коефіцієнт, який враховує відношення маси сталі магнітопроводу до маси міді котушки індуктора; j_1 – допустима густина електричного струму в котушці, $j_1 = 3 \text{ А/мм}^2$; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності індуктора, $\cos \varphi = 0,55$; B – магнітна індукція в стержні магнітопроводу, Тл:

$$F_{мг} = 0,3 \sqrt{10^5 P_{інд} \psi / (B j_1 \cos \varphi)} = 0,3 \sqrt{10^5 \cdot 250 \cdot 7 / (1,85 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 0,55)} = 321 \quad (6.4)$$

Діаметр стержня магнітопроводу

k_d – коефіцієнт заповнення навколо стержня, $k_d = 0,8$.

$$d_{мз} = 11,3\sqrt{F_{мз}/k_d} = 11,3\sqrt{321/0,8} = 226 \quad (6.5)$$

Зовнішній діаметр котушки.

S_3 – товщина зазору між стержнем магнітопроводу і котушкою;

$S_{кот}$ – товщина котушки. Приймаємо $S_3 = 16$ мм, $S_{кот} = 50$ мм

$$d_{кот} = d_{мз} + 2(S_3 + S_{кот}) = 226 + 2(16 + 50) = 358 \text{ мм.} \quad (6.6)$$

Внутрішній діаметр каналу

S_1 – товщина футеровки між каналом і котушкою; S_2 – товщина зазору між котушкою і футеровкою. Приймаємо $S_1 = 95$ мм; $S_2 = 30$ мм

$$d_{к.в.} = d_{кот} + 2(S_1 + S_2) = 358 + 2(95 + 30) = 608 \text{ мм} \quad (6.7)$$

Ширина каналу. Приймаємо ширину каналу 110 мм, тобто $b_k = 110$ мм.

Довжина каналу. Для визначення довжини каналу робимо ескіз каналу (рис. 6.1). Довжину каналу визначаємо по його середній лінії.

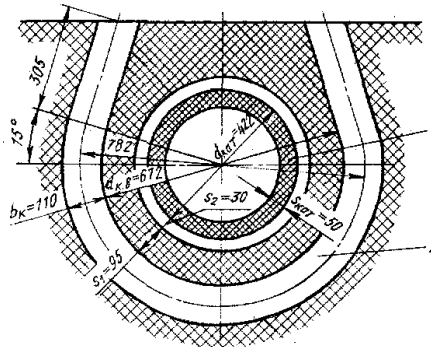


Рис. 6.1 Ескіз каналу

На рис. 6.2 наведена схема взаємодії току в каналі з магнітним полем, а на рис. 6.3 рух сплаву в індукційній каналній печі

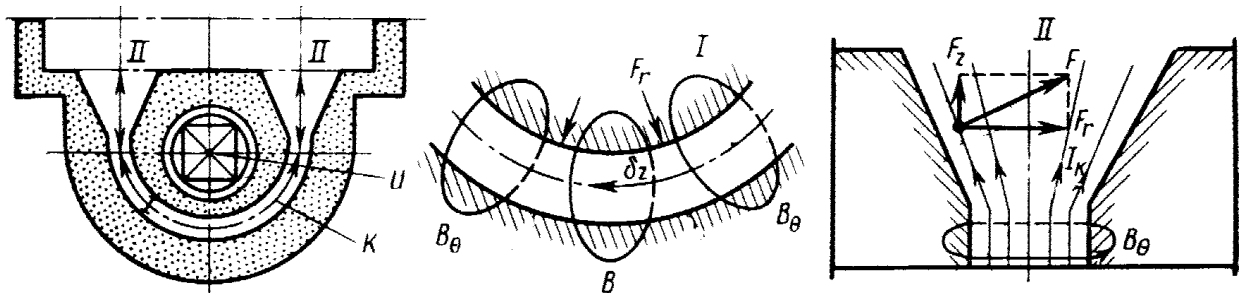


Рис. 6.2 Схема взаємодії току каналу з магнітним полем

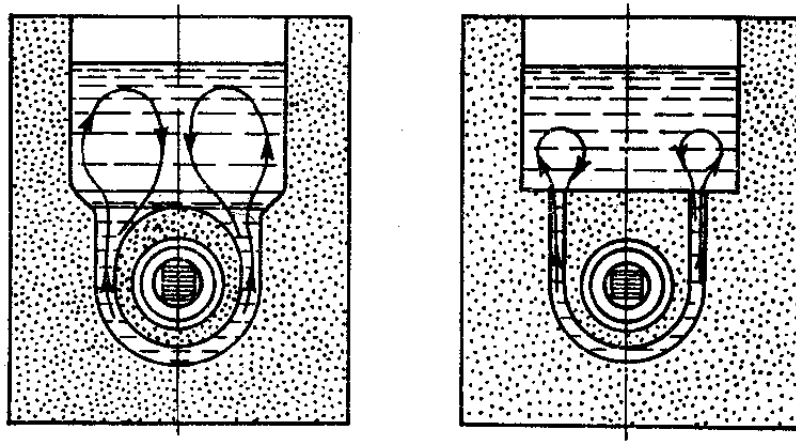


Рис. 6.3 Циркуляція сплаву в індукційній каналній печі

Довжина криволінійної частини каналу 1320 мм, довжина прямолінійної ділянки 280 мм. $l_k = 1320 + 2 \cdot 280 = 1880$ мм

Площа поперечного перерізу каналу.

j_z – густина струму в каналі, А/м². Приймаємо $j_z = 4,2 \cdot 10^6$ А/м²

$$F_k = 10^3 P_{\text{інд}} / (j_z^2 \rho_m l_k) = 10^3 \cdot 250 / [(4,2 \cdot 10^6)^2 \cdot 125 \cdot 10^{-8} \cdot 1,88] = 0,012 \text{ м}^2 \quad (6.7)$$

Форма поперечного перерізу каналу. Приймаємо канал у формі овалу з розмірами, тоді $b_k = 110$ мм, $h_k = 185$ мм, $F_k = 0,012$ м², радіус R14.

Активний опір каналу

$$R = \rho_m l_k / F_k = 125 \cdot 10^{-8} \cdot 1,88 / 0,012 = 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (6.8)$$

Індуктивність каналу. Відстань від осі каналу до котушки 180 мм. Глибина проникнення струму в котушку 10 мм, тому $R_1 = 190$ мм, $R_2 = 55$ мм.

Приймаємо індукцію в стержні магнітопроводу, яка дорівнює 1,85 Тл, $lp = 1,55$, lp – коефіцієнт, який враховує розсіювання енергії індуктором в залежності від індукції в стержні

$$L_{\text{зовн}} = 2 \cdot 10^{-7} lp lk \ln(R_1/R_2) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 1,55 \cdot 1,88 \ln(0,19/0,055) = 7,22 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \quad (6.9)$$

$$L_e = 10^{-7} lk/z = 10^{-7} \cdot 1,88/2 = 0,94 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \quad (6.10)$$

$$L = L_{\text{зовн}} + L_e = 7,22 \cdot 10^{-7} + 0,94 \cdot 10^{-7} = 8,16 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \quad (6.11)$$

Індукційний опір каналу

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 8,16 \cdot 10^{-7} = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (6.12)$$

Повний опір каналу

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(2,14 \cdot 10^{-4})^2 + (2,56 \cdot 10^{-4})^2} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (6.13)$$

Коефіцієнт потужності каналу

$$\cos \varphi = R/Z = 2,14 \cdot 10^{-4} / 3,33 \cdot 10^{-4} = 0,64 \quad (6.14)$$

Активна напруга в каналі

$$U_{к.а.} = \sqrt{P_{інд} \cdot R} = \sqrt{250000 \cdot 2,14 \cdot 10^{-4}} = 7,31 \quad (6.15)$$

Повна напруга в каналі

$$U_{к} = U_{к.а.} / \cos \varphi = 7,31 / 0,64 = 11,42 \text{ В} \quad (6.16)$$

Повна потужність індуктора

$$S_{інд} = P_{інд} / \cos \varphi = 250 / 0,64 = 390 \text{ кВ}\cdot\text{А} \quad (6.17)$$

Реактивна (індуктивна) потужність, яка виділяється в індукторі

$$Q_{інд} = \sqrt{S_{інд}^2 - P_{інд}^2} = \sqrt{390^2 - 250^2} = 463 \text{ квар} \quad (6.18)$$

Повна потужність печі

$$S = NS_{інд} = 2 \cdot 390 = 780 \text{ кВ}\cdot\text{А} \quad (6.19)$$

Реактивна потужність печі

$$Q = NQ_{інд} = 2 \cdot 463 = 926 \text{ квар} \quad (6.20)$$

Число витків котушки індуктора. Вибираємо трансформатор з наступною характеристикою. Первинна напруга 10000 В, вторинна (5 ступенів): 244, 360, 416, 490, 555 В. Приймаємо, що потужність індуктора 250 кВт буде при подачі на котушку напруги 350 В.

$$n = U_1 / U_{к} = 250 / 15,33 = 16 \text{ витків} \quad (6.21)$$

Для зменшення довжини котушки приймаємо набивку у два шари по 15 витків у кожному.

Сила струму у котушці

$$I_1 = S_{інд} / U_1 = 10^3 \cdot 390 / 350 = 1114 \text{ А} \quad (6.22)$$

Площа поперечного перерізу витка котушки. Приймаємо $j_1 = 3 \text{ А/мм}^2$

$$F_{вит} = I_1 / j_1 = 1114 / 3 = 371 \text{ мм}^2 \quad (6.23)$$

Ширина $b_{вит}$ і висота $h_{вит}$ котушки. Для виготовлення котушки вибираємо мідний провід прямокутного перерізу 3 x 8 мм. Число проводів у витку $371 \div (3 \times 8) = 15,5 \approx 16$

З урахуванням ізоляції приймаємо $b_{вит} = 34$ мм, $h_{вит} = 20$ мм.

Довжина котушки

$$l_{кот} = b_{вит} n / k_{сл} = 34 \cdot 35 / 2 = 595 \text{ мм} \quad (6.24)$$

Ємність конденсаторної батареї

$$C = 10^9 Q_{інд} / (2\pi f U_1^2) = 10^9 \cdot 463 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 350^2) = 1204 \text{ мкф.} \quad (6.25)$$

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній бакалаврській роботі виконали розрахунок проєктованого індукційного канального міксера продуктивністю 16 т/год.

До повного розрахунку ІКМ входить:

1. Розрахунок основних геометричних розмірів ІКМ та визначення коефіцієнта, за допомогою якого можна розраховувати всі основні розміри.
2. Визначено матеріальний та тепловий баланси ІКМ, метою яких є визначення кількості виплавленого металу та теплоти, яка отримується від трансформації електричної енергії в процесі плавлення та перегріву.
3. Електротехнічний розрахунок основних електричних і геометричних параметрів індуктора та вибір трансформатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія основних виробництв: навч. посіб. для студентів денної та заочної форм навчання / Кропивний В.М. та ін. Кропивницький: Видавництво ТОВ «КОД», 2021. 196 с.
2. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: навч. посіб. для студ. вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с.
3. Павленко Т.П., Петренко О.М., Лукашова Н.П. Електротехнологічні установки: Конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 130 с.
4. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / за ред. академіка НАН України Найдека В.Л. К: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.
5. Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Виробництво виливків із кольорових металів» *Печі для плавлення кольорових сплавів* для студентів напряму ”Ливарне виробництво” / [укл.: Сігарьов М.К., Стороженко С.А.]. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 30с.
6. Турич В.В., Руткевич В.С. Матеріалознавство: навч. посіб. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2012. 100с.

ДОДАТКИ