**Тема 11. Спеціальні способи електроплавКИ сталі**

**Мета лекції** – ознайомлення з особливостями виплавки сталі за допомогою сучасних методів спецелектрометалургії.

**План**

11.1 Електрошлаковий переплав

11.2 Плазмово-дугова плавка

11.3 Вакуумні способи спецелектрометалургії

11.3.1 Вакуумно-індукційна плавка

11.3.2 Вакуумно-дугова плавка

11.3.2.1 Вакуумно-дугові печі із електродом, що витрачається

11.3.2.2 Вакуумно-дугові печі із електродом, що не витрачається

11.3.2.3 Вакуумні дугові печі типу ДСВ-6,3-Г6-М4 з електродом, що витрачається

11.3.3 Електронно-променева плавка**|плавлення|**

**Перелік ключових термінів і понять:** електрошлаковий переплав, плазмово-дугова плавка, вакуумно-індукційна плавка, вакумно-дугова плавка, електронно-променева плавка.

**11.1 Електрошлаковий переплав**

Суть **електрошлакового переплаву** **(ЕШП)** (рис. 11.1) полягає в переплаві металевого електрода, що витрачається, за рахунок тепла, яке виділяється при проходженні електричного струму через шлакову ванну. В результаті виділення тепла в місці контакту шлаку і електрода, торець останнього оплавляєтся, на ньому формуються крапельки, які під дією сил гравітації падають, проходять крізь шар шлаку і формують металеву ванну. Процес ведуть в водоохолоджуваному мідному кристалізаторі, де з металевої ванни формується зливок, а вона сама постійно оновлюється за рахунок надходження металу з електрода.

Завдяки поступової та повільної (в порівнянні з іншими процесами розливки) подачі металу в кристалізатор, зливок ЕШП формується в умовах високого градієнта температур і постійного оновлення розплаву, який затвердіває та створює передумови для зростання щільною дендритних структури. Висока хімічна макрооднорідність металу ЕШП обумовлена ​​в першу чергу його дендритних структурою. Крім того, проходячи через шар шлаку, метал очищається від сірки і неметалевих включень.

На сьогодні серед переваг електрошлакового переплаву перед іншими способами отримання сталі слід виділити:

− високу якість зливка, відсутність усадкової раковини та пористості;

− меншу кількість та менший розмір включень;

− одноманітність структури та хімічного складу;

− відсутність шаруватості та зональної ліквації;



Рис. 11.1 Загальний вигляд електрошлакового переплаву

− високий вихід придатного з вихідного рідкого металу до готової продукції;

− можливість регульованого зниження вмісту таких небажаних елементів, як сірка, кисень, а в деяких умовах і азот; можливість збереження легуючих елементів, які можуть бути окислені, таких як кремній і титан;

− можливість коригування складу металу шляхом застосування відповідного флюсу;

− загальне поліпшення характеристик пластичності та ударної в'язкості;

− значне поліпшення властивостей в поперечному напрямку;

− поліпшення властивостей при підвищених температурах;

− поліпшення зварюваності;

− забезпечення такої якості поверхні, яке виключає необхідність в зачистці поверхні при гарячій обробці;

− гарні характеристики гарячої обробки;

− зменшення обсягу гарячої обробки, що вимагається для досягнення заданої металургійної структури в центральній частині готового продукту;

− полегшення умов відливання електродів у порівнянні з розливанням злитків для безпосередньої прокатки;

− можливість управління напрямком і швидкістю затвердіння;

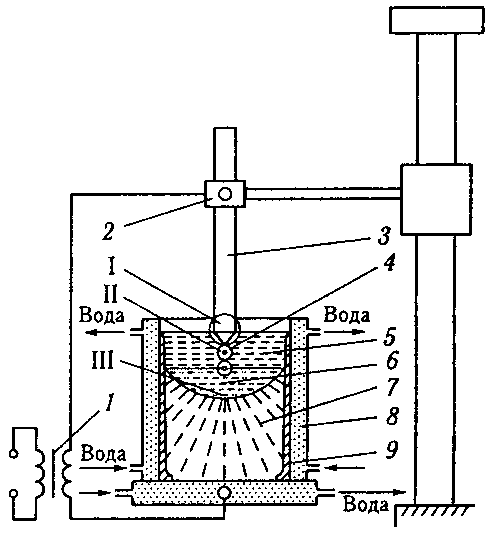
− можливість регулювання крупності зерен і величини карбідів, особливо в швидкорізальних інструментальних сталях;

− поліпшення корозійної стійкості;

− розплавлений метал захищений від атмосферного окислення.

Схема установки ЕШП приведена на рис. 11.2. Торець витратного електрода (3), підключений через трансформатор (1) до джерела електричного струму, розміщується у ванні електропровідного, але порівняно з іншими розплавами, значним опором рафінувального шлаку (5). Шлак наводять у водоохолодній металевій виливниці-кристалізаторі (8) розплавленням на початку процесу твердої шлакової суміші (флюсу) або заливанням рідкого шлаку, виплавленого в окремій шлакоплавильній печі. Перемінний чи постійний елект­ричний струм проходить від елек­трода до шлаку. Під впливом теп­лової енергії шлак розплавляєть­ся і перебуває в рідкому стані. Вся суть електрошлакового про­цесу визначається властивостями розплавленого шлаку: пропуска­ти електричний струм, акумулювати теплоту, виконувати рафінувальну та захисну від атмосфери повітря функції щодо розплавленого металу.

Недоліком|нестачею| ЕШП є|з'являється| неможливість організувати у відкритому|відчиняти| агрегаті видалення|віддалення| водню. У зв'язку з цим широке| поширення набули дуплекс-процеси ВІП–ЕШП та ЕШП–ВДП.



І **–** III зони рафінування; 1 – транс­форматор; 2 – електродотримач; 3 – електрод; 4 – краплі електродного мета­лу; 5 – шлакова ванна; 6 – рідка мета­лева ванна; 7 – зливок; 8 – водоохолоджуваний кристалізатор; 9 – кірка твердого шлаку

Рис. 11.2. Схема установки ЕШП та розмішення рафінувальних зон

**11.2 Плазмово-дугова плавка**

Джерелом тепла при плазмово-дуговій плавці (ПДП) є стисла в поперечному напрямі електрична дуга. Стиснення дуги газовим потоком або магнітним полем приводить до значного збільшення щільності струму, внаслідок чого помітно зростає ступінь іонізації частинок робочого газу і, отже, середньомасова температура дуги, яка досягає значення 10000–30000 0С. Стислу високотемпературну дугу (низькотемпературну плазму) отримують за допомогою спеціальних пристроїв – плазмотронів. У якості робочого газу, в більшості випадків, в металургії чорних металів використовується аргон.

**Плазмова плавка** в порівнянні з іншими способами плавки має такі **переваги**: ​​

– виключається забруднення металу небажаними домішками, наприклад, вуглецем з графітованих електродів, що застосовуються в звичайних дугових печах;

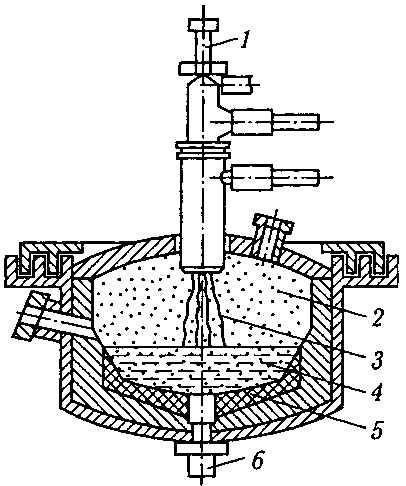
– плазмовий струмінь може складатися з будь-якої необхідної суміші газів, що дозволяє підтримувати в печі будь-яку атмосферу – окислювальну, відновну або нейтральну;

– в плазмо-дугових печах можна досягти високих і легко регулюються температур, а стабільність процесу спрощує проблему його регулювання;

– значна швидкість процесу і високий коефіцієнт засвоєння легуючих добавок;

– зниження вмісту газів та неметалевих включень в металі, що виплавляється і переплавляється.

У печах з вогнетривкою футерівкою (рис. 11.3) водоохолоджуваний мідний анод - подовий електрод (6), умонтований врівень із подом (5), контактує із металом (4). Камеру печі (2), з якої заздалегідь відкачують повітря, заповнюють газом, який витікає з плазмотрона (1), і після досяг­нення належного тиску, зазвичай близького до атмосферного, завдяки дуговому розряду відбувається іонізація газу і починається плавка.



1 – плазмотрон; 2 – камера печі; 3 – плазмова дуга; 4 – метал; 5 – под; 6 – подовий електрод

Рис. 11.3. Схема плазмово-дугової сталеплавиль­ної печі з вогнетривкою футерівкою

На початку процесу плазмова дуга (3) проплавляє в шихті вузький коло­дязь, і рідкий метал, який стікає вниз, накопичується на подині, а після цього розплавляється вся шихта, що залишилася.

Метод ПДП має високу продуктивність і високий коефіцієнт використання теплової енергії. Завдяки своїм особливостям ПДП, на відміну від інших способів рафінуючи перетопів, дозволяє вирішувати багато технологічних завдань. Процес ПДП може здійснюватися як при нормальному або підвищеному тиску, так і у вакуумі.

Дегазація й рафінування металу особливо інтенсивно відбуваються на поверхні ванни, де рідкий, перегрітий плазмовою дугою метал кон­тактує з газовою атмосферою печі. Одним з недоліків таких печей є наявність донного водоохолоджуваного електрода, у разі прогару якого вода потрапляє під рідкий метал, що призводить до вибуху печі. Тому донний електрод потрібно виготовляти зі струмопровідного матеріалу.

**11.3 Вакуумні способи спецелектрометалургії**

Для отримання|здобуття| високоякісних сталей| і сплавів все більш широке застосування|вживання| знаходять|находять| вакуумні способи плавки|плавлення|:

– вакуумно-індукційна плавка (ВІП);

– вакуумно-дугова плавка (ВДП);

– електронно-променева плавка (ЕПП);

– їх комбінація: ЕШП–ВДП, ВІП–ВДП та інші.

**11.3.1 Вакуумно-індукційна плавка**

Основним процесом при **вакуумно-індукційній плавці** є утворення однорідного розплаву і розчинення в ньому компонентів сплаву. Інтенсивність розчинення легуючого компонента, що вводиться у вигляді добавки, і однорідність одержуваного розплаву в значній мірі визначаються температурою плавлення добавки і її щільністю в порівнянні з металом - основою сплаву.

Робота печей періодичної дії характеризується тим, що після кожної плавки вакуумну плавильну камеру необхідно розгерметизувати для заміни виливниці із зливком або форми з відливанням та завантаження наступної порції шихти. У зв’язку з необхідністю відкачувати на початку кожної плавки великої кількості газів, знижуючи тиск від атмосферного до робочого, установки періодичної дії обладнали потужними вакуумними насосами. Метал, що виплавляється в цих печах, може містити більше кисню і газів, чим метал, отриманий в печах напівбезперервної дії. Середня тривалість плавки становить 2,5–3,5 год., питома витрата електроенергії – 2–3 кВт·год./кг.

Переваги ВІП найповніше реалізуються при безшлаковому процесі. Отримання необхідного складу металу досягається або переплавом відповідних відходів, або сплавом чистих матеріалів.

У вакуумних індукційних печей повинні бути:

– герметична вакуумна камера і вакуумні насоси;

– індуктори ВІП розраховані на напругу середньої частоти не вище 400В;

– застосування більш високої напруги призводить до пробою на корпус печі;

– для отримання зниженої напруги застосовується понижуючий трансформатор;

– для подачі напруги середньої частоти на індуктор, що знаходиться у вакуумній камері;

– застосовуються спеціальні гермовводи.

– ВІП можуть розвивати температуру в індукторі вакуумної камери до 2200 °C.

Недоліком|нестачею| ВІП є|з'являється| наступні| фактори|фактор|:

– при тривалій витримці|витягу| в результаті ре­агування| з|із| оксидами футерівки метал забруднюється киснем| і неметалевих включеннями, а також елементами, які відновлюються з футерівки (кремнієм, алюмінієм та іншими);

– утворення під час кристілізації зливків дефектів, характерних для зливків звичайної відкритої плавки та розливці металу.

Протягом останніх років найбільшого поширення в світовому ливарному виробництві отримали індукційні тигельні печі середньої частоти камерного типу. Вони являють собою універсальні пічні агрегати, які здатні не тільки просто переплавляти метал при завантаженні від 1 кг до 30 т, але за допомогою яких можуть вирішуватися спеціальні технологічні і металургійні завдання.

Сучасні плавильні печі камерного типу працюють на середніх частотах (від 250 до 500 Гц), що дозволяє контролювати перемішування розплаву при високій щільності потужності (близько 1000 кВт/т).

В даний час застосовуються такі варіанти конструкцій промислових вакуумно-індукційних печей камерного типу:

– ВІП однокамерна (VIM) (рис. 11.4, а). Типове завантаження 0,5–15 т; система одиночної камери з вертикальною плавильною камерою;

– ВІП-ПК з пересувною камерою (VIM-MC movable mold chamber) (рис. 11.4, б). Типове завантаження 0,5–15 т; двокамерна система з окремою пересувною камерою-шлюзом для виливниць;

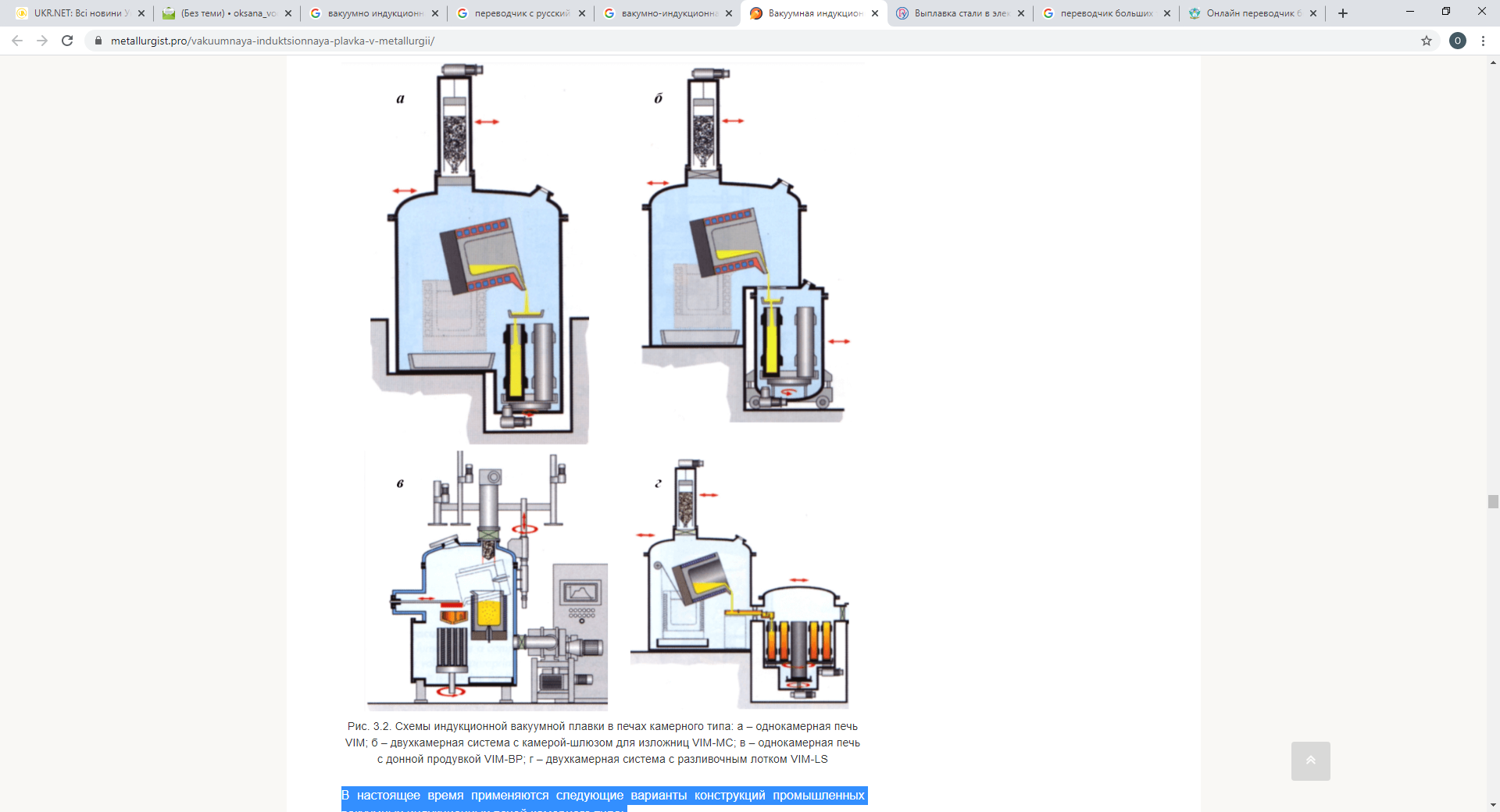
– ВІП-ДП з донною продувкою (VIM-BP bottom purging) (рис. 11.4, в). Піч з метою обробки розплаву газами оснащена попередньо підігрітим тандішем і тиглем для донної продувки газом;

– ВІП-ЛС з лотковою системою (VIM-LS launder system) (рис. 11.4, г). Двокамерна система з однією камерою і поворотним столом для коротких і довгих зливків. Змінний лоток, що підігрівається, для розливки розплаву;

– ВІДИСТ – вакуумно-індукційна дистиляція (VIDIST – vacuum induction distillation) (схема процесу представлена на рис. 11.5, а). У кольоровій металургії випаровування легколетучих елементів з розплаву використовується для дистиляції металів;

– ВИД – вакуумно-індукційна дегазація (VID – vacuum induction degassing) (схема процесу представлена на рис. 11.5, б). Вакуумно-індукційна дегазація з малим об'ємом камери печі може бути застосована для цехів сталевого лиття і ливарних заводів. Використовується для плавки і дегазації спеціальних сталей і сплавів з розливкою в ківш або ливарні форми. Місткість печей від 1 до 15 т;

– ВІП-ДД з двох дверним компонуванням (VIM-DD double-door arrangement). Типове завантаження 5–30 т, двокамерна система з горизонтальною плавильною камерою і двома змінними індукційними печами;

****

а – однокамерна піч VIM; б – двокамерна система з камерою-шлюзом для виливниць VIM-MC; в – однокамерна піч з донною продувкою VIM-BP; г – двокамерна система з розливним лотком VIM-LS

Рис. 11.4. Схеми індукційно-вакуумної плавки в печах камерного типу

– ВІП-ЦПК з горизонтальною пересувний камерою (VIM-HMC horizontal mold chamber). Типова завантаження 0,5–10 т; дво- або багатокамерна система з бічної дверцятами і змінної піччю. Гідравлічний похилий пристрій і кабелі електроживлення розташовані зовні.

****

Рис. 11.5. Схеми процесів вакуумно-індукційної дистиляції (а) та вакуумно-індукційної дегазації (б)

**11.3.2 Вакуумно-дугова плавка**

**Вакуумна-дугова плавка** (рис. 11.6) – це один з перших способів отримання танталу та інших тугоплавких металів. За використанням ванни рідкого металу ВДП поділяють на печі для отримання зливків та на печі для плавлення в гарнісажі (ливарні).

Залежно від ступеня механізації печі бувають періодичної (за цикл роботи печі заливається одна форма), напівнеперервної (заливається кілька форм) і неперервної (піч оснащена шлюзовою камерою для завантаження і розвантаження форм без знімання вакууму) дії.

Конструктивно розрізняють ВДП з електродом, що витрачається, і електродом, що не витрачається. Переважна більшість печей з електродом, що витрачається (рис. 11.7).

Ефективність рафінування сплаву при ВДП, характер макро- і мікроструктури залежать, головним чином, від: діаметру кристалізатора (із збільшенням діаметру кристалізатора збільшується хімічна неоднорідність зливка і погіршується структура); сили струму дуги (для забезпечення необхідної високої якості сплаву процес ВДП слід вести при відносно низькій оптимальній силі струму).

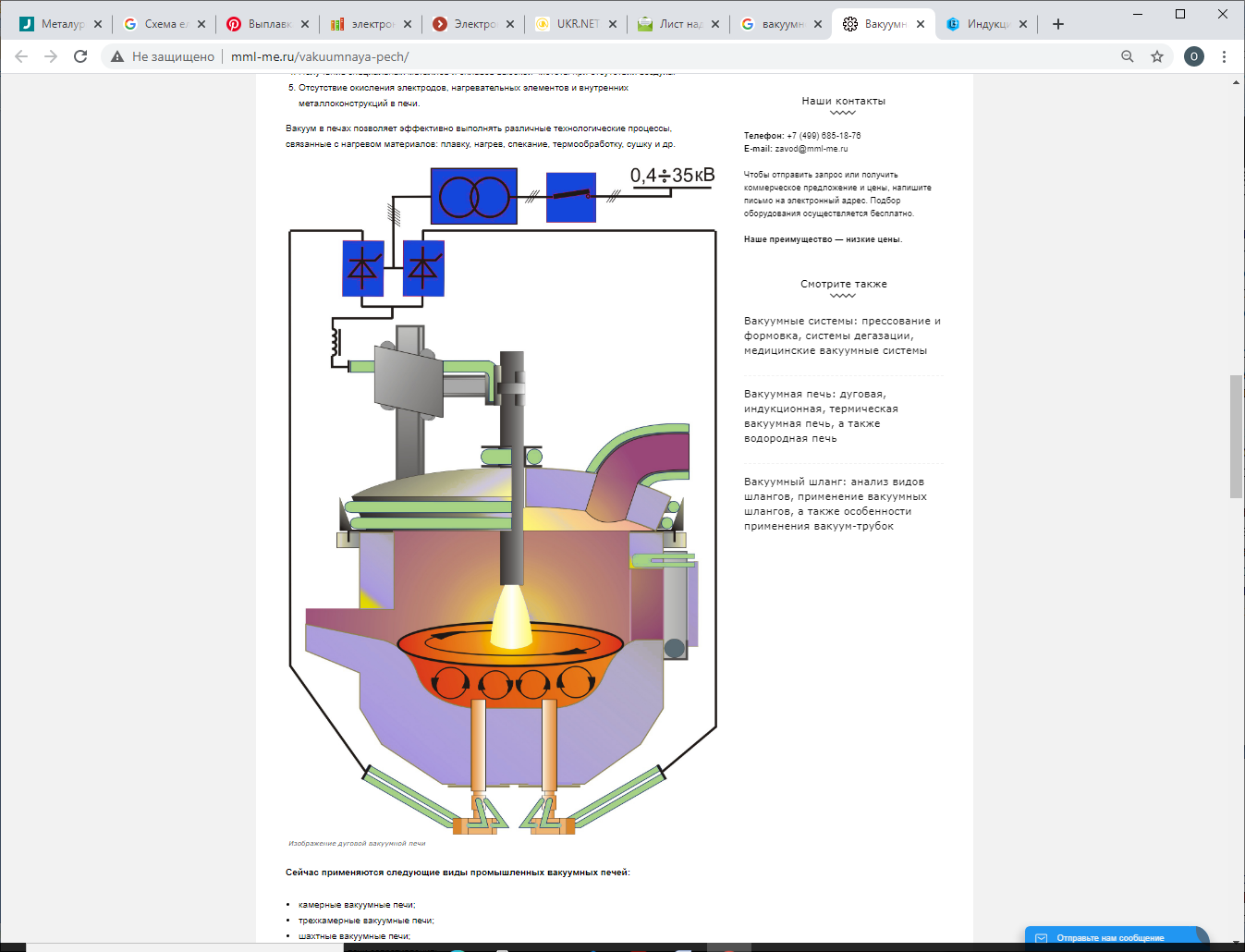
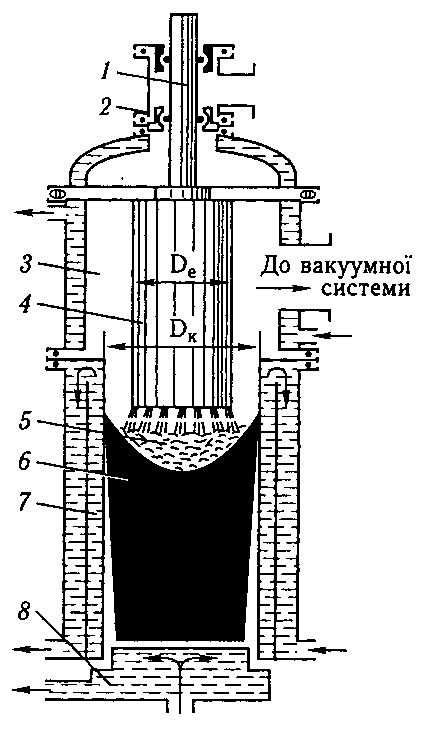


Рис. 11.6. Загальний вид вакуумно-дугової печі



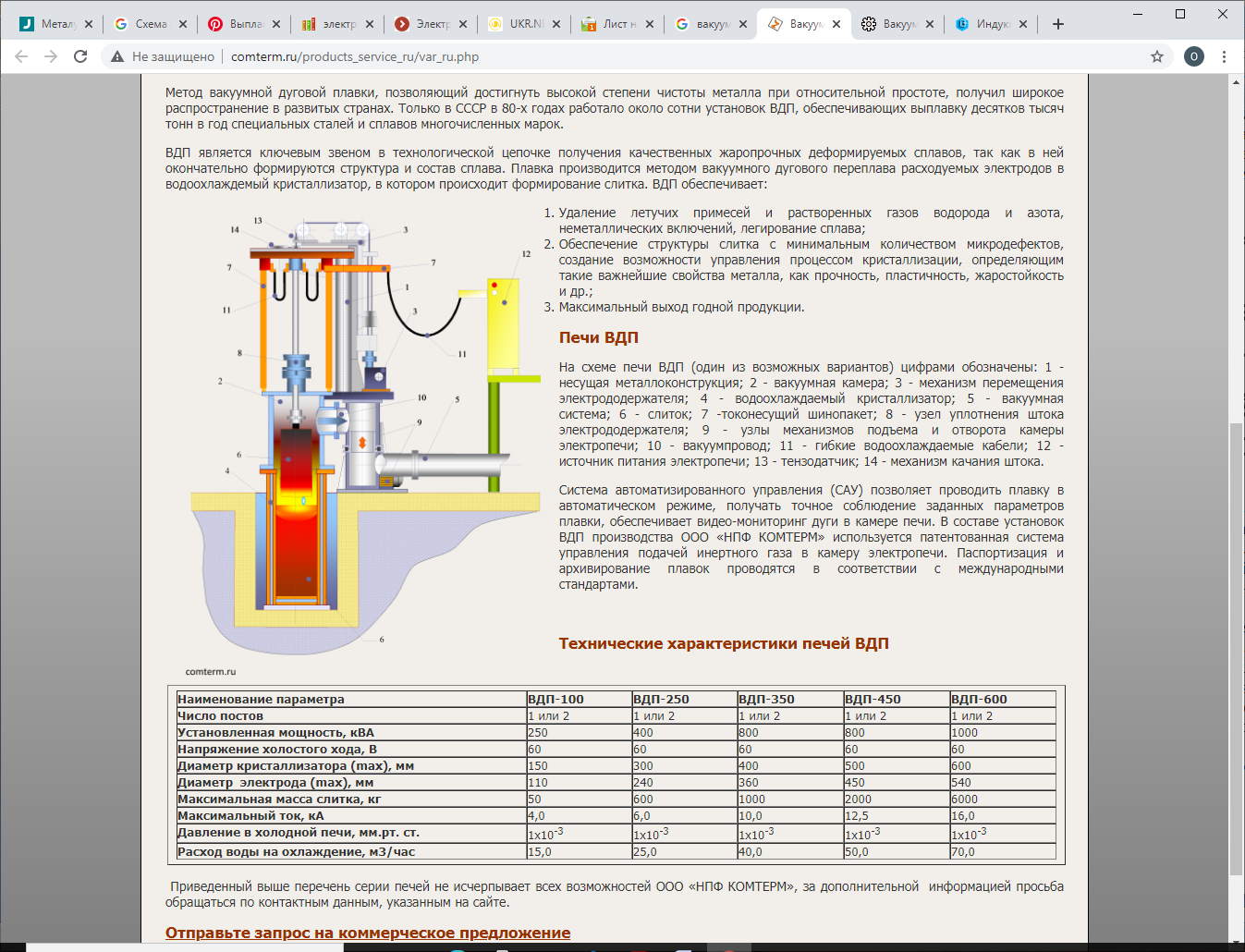
1 *–*  струмопровідний шток з електродотримачем; 2 *–*  вакуумний ущільнювач; 3 *–*  робоча камера; 4 *–*  електрод, що витрачається (катод)*;*  5 *–*  ванна рідкого металу; 6 *–*  зливок; 7 *–*  водоохолоджуваний кристалізатор; 8 *–* водоохолоджуваний піддон

Рис. 11.7. Схема газорозрядного приладу, що імітує дугову вакуумну піч з електродом, що витрачається

Перевагами ВДП є відсутність контактування металу з вогнетривкою футерівкою, глибока дегазація металу, очищення його від неметалічних домішок, мінімальна хімічна та структурна неоднорідність зливків зав­дяки послідовній кристалізації.

До недоліків ВДП слід віднести неможливість зниження вмісту сірки (відсутність шлаку), складність і висока вартість устатку­вання, підвищене випаровування деяких компонентів, іноді незадовіль­на поверхня зливків.

Промислові вумумно-дугові печі виробництва ТОВ «НВФ КОМТЕРМ» представлено на рис. 11.8.



1 – несуча металоконструкція; 2 – вакуумна камера; 3 – механізм переміщення електродотримача; 4 – водоохолоджуваний кристалізатор; 5 – вакуумна система; 6 – зливок; 7 – струмонесучий шінопакет; 8 – вузол ущільнення штока електродотримача; 9 – вузли механізмів підйому і одвороту камери електропечі; 10 – вакуумпровід; 11 – гнучкі водоохолоджувані кабелі; 12 – джерело живлення електропечі; 13 – тензодатчик; 14 – механізм гойдання штока

Рис. 11.8. Схема вакуумно-дугової печі виробництва ТОВ «НВФ КОМТЕРМ»

Система автоматизованого управління (САУ) дозволяє проводити плавку в автоматичному режимі, отримувати точне дотримання заданих параметрів плавки, забезпечує відео-моніторинг дуги в камері печі. У складі установок ВДП виробництва ТОВ «НВФ КОМТЕРМ» використовується патентована система управління подачею інертного газу в камеру електропечі.Паспортизація та архівування плавок проводяться відповідно до міжнародних стандартів.

**11.3.2.1 Вакуумно-дугові печі із електродом, що витрачається**

Переплав електроду, що витрачається, засновано на нагріві та плавці у вакуумі металевої заготівки і одночасному твердінні металу у водоохолоджуваному кристалізаторі.

На рис. 11.9 представлена схема ВДП із електродом, що витрачається.

Піч складається з робочої камери 2, мідного водоохолоджуємого кристалізатора 9, електродотримача 3, механізму подачі електрода 4 і системи вакуумних насосів. Електрод, що витрачається, 6 кріпиться до електродотримача 3, який через вакуумне ущільнення проходить крізь верхній торець робочої камери 2.

Електродотримач служить для підведення струму до електрода й фіксації його в камері печі. Електродотримач за допомогою гнучкої підвіски пов'язаний з механізмом подачі електрода.

**1 *–*  джерело живлення; 2 *–*  робоча камера; 3 *–*  електродотримач; 4 *–*  механізм подачі електрода; 5 *–*  до вакуумних насосів; 6 *–*  електрод;  
7 *–*  рідкий метал; 8 *–*  зливок; 9 *–*  кристалізатор; 10 *–*  шток для підйому піддона; 11 *–*  піддон  
Рис. 11.9.  Схема вакуумної дугової печі з витрачає електродом

Електрод, що витрачається, 6 являє собою підлягаючому переплаву вихідний метал. Він може бути круглого або квадратного перетину. Як правило електроди, що витрачаються, утримують всі необхідні легуючі елементи.

Діаметр електрода вибирається таким чином, щоб зазор між електродом і стінкою кристалізатора був більше довжини дуги, що горить між електродом і ванною рідкого металу. У противному випадку можливе перекидання електричної дуги на стінку кристалізатора.

Кристалізатор 9 представляє собою мідну водоохолоджуєму трубу зі стінкою товщиною від 8 до 30 мм. Кристалізатори бувають двох типів: глухі й наскрізні. При плавці металу в наскрізному кристалізаторі можна витягати злиток униз по ходу плавки. Наскрізні кристалізатори застосовуються при плавці тугоплавких металів і сплавів. При плавці сталі використовують глуходоні кристалізатори.

Вакуумні дугові печі працюють як на постійному, так і на перемінному струмі.

Після установки електрода, що витрачається, у камері печі й відкачки її до необхідного тиску ~ (10-2 Па) запалюють електричну дугу між електродом і металевим запалом, що лежить на дні кристалізатора. Під дією тепла електричної дуги нижній торець електрода 6 оплавляється й краплі металу стікають у кристалізатор 9, утворюючи рідку металеву ванну 7. У міру оплавлення електрод за допомогою механізму переміщення автоматично подається вниз для підтримки заданої відстані між електродом і металом. Паралельно із плавленням електрода в кристалізаторі відбувається формування злитка 8.

Рафінування металу від шкідливих домішок відбувається під час проходження рідких крапель металу через електричну дугу й через поверхню розплаву в кристалізаторі. Після закінчення плавки й повної кристалізації злитка в піч напускають повітря й вивантажують злиток.

Одним з основних переваг вакуумного дугового переплаву є відсутність контакту рідкого металу з керамічними матеріалами. Основний недолік - обмежений час перебування металу в рідкому стані, що істотно знижує можливості вакууму, щодо рафінування.

**11.3.2.2 Вакуумно-дугові печі із електродом, що не витрачається**

У деяких випадках виготовити електрод, що витрачається, неможливо (наприклад, при переплаві титанової губки). У цих випадках губчатий або порошкоподібний матеріал розплавляють, поміщаючи його в зону дуги між постійним (що не витрачається) електродом і ванною. Такий метод називають ВДП із електродом, що не витрачається.

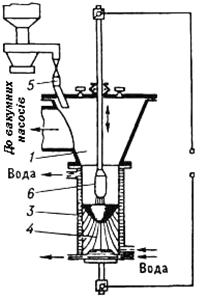
Отриманий у такий спосіб злиток зазвичай ще раз переплавляють методом ВДП із електродом, що витрачається. При ВДП із електродом, що не витрачається, замість кристалізатора іноді встановлюють металевий водоохолоджуємий тигель; під час плавки на стінках тигля утвориться скоринка металу, що переплавляється, (гарнісаж) і розплав контактує із гарнісажем із цього ж металу.

Печі такого типу називають гарнісажними.

Вакуумні дугові гарнісажні печі (ВДГП) використовують також для фасонного лиття виливків особливо відповідального призначення.

Електроди, що не витрачаються, зазвичай роблять із вольфраму.

Схема вакуумної печі з не витрачає електродом, що, наведена на рис. 11.10.

**1 *–* вакуумна камера; 2 *–* електрод, що витрачається; 3 *–* кристалізатор; 4 – зливок, що наплавляється; 5 *–* живильник для подачі шихти;  
6 *–* тугоплавка насадка електрода, що не витрачається  
Рис.11.10. Схема вакуумної дугової печі з електродом, що не витрачається

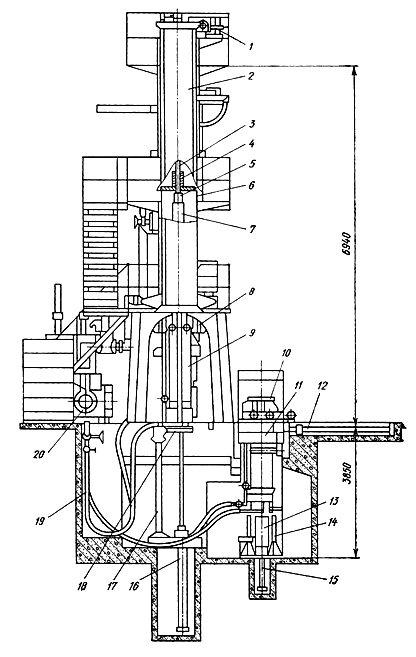
**11.3.2.3 Вакуумні дугові печі типу ДСВ-6,3-Г6-М4 з електродом, що витрачається**

У вакуумних дугових печах виплавляють зливки масою до 200 т.

У чорній металургії отримали розповсюдження печі серії ДСВ:  ДСВ-3, 2-Г1-М5, ДСВ-6, 3-Г6-М4, ДСВ-8-Г16-М1 і ДСВ-11, 2-Г37-М-02.

На рис. 11.11 показаний загальний устрій електропечі ДСВ-6,3-Г6-М4 (дугова сталеплавильна вакуумна електропіч із максимальним діаметром зливка 630 мм, тип кристалізатору - глуходоний, маса зливка - 6 т, модель печі - 4).

Піч складається з таких основних вузлів і механізмів: основи з колоною 2, вакуумної камери 6, механізму переміщення електрода, що витрачає, 1, змінного кристалізатору 9, механізму вертикального переміщення кристалізатору 16, механізму притиску 8 кристалізатору до вакуум-камери, механізму вертикального переміщення злитка (механізму розвантаження) 15, механізму відкоту кристалізатору 12, механізму зміни кристалізатора 11 і вакуумної насосної установки 20.

**Рис.11.11. Вакуумна дугова піч ДСВ-6.3-Г6-М4 для виплавки зливків масою 6,3 т

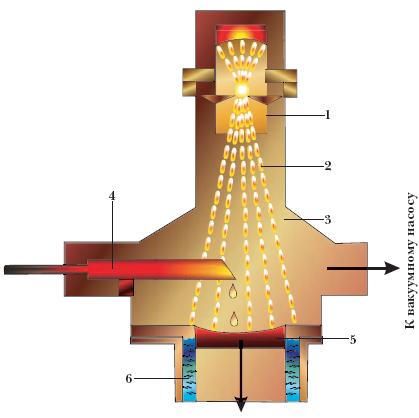
Всі механізми електропечі гідравлічні з гідроциліндрами двосторонньої дії, за винятком механізму переміщення електрода, що витрачає, постаченим електроприводом.

Кристалізація зливка відбувається в мідному водоохолоджуємому кристалізаторі. Найбільше часто застосовують кристалізатори з водяною сорочкою, що складаються із двох частин. Внутрішню частину виготовляють із мідних листів або труби по профілю злитка із двома фланцями. Зовнішню частину, що представляє собою кожух з немагнітної листової сталі з патрубками для підведення й відводу охолоджувальної води розташовують між фланцями.

**11.3.3** **Електронно-променева плавка|плавлення|**

**Електронно-променева плавка|плавлення|** – це найбільш ефективний метод вакуумного переплаву, що дозволяє отримувати|одержувати| особливо якісні сталі і сплави. За допомогою ЕПП отримують високочисті зливки тугоплавких і високореакціоннних металів і сплавів вольфраму, титану, молібдену, ніобію, гафнію, цирконію, нікелю, міді, кобальту, заліза, високоякісні жаростійкі і жароміцні сплави, а також інтерметалліді: Ti3Al, TiAl, Ni3Al , NiAl та інші.

Схема електронно-променевої печі представлена на рис. 11.12.



1 – електронна пушка; 2 – електронний пучок; 3 – плавильна камера; 4 – зразок, що розплавляється; 5 – виплавляється зливок, що виплавляється; 6 – водоохолоджуваний мідний каталізатор

Рис. 11.12. Схема електронно-променевої печі

**Принципово важливими задачами ЕПП** є:

− отримання в матеріалі литих виробів рівня властивостей, які б не поступалися властивостям аналогічних сплавів у деформованому стані;

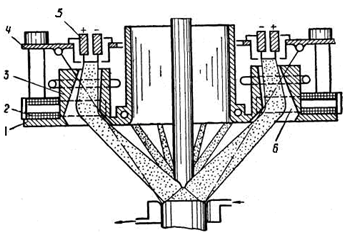
− визначення характеру змінення властивостей сплавів електроннопроменевої плавки при високих температурах і їх порівняння з властивостями сплавів ВДП.

Спосіб ЕПП принципово відмінний від інших способів СЕМ тим, що потужність підводиться не через витратний електрод, а від окремого, кільцевого катода. Під дією електронного пучка, який скерований у зону плавлення, можна досягнути температури до 7000 0С. Це дає змогу виплавляти сплави на основі надтугоплавких металів, а також особливо чистих металів.

**Перевагою ЕПП** перед іншими методами спеціальної металургії є більш ефективна очистка металів і сплавів від домішок, неметалічних включень, газів. Це пояснюється не тільки проведенням процесу при значно меншому тиску залишкових газів у плавильній камері, що характерно для інших способів вакуумної металургії, але й особливостями електронно-променевого нагріву, а також можливістю витримки розплаву при високих температурах практично любий необхідний для розвитку процесів рафінування час.

Схема електронно-оптичної системи установки В-270 наведена на рис. 11.13. Під дією прискорювальної напруги електричного поля між катодом 5 і щілинним анодом 3 виникає рух електронів з визначеною швидкістю. На виході з формуючих котушок 2 і 6, електронний пучок попадає в додаткове поле, що фокусує, магнітної лінзи (на схемі не показана). Магнітна лінза розташована так, що площина нагріву перебуває на рівні її верхнього торця.

Робоча камера 4 має вигляд горизонтального циліндра, призначеного для вільного розміщення елементів конструкції печі й вакуумних систем. Електронні пушки встановлюють на патрубках, розташованих у верхній частині робочої камери. Для зручності чищення й обслуговування внутрішня поверхня камери повинна бути гладкою з мінімальним числом важкодоступних місць. Як матеріал для внутрішніх порожнин камери вибирають як правило нержавіючу сталь. Робоча камера повинна бути оснащена системою водяного охолодження, здатною відвести до 50–60 % потужності ЕПП.

  
1, 4 - нижня й верхня основи; 3 – мідні щілинні аноди; 5 – лінійні катоди (діаметром 1 мм); 2, 6 – відхиляючі котушки й магнітопроводи системи  
Рис. 11.13. Схема електронно-оптичної системи установки В - 270 з десятьма радіальними пушками

Кристалізатор 11 є самим теплонавантаженим елементом конструкції ЕПП. Особливу увагу варто приділити інтенсивності охолодження верхньої частини кристалізатору, тому що в ході плавки рівень рідкого металу підтримують поблизу верхнього торця кристалізатору (злиток, що наплавляється, витягають униз). В ЕПП основною причиною виходу з ладу кристалізатору є його проплавлення по кільцевому паску прилягання розплавленого металу, якщо охолодження стає недостатнім (при великих перегрівах металу вище температури плавлення, особливо для тугоплавких металів). Для забезпечення надійності системи охолодження кристалізаторів застосовують прокачування води через порожнини охолодження під підвищеним тиском (0,4–0,6 мПа), для чого встановлюють спеціальні насоси.

Кристалізатори виготовляють у вигляді внутрішньої мідної гільзи з товщиною стінки 10–16 мм, укладеної в кожух із нержавіючої сталі, що забезпечує найбільш раціональний розподіл охолоджувальної води. Кристалізатори часто розташовують усередині робочої камери печі. Якщо кристалізатор розташований у нижній частині робочої камери, можливо його видалення з-під печі разом зі злитком, що дозволяє легко здійснити механічне чищення кристалізатору після кожної плавки або, якщо буде потреба, заміну внутрішньої гільзи.

Сипкф матеріали (обрізь, стружка, гранулят та інші) подають у кристалізатор із лотка на торцевій кришці робочої камери.

Оглядові пристрої повинні забезпечувати гарний огляд робочої зони печі. У зв'язку з тим що ЕПП працюють при залишкових тисках не вище 0,05–0,1 Па, запилення стекол оглядових пристроїв парами металу дуже велике. Доводиться вживати заходів для додаткового їхнього захисту.

Діапазон робочих тисків обумовлюється технологічними й енергетичними параметрами ЕПП, а також ступенем розвитку вакуумної техніки й складає 10-1 –10-3 Па.

Тому у вакуумних системах ЕПУ застосовують високо вакуумні паромасляні дифузійні й бустерні паромасляні насоси, які приєднують до печі послідовно або паралельно (при необхідності швидкої ліквідації пікових газовиділень переважніше схема послідовного з'єднання: високо вакуумний насос – бустерний насос).

Механізм витяжки зливка 15 розташовують під робочою камерою. Водоохолоджуємий шток 14 рухливого піддона кристалізатору виходить через вакуумне ущільнення під піч, де з'єднується з механізмом.

Зливок витягають у водоохолоджуєму «холодильну» камеру, шлюзують вакуумним затвором і викочують з-під печі. Швидкість витяжки залежить від масової швидкості наплавлення рідкого метала і його кристалізації складає 20 – 100 мм/хв.

**Питання для самоконтролю**

1. Надати визначення поняття «спецелектрометалургія».

2. Привести схему установки ЕШП.

3. Охарактеризувати особливості виплавки сталі методом електрошлакового переплаву.

4. Привести схему електрошлакового переплаву.

5. Охарактеризувати особливості виплавки сталі методом плазмово-дугової плавки.

6. Привести схему плазмово-дугової сталеплавиль­ної печі.

7 .Охарактеризувативакуумні способи спецелектрометалургії.

8. Охарактеризувати особливості виплавки сталі методом вакумно-індукційної плавки.

9. Які застосовуються варіанти конструкцій промислових вакуумно-індукційних печей камерного типу?

10. Охарактеризувати особливості виплавки сталі методом вакумно-дугової плавки.

11. Привести схему вакуумної дугової печі з електродом, що витрачається

12. Привести схему вакуумної дугової печі з електродом, що не витрачається

13. Охарактеризувати особливості виплавки сталі в електронно-променевій печі.

14. Привести схему електронно-променевої печі.

15 Охарактеризувати особливості дуплекс-процесів ВІП−ЕШП та ЕШП−ВДП.