

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Лю Тяньї

УДК 669.184.244.66

ДИСЕРТАЦІЯ

**Дослідження і розробка киснево-конвертерних фурм раціональної
конструкції та підвищення ефективності конвертерної плавки
при їх експлуатації**

05.16.02–металургія чорних та кольорових
металів і спеціальних сплавів

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Лю Тяньї

підпис

Ініціали та прізвище дисертанта

Науковий керівник: Величко Олександр Григорович
член-кореспондент Національної
академії наук України, доктор
технічних наук, професор

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Лю Тяньї. Дослідження і розробка киснево-конвертерних фурм раціональної конструкції та підвищення ефективності конвертерної плавки при їх експлуатації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 - «Металургія чорних та кольорових металів і спеціальних сплавів» - Національна металургійна академія України, Міністерство освіти і науки України, м. Дніпро 2020.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним узагальненням та розробці киснево–конвертерних фурм для організації стабільного дуттьового режиму продувки при використанні наконечників киснево-конвертерної фурми нових конструкцій, технології їх виготовлення і зборки, встановленню гідродинамічних закономірностей охолодження наконечників киснево-конвертерних фурм, підвищення стійкості наконечників, забезпечення розрахункового витікання кисневих струменів для ефективної киснево-конверторної плавки.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень в області киснево–конвертерної плавки стали бути знайдені нові наукові рішення та отримані нові практичні результати. Отримані результати щодо організації охолодження наконечників киснево-конвертерної фурми та запропонована нова конструкція наконечників на основі вінця і соплового блоку з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда.

Висока швидкість охолоджуючих потоків і ефективність охолодження досягаються організацією зміни спрямування потоків безпосередньо в наконечнику з периферії на центральну частину і застосуванням направляючих турбулізаторів потоків у вигляді спіралі Архімеда на внутрішній поверхні вінця та компенсаторами температурних навантажень.

Науково обґрунтована і експериментально підтверджена доцільність турбулізації охолоджуючих потоків в застійних зонах наконечників кисневої фурми. Це дозволяє забезпечити високу швидкість охолоджуючих потоків в районах

застійних зон та їх зникнення, що в свою чергу виключає розжар сопел на зовнішній поверхні вінця і організує витікання кисневих струменів в розрахунковому режимі протягом експлуатації наконечника.

Розроблено і застосовано модульний принцип виготовлення наконечників киснево-конвертерних фурм та реалізований комплексний підхід щодо організації і турбулізації охолоджуючих потоків, компенсації температурних навантажень, захисту зовнішньої поверхні вінця наконечника.

Металографічними дослідженнями доведена можливість використання пайки при зборці нероз'ємних деталей наконечника. Металографічний аналіз структури швів пайки на кордоні сталь-латунь, латунь-мідь показав рівномірну структуру і фазовий склад, шов не мав ознак розслоєння, макротріщин, раковин, пор і мав міцне з'єднання. Стосовно зовнішньої поверхні вінця наконечника досліджені електроіскрове легування, підготовка поверхні і паро плазмове нанесення покриття.

Наконечники нової конструкції виготовлені за запропонованими і реалізованими технологіями для киснево-конвертерних фурм 60т і 160т конвертерів в Україні та конвертерів заводу «Chengde Steel» (КНР). Суттєво покращена технологічність зборки, на 30-40% зменшені витрати на виробництво наконечників, знижено матеріалоємність і енергоємність виготовлення, підвищена надійність експлуатації.

Розроблені на основі теоретичних і практичних досліджень наконечники киснево-конвертерних фурм нових конструкцій використані для продувки киснем металевої ванни в 60т і 160т конвертерах заводів України. Експлуатація наконечників показала відсутність розжару сопел на зовнішній поверхні вінця, що забезпечувало стабілізацію дугтьового і шлакового режимів на всьому періоді експлуатації наконечників. Стійкість наконечників складала 450-600 плавок, що у 2-3 рази перевищувало стійкість наконечників, що використовувалися в цеху до прийняття в експлуатацію наконечників нової конструкції.

В результаті застосування наконечників киснево-конвертерних фурм нових конструкцій на 160т конвертерах вихід рідкої сталі збільшився на 0,6%, що в першу чергу, пов'язано зі зменшенням оксидів заліза в шлаку. Суттєво зменшена

чисельність плавов, що «передуті» на вміст вуглецю $<0,05\%$. Практикою використання 6-ти соплових наконечників з центральним підводом води на заводі «Chengde Steel» (КНР) доведені покращені умови охолодження наконечника, досягнуті кращі результати по видаленню фосфору, швидше «запалювалася» плавка, значно зменшилося налипання шлаку на фурму. На плавках, що були продуті запропонованими і виготовленими наконечниками киснево-конвертерних фурм скоротилися витрати метало-шихти, тривалість продувки.

Ключові слова: наконечник киснево-конвертерних фурм, конструкція і виготовлення наконечника, охолодження і стійкість наконечника, продувка киснем, технологічні показники, конвертерна плавка.

ABSTRACT

Liu Tianyi. Research and development of oxygen-converter lances of rational design and increasing the efficiency of converter smelting during their operation. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys" - National metallurgical academy of Ukraine, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro 2020.

The dissertation is devoted to theoretical generalizations and development of oxygen-converter lances for organization of stable blast purge mode using oxygen-converter lance tips of new constructions, technology of their production and assembly, establishment of hydrodynamic regularities of cooling of tips. oxygen jets for efficient oxygen-converter melting.

As a result of theoretical and experimental research in the field of oxygen-converter smelting of steel, new scientific solutions were found and new practical results were obtained. The results concerning the organization of cooling of tips of an oxygen-converter lance are received and the new design of tips on the basis of a crown and the nozzle block with turbulizers in the form of a spiral of Archimedes is offered.

High cooling flow rate and cooling efficiency are achieved by organizing the change of flow direction directly in the tip from the periphery to the Central part and the use of flow turbulence guides in the form of an Archimedean spiral on the inner surface of the crown and temperature load compensators.

Scientifically substantiated and experimentally confirmed expediency of turbulence of cooling flows in stagnant zones of oxygen lance tips. This allows to ensure a high speed of cooling flows in areas of stagnant zones and their disappearance, which in turn eliminates the heat of the nozzles on the outer surface of the crown and organizes the leakage of oxygen jets in the design mode during operation of the tip.

The modular principle of production of tips of oxygen-converter lances is developed and applied and the complex approach concerning the organization and turbulence of cooling streams, compensation of temperature loadings, protection of an external surface of a crown of a tip is realized.

Metallographic studies have proven the possibility of using soldering when assembling integral parts of the tip. Metallographic analysis of the structure of solder joints at the steel-brass, brass-copper boundary showed a uniform structure and phase composition, the seam showed no signs of delamination, macro cracks, shells, pores and had a strong connection. With respect to the outer surface of the tip crown, electrospark doping, surface preparation and steam-plasma coating were investigated.

The tips of the new design are made according to the proposed and implemented technologies for oxygen-converter lances of 60 t and 160 t converters in Ukraine and converters of the plant "Chengde Steel" (PRC). Significantly improved assembly technology, reduced by 30-40% the cost of production of tips, reduced material and energy consumption of manufacturing, increased operational reliability.

The tips of oxygen-converter lances of new designs developed on the basis of theoretical and practical researches are used for purging with oxygen of a metal bath in 60 t and 160 t converters of plants of Ukraine. The operation of the tips showed the absence of hot nozzles on the outer surface of the crown, which provided stabilization of the blast and slag modes throughout the operation of the tips. The stability of the tips was 450-600

swimming trunks, which is 2-3 times higher than the resistance of the tips used in the shop before the commissioning of the tips of the new design.

As a result of the use of oxygen-converter lance tips of new designs on 160 t converters, the yield of liquid steel increased by 0.6%, which is primarily due to the reduction of iron oxides in the slag. Significantly reduced the number of swimming trunks that are "preceded" by a carbon content $<0.05\%$. The practice of using 6 nozzle tips with central water supply at the plant "Chengde Steel" (PRC) proved improved cooling conditions of the tip, achieved better results in removing phosphorus, faster "ignited" melting, significantly reduced the adhesion of slag to the lance. On the melts, which were purged by the proposed and manufactured tips of oxygen-converter lances, the costs of the metal charge and the duration of the purge were reduced.

Key words: tip of oxygen-converter lances, design and manufacture of tip, cooling and stability of tip, oxygen purge, technological indicators, converter melting.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях, що включено до міжнародних наукометричних баз:

1. Liu T. Technological features of applying cluster thermal barrier coatings on copper surfaces of the converter lance tips /Velychko O.G., Liu T., Abramov S.O., Marchuk I.V., Gryshin V.S.// *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, m. Dnipro, 2020, No. 3, pp. 53-58. (Scopus).
2. Лю Тяньи. Моделирование процесса штамповки венца и корпуса наконечников кислородных фурм /Лю Тяньи, Величко А.Г., Гришин В.С., Мельничук А.В.// «Системні технології» Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: НМетАУ, 2017. Випуск №5(112) С. 146-152. (Copernicus).
3. Лю Тяньи. Эффективная технология при использовании новой кислородно-конвертерной фурмы /Лю Джичанг, Лю Тяньи, Величко А.Г.// «Системні технології» Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: НМетАУ, 2017. Випуск №3(110) С. 40-44. (Copernicus).

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Лю Тяньи. Модульный принцип подготовки производства наконечников кислородных фурм /А.Г. Величко, В.С. Гришин, Лю Тяньи, В.А. Грядунов, В.Н. Попов// Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. № 7 . С. 230-242.
5. Лю Тяньи. Опыт эксплуатации наконечников фурм с различным количеством сопел в условиях ККЦ ОАО ДМЗ им. Петровского /В.С. Гришин, В.Л. Грядунов, Лю Тяньи, В.И. Пищида// Металл и литье Украины, 2006. № 5. С. 34-35.
6. Лю Тяньи. Конструкции наконечников фурм ККУ ОАО «ДМЗ им. Петровского» на основе модульных технологий /В.С. Гришин, Лю Тяньи, В.А. Грядунов// Металл и литье Украины. 2007. № 5 С. 23-25.
7. Лю Тяньи. Компенсаторы кислородных фурм/А.Г.Величко, В.С.Гришин, Т. Лю, В.Г. рядунов//Металл и литье Украины. 2008. №5 С. 22-23.
8. Лю Тяньи. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Плавка /В.Б. Охотский, А.Г. Величко, Лю Тяньи, Л.С. Молчанов// Металлургическая и горнорудная промышленность. 2016, №5. С. 12-17.
9. Лю Тяньи. Enhancing the efficiency of water cooling of oxygen blowing lance tip /О.Г. Величко, Лю Тяньи, С.О. Абрамов, В.С. Гришин// Теорія і практика металургії. Дніпро, 2018. №1-2. С. 7-13.
10. Лю Тяньи. Повышение долговечности наконечников кислородных фурм /А.В. Шибко, А.Г. Величко, Лю Тяньи, В.А. Грядунов// Металл и литье Украины. 2008. № 5 С. 35-42.

Матеріали наукових конференцій:

11. Лю Тяньи. Исследование и организация охлаждения в наконечниках кислородно-конверторных фурм /А.Г. Величко, Лю Тяньи, Д.А. Прохоренко, А.З. Цыколия, С.А. Абрамов, В.С. Гришин// XII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» , Jun 4-7 2016, Varna, Bulgaria Proceedings Vol. 2. P. 61-63.
12. Лю Тяньи. Моделирование гидродинамических процессов при охлаждении наконечника кислородной фурмы /Лю Тяньи// XI International Conference «Strategy

of Quality in Industry and Education» , Jun 4-7 2015, Varna, Bulgaria Proceedings Vol. 1. P. 57-62.

13. Лю Тяньи. Повышение технологической эффективности продувки при изменении конструкции фурмы /Лю Джи Чанг, Лю Тяньи, А.Г. Величко// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» 28-30 березня Дніпро, НМетАУ. 2017. С. 138.

Патенти:

14. Патент на корисну модель №19464 України, МПК (2006) С 21С 5/48. Компенсатор фурми /О.Г. Величко, В.С. Гришин, О.П. Морозенко, Лю Тяньи, В.А. Грядунов, В.М. Попов// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № u 200607103; заявл. 26.06.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

15. Патент на корисну модель №20095 України, МПК (2006)С21 5/48. Багатосопловий наконечник конвертерної фурми. /О.Г. Величко, В.С. Гришин, О.П. Морозенко, Лю Тяньи, В.А. Грядунов, В.М. Попов// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № u 2006 07103; заявл. 6.06.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

16. Патент на корисну модель №113238 України, МПК С 21С 5/48 (2006.01). Фурмена головка з турбулізаторами охолоджувача /О.Г Величко., Лю Тяньи, Д.А. Прохоренко, А.З Ціколія., С.О. Абрамов, О.П. Морозенко, В.С. Гришин// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ НМетАУ № u 201605824; заявл. 30.05.2016; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2.

17. Патент на корисну модель №127163 України, МПК С 21С 5/48 (2006.01). Фурмена головка з елементами пасивного посилення турбулентності охолоджувача /О.Г Величко., Лю Тяньи, Д.А. Прохоренко, А.З Ціколія., С.О. Абрамов, О.П. Морозенко, В.С. Гришин// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ НМетАУ № u 201712608; заявл. 18.12.2017; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14.

Додаткові публікації:

18. Лю Тяньи. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Шихтовка /В.Б. Охотский, А.Г. Величко, Лю Тяньи, Л.С. Молчанов// Металлургическая и горнорудная промышленность. 2016, №5. С. 27-30.

19. Лю Тяньи. Управление инженерными данными и жизненным циклом наконечников кислородных фурм /А.Г. Величко, В.С. Гришин, С.В.Богданчикова, Лю Тяньи// Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. №7. С. 242-247.
20. Лю Тяньи. Использование патентной информации для прогнозирования развития конструкции наконечников фурм / В.С. Гришин, Т. Лю, С.В. Богданчикова, А.В. Кулаков// Металл и литье Украины. 2007. №5. С.26-27.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В Україні та промислово розвинених країна згідно з прогнозами розвитку металургійної промисловості конвертерний процес буде залишатися основним способом виробництва сталі, завдяки своїй високій продуктивності, гнучкості, широким технологічним можливостям. Це вимагає посилення уваги до вдосконалення технології конвертерної плавки, покращення її показників і підвищення якості металу, що виплавляється, при мінімальних витратах матеріальних і енергетичних ресурсів і зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище.

Вирішення цих завдань нерозривно пов'язане з оптимізацією параметрів дуттьових режимів і пристроїв, які є одним із основних і найбільш універсальних керуючих впливів на хід і техніко-економічні показники плавки. Одним із основних напрямків вирішення даної проблеми є вдосконалення існуючих і розробка нових конструкцій кисневих фурм і відповідних режимів продувки конвертерної ванни.

Вирішальною складовою процесу є продувка металеві ванни, киснем через верхню кисневу фурму, наконечник якої організує дуттьовий режим. Разом з тим, наконечник фурми, його конструкція параметри не задовольняють в повній мірі вимог виробників щодо стійкості, технологічних показників конвертерного процесу. Питання вдосконалення та оптимізації дуттьових режимів і пристроїв

кисневих конвертерів, в тому числі в шихтових і виробничих умовах, що змінюються, розглядались в ряді досліджень Каплун П.Р., Айзатулов Р.С., Величко О.Г., Сущенко А.В., Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М. та інших. Звернуто увагу, що при використанні фурм з центральним підведенням води або підведенням кисню може бути забезпечено ефективне охолодження найбільш тепло напружених ділянок мідної головки фурми – центральної частини її нижнього торця та передньої частини вихідних ділянок продувних сопел. Однак, в за соплових областях наконечника утворюються зони з вихровим низько швидкісним рухом води, що призводить до погіршення охолодження задньої частини вихідних ділянок сопел і місць їх з'єднання з нижньою торцевою частиною головки, руйнування при соплових зварних швів і зниження стійкості наконечника в цілому. Запропоновано ряд технічних рішень, спрямованих на ліквідацію за соплових застійних зон і поліпшення охолодження наконечників кисневих фурм з центральним підведенням води. Однак не всі розроблені варіанти конструкцій систем охолодження наконечників виявились досить ефективними. Відсутні відомості про результати експериментальних і аналітичних досліджень впливу вдосконалення конструкції наконечника кисневої фурми, способів їх виготовлення на охолодження теплотіємних поверхонь наконечників, ліквідацію «застійних» зон і розжар в біля соплових зонах на зовнішній поверхні вінця, встановлення нових ефектів щодо руху охолоджуючої води в наконечнику нової конструкції. Тому дослідження роботи наконечників кисневої фурми, впливу параметрів дугтьового режиму на показники конвертерної плавки, конструкції і технології виготовлення наконечників, що оптимізує технологічні операції, зборку, зменшує витрати на виробництво є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України відповідно до напрямів наукових досліджень кафедр металургії чавуну і сталі і кафедри технології машинобудування. Розглянуті в дисертаційній роботі актуальні проблеми і завдання відповідають пріоритетам Державної програми розвитку гірничо-металургійного комплексу України. Основу роботи

складають результати досліджень з науково-дослідних робіт «Розробка наукових основ виплавки та розливки сталей з підвищеним рівнем властивостей на підставі новітніх енерго- та ресурсозберігаючих процесів» (№ДР 0112U000643).

Мета роботи: встановлення закономірностей гідродинаміки охолодження наконечників киснево-конверторної фурми, вдосконалення їх конструкції і технології виготовлення, забезпечення розрахункового витікання кисневих струменів для ефективної киснево-конверторної плавки, підвищення стійкості наконечників.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення наступних завдань:

проаналізувати стан досліджень і розробки киснево-конвертерних фурм та підвищення ефективності конверторної плавки при їх експлуатації;

узагальнити та виконати аналіз конструкцій наконечників киснево-конвертерних фурм, їх виготовлення, стійкості та роботи в умовах киснево-конвертерних цехів;

запропонувати нові технічні рішення щодо організації охолодження наконечників киснево-конвертерних фурм та способів підвищення їх надійності і ефективності в роботі;

розробити математичну модель і виконати дослідження гідродинаміки охолодження наконечників кисневих фурм нових конструкцій;

створити нову конструкцію наконечника і кисневої фурми, що задовольняють критеріям підвищеної стійкості, надійності та забезпечення високих показників киснево-конверторної плавки;

розробити і експериментально обґрунтувати нові методи і технології виготовлення наконечників киснево-конвертерних фурм що пропонуються, та їх впливу на результати киснево-конверторної плавки;

досягти покращення технологічних показників киснево-конверторної плавки при використанні запропонованих і виготовлених наконечників кисневої фурми нової конструкції.

Об'єкт дослідження – технологія та ефективність киснево-конвертерної плавки.

Предмет дослідження - організація стабільного дуттьового режиму продувки при використанні наконечників киснево-конвертерної фурми нових конструкцій, технологія їх виготовлення і зборки, гідродинамічні закономірності охолодження наконечників киснево-конвертерних фурм, технологічні особливості конвертерної плавки.

Методи дослідження: вирішення задач, що поставлені в роботі, забезпечуються методами математичного моделювання, металографічними дослідженнями, теорією і закономірностями в конвертерному виробництві та

машинобудуванні, статистичним аналізом промислових експериментів з фіксацією основних параметрів киснево-конвертерної плавки. Усі експериментальні дослідження виконані з використанням повіреного і сертифікованого, відповідно до діючої нормативно-правової бази, обладнання та устаткування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше отримані результати щодо організації охолодження наконечників киснево-конвертерної фурми та запропонована нова конструкція наконечників на основі вінця і соплового блоку з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда. Встановлено, що висока швидкість охолоджуючих потоків і ефективність охолодження досягаються організацією зміни спрямування потоків безпосередньо в наконечнику з периферії на центральну частину і застосуванням направляючих турбулізаторів потоків у вигляді спіралі Архімеда на внутрішній поверхні вінця та компенсаторами температурних навантажень.
2. Вперше науково обґрунтована і експериментально підтверджена доцільність турбулізації охолоджуючих потоків в застійних зонах наконечників кисневої фурми. Це дозволяє забезпечити високу швидкість охолоджуючих потоків в районах застійних зон та їх зникнення, що в свою чергу виключає розжар сопел на зовнішній поверхні вінця і організує

витікання кисневих струменів в розрахунковому режимі протягом експлуатації наконечника.

3. Вперше розроблений і застосований модульний принцип виготовлення наконечників киснево-конвертерних фурм та реалізований комплексний підхід щодо організації і турбулізації охолоджуючих потоків, компенсації температурних навантажень, захисту зовнішньої поверхні вінця наконечника.

4. Вперше металографічними дослідженнями доведена можливість використання пайки при зборці нероз'ємних деталей наконечника. Металографічний аналіз структури швів пайки на кордоні сталь-латунь, латунь-мідь показав рівномірну структуру і фазовий склад, шов не мав ознак розслоєння, макротріщин, раковин, пор і мав міцне з'єднання.

5. Вперше стосовно зовнішньої поверхні вінця наконечника досліджені електроіскрове легування, підготовка поверхні і паро плазмове нанесення покриття.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Наконечники нової конструкції виготовлені за запропонованими і реалізованими технологіями для киснево-конвертерних фурм 60т і 160т конвертерів в Україні та конвертерів заводу «Chengde Steel» (КНР).

2. Суттєво покращена технологічність зборки, на 30-40% зменшені витрати на виробництво наконечників, знижено матеріалоемність і енергоемність виготовлення, підвищена надійність експлуатації.

3. Розроблені на основі теоретичних і практичних досліджень наконечники киснево-конвертерних фурм нових конструкцій використані для продувки киснем металевої ванни в 60т і 160т конвертерах заводів України. Експлуатація наконечників показала відсутність розжару сопел на зовнішній поверхні вінця, що забезпечувало стабілізацію дуттьового і шлакового режимів на всьому періоді експлуатації наконечників. Стійкість наконечників складала 450-600 плавов, що у 2-3 рази перевищувало

стійкість наконечників, що використовувалися в цеху до прийняття в експлуатацію наконечників нової конструкції.

4. В результаті застосування наконечників киснево-конвертерних фурм нових конструкцій на 160т конвертерах вихід рідкої сталі збільшився на 0,6%, що в першу чергу, пов'язано зі зменшенням оксидів заліза в шлаку. Суттєво зменшена чисельність плавок, що «передуті» на вміст вуглецю $<0,05\%$.
5. Практикою використання 6-ти соплових наконечників з центральним підводом води на заводі «Chengde Steel» (КНР) доведені покращені умови охолодження наконечника, досягнуті кращі результати по видаленню фосфору, швидше «запалювалася» плавка, значно зменшилося налипання шлаку на фурму. На плавках, що були продуті запропонованими і виготовленими наконечниками киснево-конвертерних фурм скоротилися витрати метало-шихти, тривалість продувки.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійної і колективної роботи автора, що відображено низкою публікацій результатів досліджень, виконаних зі співробітниками кафедр «Металургії сталі» і «Технології машинобудування» Національної металургійної академії України та співробітниками підприємств.

Особистий внесок здобувача полягає в: аналізі конструкцій сучасних наконечників киснево-конвертерних фурм, способів їх виготовлення, що використовуються в конвертерних цехах України і Китайської Народної Республіки, з обґрунтуванням нових технічних рішень щодо розробки конструкцій наконечників і технологій їх виготовлення [19,20], розробці наконечника з штампованим мідним вінцем і стальним сопловим блоком, що з'єднаний з направляючою тарілкою, телескопічного компенсатору термічних і механічних впливів, конструюванні наконечників на основі модульних технологій їх виготовлення, розробці конструкції наконечника з турбулізаторами охолодження у вигляді спіралі Архімеда, обґрунтуванні і розробці технології нанесення бар'єрного кластерного покриття на зовнішній мідній поверхні вінця наконечника [1,7,10,12,17], дослідженні охолодження наконечників кисневих фурм з порівнянням швидкостей

охолоджуючих потоків води на внутрішній поверхні вінця запропонованих конструкцій наконечника [9,11,12], розробці нових ресурсозберігаючих технологій виготовлення і зборки наконечників кисневих фурм, штампів та технологій штамповки мідного вінця та соплового блоку з направляючою тарілкою, застосуванні пайки для з'єднання складових наконечника [2,4,6], випробуванні наконечників кисневих фурм, що розроблені і виготовлені в умовах роботи 60т і 160т конвертерів в Україні, аналізі і оцінці ефективності роботи наконечників нової конструкції в промислових умовах [5], в тому числі наконечника з двухрядним розташуванням сопел і киснево-конвертерної фурми з центральним підводом охолоджуючої води з шести сопловим наконечником [3,13].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертації обговорені на наукових семінарах кафедр металургії сталі і технології машинобудування Національної металургійної академії України МОН України. Основні положення і результати роботи були розглянуті на міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 2017р.), на XI і XII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» (Varna, Bulgaria, 2015 і 2016).

Публікації. Загальна кількість публікацій за темою дисертації 18, в тому числі: 8 статей в спеціалізованих наукових виданнях, затверджених на момент публікації ДАК МОН України, 1 стаття в журналі, індексованому в міжнародній наукометричній базі Scopus; 2 статті в журналі, індексованому в міжнародній наукометричній базі Scopus; 3 публікації в матеріалах міжнародних наукових конференцій; 4 патенти України.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з титульної сторінки, анотації, змісту, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 100 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 153 сторінок тексту, в тому числі 87 рисунків і 15 таблиць.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях, що включено до міжнародних наукометричних баз:

1. Liu T. Technological features of applying cluster thermal barrier coatings on copper surfaces of the converter lance tips /Velychko O.G., Liu T., Abramov S.O., Marchuk I.V., Gryshin V.S.// Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii, m. Dnipro, 2020, No. 3, pp. 53-58. (Індексується в **Index Scopus**).
2. Лю Тяньи. Моделирование процесса штамповки венца и корпуса наконечников кислородных фурм /Лю Тяньи, Величко А.Г., Гришин В.С., Мельничук А.В.// «Системні технології» Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: НМетАУ, 2017. Випуск №5(112) С. 146-152. (Індексується в **Index Copernicus**).
3. Лю Тяньи. Эффективная технология при использовании новой кислородно-конвертерной фурмы /Лю Джичанг, Лю Тяньи, Величко А.Г.// «Системні технології» Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: НМетАУ, 2017. Випуск №3(110) С. 40-44. (Індексується в **Index Copernicus**).

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Лю Тяньи. Модульный принцип подготовки производства наконечников кислородных фурм /А.Г. Величко, В.С. Гришин, Лю Тяньи, В.А. Грядунов, В.Н. Попов// Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2006. № . С. 230-242.
5. Лю Тяньи. Опыт эксплуатации наконечников фурм с различным количеством сопел в условиях ККЦ ОАО ДМЗ им. Петровского /В.С. Гришин, В.Л. Грядунов, Лю Тяньи, В.И. Пищида// Металл и литье Украины, 2006. № 5. С. 6-8.
6. Лю Тяньи. Управление инженерными данными и жизненным циклом наконечников кислородных фурм /А.Г. Величко, В.С. Гришин, С.В.Богданчикова, Лю Тяньи// Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2006. №7. С. 242-247.
7. Лю Тяньи. Использование патентной информации для прогнозирования развития конструкции наконечников фурм /В.С. Гришин, Лю Тяньи, С.В. Богданчикова, А.В. Кулаков// Металл и литье Украины. 2007. С. 26-27.

8. Лю Тяньи. Конструкции наконечников фурм ККУ ОАО «ДМЗ им. Петровского» на основе модульных технологий /В.С. Гришин, Лю Тяньи, В.А. Грядунов// Металл и литье Украины. 2007. № 5 С. 23-25.
9. Лю Тяньи. Повышение долговечности наконечников кислородных фурм /А.В. Шибко, А.Г. Величко, Лю Тяньи, В.А. Грядунов// Металл и литье Украины. 2008. № 5 С. 35-42.
10. Лю Тяньи. Компенсаторы кислородных фурм /А.Г. Величко, В.С. Гришин, Т.И. Лю, В.Г. Грядунов// Металл и литье Украины. 2008. № 5 С. .
11. Лю Тяньи. Enhancing the efficiency of water cooling of oxygen blowing lance tip /О.Г. Величко, Лю Тяньи, С.О. Абрамов, В.С. Гришин// Теорія і практика металургії. Дніпро, 2018. №1-2. С. 7-13.

Матеріали наукових конференцій:

12. Лю Тяньи. Исследование и организация охлаждения в наконечниках кислородно-конверторных фурм /А.Г. Величко, Лю Тяньи, Д.А. Прохоренко, А.З. Цыколия, С.А. Абрамов, В.С. Гришин// XII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» , Jun 4-7 2016, Varna, Bulgaria Proceedings Vol. 2. P. 61-63.
13. Лю Тяньи. Моделирование гидродинамических процессов при охлаждении наконечника кислородной фурмы /Лю Тяньи// XI International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» , Jun 4-7 2015, Varna, Bulgaria Proceedings Vol. 1. P. 57-62.
14. Лю Тяньи. Повышение технологической эффективности продувки при изменении конструкции фурмы /Лю Джи Чанг, Лю Тяньи, А.Г. Величко// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» 28-30 березня Дніпро, НМетАУ. 2017. С. 138.

Патенти:

15. Патент на корисну модель №19464 України, МПК (2006) С 21С 5/48. Компенсатор фурми /О.Г. Величко, В.С. Гришин, О.П. Морозенко, Лю Тяньи, В.А.

Грядунов, В.М. Попов// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № у 200607103; заявл. 26.06.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

16. Патент на корисну модель №20095 України, МПК (2006)С21 5/48. Багатосопловий наконечник конвертерної фурми. /О.Г. Величко, В.С. Гришин, О.П. Морозенко, Лю Тяньи, В.А. Грядунов, В.М. Попов// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № у 2006 07103; заявл. 6.06.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

17. Патент на корисну модель №113238 України, МПК С 21С 5/48 (2006.01). Фурмена головка з турбулізаторами охолоджувача /О.Г Величко., Лю Тяньи, Д.А. Прохоренко, А.З Ціколія., С.О. Абрамов, О.П. Морозенко, В.С. Гришин// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ НМетАУ № у 201605824; заявл. 30.05.2016; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2.

18. Патент на корисну модель №127163 України, МПК С 21С 5/48 (2006.01). Фурмена головка з елементами пасивного посилення турбулентності охолоджувача /О.Г Величко., Лю Тяньи, Д.А. Прохоренко, А.З Ціколія., С.О. Абрамов, О.П. Морозенко, В.С. Гришин// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ НМетАУ № у 201712608; заявл. 18.12.2017; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14.

Додаткові публікації:

19. Лю Тяньи. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Шихтовка /В.Б. Охотский, А.Г. Величко, Лю Тяньи, Л.С. Молчанов// Metallургическая и горнорудная промышленность. 2016, №3. С. 27-30.

20. Лю Тяньи. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Плавка /В.Б. Охотский, А.Г. Величко, Лю Тяньи, Л.С. Молчанов// Metallургическая и горнорудная промышленность. 2016, №5. С. 12-15.

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИХ ФУРМ, СПОСОБИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ, РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПОКАЗНИКИ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ	27
1.1. Наконечники кисневих фурм конвертерного виробництва і їх робота	27
1.2. Стійкість наконечників, способи їх виготовлення та експлуатаційна надійність кисневих фурм	37
1.3. Вплив конструкції і технології виготовлення наконечників на їх експлуатаційну надійність	43
Висновки до першого розділу	47
РОЗДІЛ 2. НОВІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ І ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ	49
2.1. Запропонований телескопічний компенсатор термічних і механічних впливів на наконечник фурм	56
2.2. Конструювання наконечників кисневих фурм на основі модульних технологій	59
2.3. Розробка конструкції наконечника кисневої фурми з турбулізаторами охолоджувача	62
2.4. Нанесення кластерних термобар'єрних покриттів на зовнішні поверхні наконечників фурм	68
Висновки до другого розділу	76
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ, ЩО ЗАПРОПОНОВАНІ	78
3.1. Математичне моделювання охолодження наконечників кисневих фурм	78
3.2. Наконечник з направляючою тарілкою	82
3.3. Наконечник з направляючою тарілкою і кутовими розсікачами потоків	87

3.4. Наконечник з направляючою тарілкою і турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда на внутрішній поверхні вінця	89
3.5. Наконечник з центральним підведенням води	92
Висновки до третього розділу	95
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА НОВИХ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ І ЗБОРКИ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ	96
4.1. Розробка, моделювання технологічного процесу і виготовлення заготовок (вінця і сталевих соплового блоку) наконечника фурми	96
4.2. Розробка технології збирання нероз'ємних з'єднань деталей наконечників	103
4.3. Контроль герметичності	108
4.4. Дослідно-промислові випробування експериментальних наконечників з кластерним термобар'єрним покриттям	110
Висновки до четвертого розділу	112
РОЗДІЛ 5. ВИПРОБУВАННЯ І РОБОТА НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАВКИ ПРИ ПРОДУВЦІ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ В КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИХ АГРЕГАТАХ	113
5.1. Випробування наконечників нової (запропонованої) конструкції в умовах роботи 160т конвертерів	113
5.2. Випробування дослідних наконечників кисневих фурм нової конструкції в умовах Єнакіївського металургійного заводу	119
5.3. Наконечники кисневих фурм для 60 т конвертерів і досвід їх експлуатації в умовах киснево-конвертерного цеху металургійного заводу	125
5.3.1. Робота 4-х і 5-ти соплових наконечників фурм	126
5.3.2. Застосування наконечників з дворядним розташуванням сопел	131
5.4. Ефективна технологія при використанні 6-ти соплового наконечника в новій киснево-конвертерній фурмі	134
Висновки до п'ятого розділу	138

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України відповідно до напрямів наукових досліджень кафедр металургії сталі і технології машинобудування.

Мета і завдання дослідження.

встановлення закономірностей гідродинаміки охолодження наконечників киснево-конверторної фурми, вдосконалення їх конструкції і виготовлення, забезпечення розрахункового витікання кисневих струменів для ефективної киснево-конверторної плавки, підвищення стійкості наконечників.

Завдання, що необхідно вирішити:

- узагальнити та виконати аналіз конструкцій наконечників киснево-конвертерних фурм, їх виготовлення, стійкості та роботи в умовах киснево-конвертерних цехів;
- запропонувати нові технічні рішення щодо організації охолодження наконечників киснево-конвертерних фурм та способів підвищення їх надійності і ефективності в роботі;
- розробити математичну модель і виконати дослідження гідродинаміки охолодження наконечників кисневих фурм нових конструкцій;
- створити нову конструкцію наконечника і кисневої фурми, що задовольняють критеріям підвищеної стійкості, надійності та забезпечення високих показників киснево-конвертерної плавки;
- розробити і експериментально обґрунтувати нові методи і технології виготовлення наконечників киснево-конвертерних фурм що пропонуються, та їх впливу на результати киснево-конвертерної плавки;

- досягти покращення технологічних показників киснево-конвертерної плавки при використанні запропонованих і виготовлених наконечників кисневої фурми нової конструкції.

Об'єкт дослідження - технології і ефективність киснево-конвертерної плавки при організації стабільного дуттьового режиму продувки наконечниками киснево-конвертерної фурми нових конструкцій, їх виготовлення і зборки.

Предмет дослідження - гідродинамічні закономірності охолодження наконечників киснево-конвертерних фурм, конструкції наконечників, способи їх виготовлення та зборки, технологічні особливості конвертерної плавки.

Методи досліджень: вирішення задач, що поставлені в роботі, забезпечуються методами математичного моделювання, металографічними дослідженнями, теорією і закономірностями в конвертерному виробництві та машинобудуванні, статистичним аналізом промислових експериментів з фіксацією основних параметрів киснево-конвертерної плавки.

Наукова новизна отриманих результатів:

6. Розроблені нові конструкції наконечників киснево-конвертерних фурм на основі вінця і соплового блоку з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда на внутрішній поверхні вінця та компенсаторами температурних навантажень.

7. Вперше отримані результати щодо організації охолодження наконечників киснево-конвертерної фурми в залежності від їх конструкції. Встановлено, що висока швидкість охолоджуючих потоків і ефективність охолодження досягаються організацією зміни спрямування потоків безпосередньо в наконечнику з периферії на центральну частину і застосуванням направляючих турбулізаторів потоків у вигляді спіралі Архімеда.

8. Вперше науково обґрунтована і експериментально підтверджена доцільність турбулізації охолоджуючих потоків в застійних зонах наконечників кисневої фурми. Це дозволяє забезпечити високу швидкість охолоджуючих потоків в районах застійних зон та їх зникнення, що в свою

чергу виключає розгар сопел на зовнішній поверхні вінця і організує витікання кисневих струменів в розрахунковому режимі протягом експлуатації наконечника.

9. Вперше розроблений і застосований модульний принцип виготовлення наконечників киснево-конвертерних фурм та реалізований комплексний підхід щодо організації і турбулізації охолоджуючих потоків, компенсації температурних навантажень, захисту зовнішньої поверхні вінця наконечника.

10. Вперше металографічними дослідженнями доведена можливість використання пайки при зборці нераз'ємних деталей наконечника. Металографічний аналіз структури пайочних швів на кордоні сталь-латунь, латунь-мідь показав рівномірну структуру і фазовий склад, шов не мав ознак розслоєння, макротріщин, раковін, пор і мав міцне з'єднання.

11. Вперше стосовно зовнішньої поверхні вінця наконечника досліджені електроіскрове легування, підготовка поверхні і паро плазмове нанесення покриття.

Практичне значення отриманих результатів

6. Наконечники нової конструкції виготовлені за запропонованими і реалізованими технологіями для киснево-конвертерних фурм 60т і 160т конвертерів в Україні та конвертерів заводу «Chengde Steel» (КНР).

7. Суттєво покращена технологічність зборки, на 30-40% зменшені витрати на виробництво наконечників, знижено матеріалоємність і енергоємність виготовлення, підвищена надійність експлуатації.

8. Розроблені на основі теоретичних і практичних досліджень наконечники киснево-конвертерних фурм нових конструкцій використані для продувки киснем металевої ванни в 60т і 160т конвертерах заводів України. Експлуатація наконечників показала відсутність розгару сопел на зовнішній поверхні вінця, що забезпечувало стабілізацію дуттьового і шлакового режимів на всьому періоді експлуатації наконечників. Стійкість

наконечників складала 450-600 плавов, що у 2-3 рази перевищувало стійкість наконечників, що використовувалися в цеху до прийняття в експлуатацію наконечників нової конструкції.

9. В результаті застосування наконечників киснево-конвертерних фурм нових конструкцій на 160т конвертерах вихід рідкої сталі збільшився на 0,6%, що в першу чергу, пов'язано зі зменшенням оксидів заліза в шлаці. Суттєво зменшена чисельність плавов, що «передуті» на вміст вуглецю <0,05%.

10. Практикою використання 6-ти соплових наконечників з центральним підводом води на заводі «Chengde Steel» (КНР) доведені покращені умови охолодження наконечника, досягнуті кращі результати по видаленню фосфору, швидше «запалювалася» плавка, значно зменшилося налипання шлаку на фурму.

11. На плавках, що були продуті запропонованими і виготовленими наконечниками киснево-конвертерних фурм скоротилися витрати метало-шихти, тривалість продувки.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійної і колективної роботи автора, що відображено низкою публікацій результатів досліджень, виконаних зі співробітниками кафедр «Металургії сталі» і «Технології машинобудування» Національної металургійної академії України та співробітниками підприємств.

Особистий внесок здобувача.

Полягає в: аналізі конструкцій сучасних наконечників киснево-конвертерних фурм, способів їх виготовлення, що використовуються в конвертерних цехах України і Китайської Народної Республіки, з обґрунтуванням нових технічних рішень щодо розробки конструкцій наконечників і технологій їх виготовлення, розробці наконечника з штампованим мідним вінцем і стальним сопловим блоком, що з'єднаний з направляючою тарілкою, телескопічного компенсатору термічних і механічних впливів, конструюванні наконечників на основі модульних технологій їх виготовлення, розробці конструкції наконечника з турбулізаторами охолодження у

вигляді спіралі Архімеда, обґрунтуванні і розробці технології нанесення бар'єрного кластерного покриття на зовнішній мідній поверхні вінця наконечника, дослідженні охолодження наконечників кисневих фурм з порівнянням швидкостей охолоджуючих потоків води на внутрішній поверхні вінця запропонованих конструкцій наконечника, розробці нових ресурсозберігаючих технологій виготовлення і зборки наконечників кисневих фурм, штампів та технологій штамповки мідного вінця та соплового блоку з направляючою тарілкою, застосуванні пайки для з'єднання складових наконечника, випробуванні наконечників кисневих фурм, що розроблені і виготовлені в умовах роботи 60т і 160т конвертерів в Україні, аналізі і оцінці ефективності роботи наконечників нової конструкції в промислових умовах, в тому числі наконечника з двухрядним розташуванням сопел і киснево-конвертерної фурми з центральним підводом охолоджуючої води з шести сопловим наконечником.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертації обговорені на наукових семінарах кафедр металургії сталі і технології машинобудування Національної металургійної академії України МОН України. Основні положення і результати роботи були розглянуті на міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 2017р.), на XI і XII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education» (Varna, Bulgaria, 2015 і 2016).

Обсяг і структура дисертації

Дисертаційна робота викладена на 153 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 153 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 15 таблицями, 87 рисунками. Список використаних джерел містить 100 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИХ ФУРМ, СПОСОБИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ, РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПОКАЗНИКИ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

1.1. Наконечники кисневих фурм конвертерного виробництва і їх робота

На зорі промислового освоєння киснево-конвертерного процесу (початок 50-х років минулого століття) наконечник кисневої верхньої продувної фурми представляв собою конструкцією з центральним кисневим соплом. Сопло виготовляли циліндричним, пізніше (для збільшення швидкості витрачального кисню) у вигляді сопла Лавалю.

Сопло Лавалю дозволяло формувати кисневий потік з високою кінетичною енергією, що забезпечувало глибоке проникнення кисневого струменю у ванну. При цьому площа ванни, що продувалась, була невеликою і продування характеризувалося незадовільним шлакоутворенням, високим виносом металу з конвертерного агрегата та низьким виходом рідкої сталі [1,6].

Фурма, як і наконечник, охолоджувалися водою. Навіть при відносно невеликих витратах води забезпечували ефективне охолодження наконечника і його високу стійкість.

Справжнім проривом став перехід на продування через три сопла, а пізніше через 4-6 сопел.

Типова конструкція багатосоплових вітчизняних і зарубіжних киснево-конвертерних фурм передбачає подання кисню по центральній трубі (3), а підведення (1) і відведення (7) охолоджувальної води по каналах, утворених, відповідно, внутрішньою (8) і проміжною (9) трубами, проміжною (9) і зовнішньою (10) трубами (рис. 1.1).

Витрату кисню на рафінування конвертерної ванни пов'язують з садкою конвертера. При усередненій витраті кисню на тону сталі $\sim 60\text{м}^3/\text{т}$ витрата кисню на плавку для 100т, 150т, 200т, 250т, 300т і 350т конвертерів відповідно складе

6000м³, 9000м³, 12000м³, 15000м³, 18000м³, 21000м³. Саме цю кількість кисню необхідно подати в металеву ванну конвертера в течії 14-18хв. (тривалість продування).

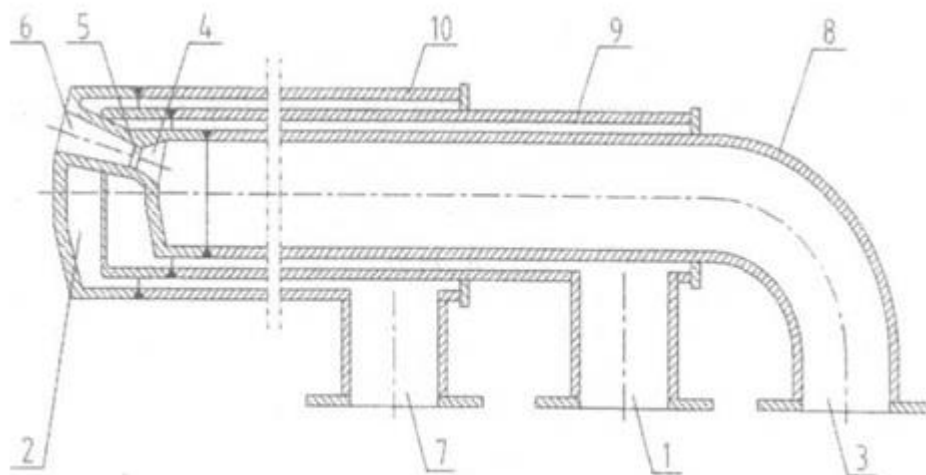


Рис. 1.1. Типова конструкція кисневої фурми з центральним підведенням кисню [7]:
1 - підведення води; 2 - мідний наконечник фурми; 3 - підведення кисню; 4 - ділянка сопла Лаваля, що звужується; 5 - ділянка сопла Лаваля зі звуковою швидкістю кисню; 6 - ділянка сопла Лаваля, що розширюється; 7 - відведення води; 8 - киснева (внутрішня) труба; 9 - проміжна труба; 10 - зовнішня труба

Розмір фурми (її довжину і діаметр), конструкцію наконечника визначають [1-7]:

- садка конвертера;
- витрата кисню на рафінування;
- інтенсивність продування;
- число сопел;
- кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми;
- система охолодження фурми і наконечника;
- спеціальні технологічні вимоги.

У сьогоднішній практиці продування конвертерної ванни інтенсивність

продування (подачі кисню) складає 2,8-3,5 м³/т-хв. Тоді для інтенсивності продування, найчастіше вживаної $\sim 3\text{ м}^3/\text{т-хв}$ для конвертерів садкою 100т, 150т, 200т, 250т, 300т і 350т хвилинна витрата кисню, який забезпечує киснева фурма і наконечник, складе відповідно до (у м³/хв.) 300, 450, 600, 750, 900 і 1050.

Подачу кисню з такими витратами та інтенсивністю забезпечують заданим діаметром кисневої труби у фурмі. При тому, що тиск кисню у кисневопостачальній трубі складає 0,7-0,9МПа.

Тому зі збільшенням садки конвертера і відповідним збільшенням хвилинної витрати вдуваного кисню у фурмах використовують труби більшого діаметру, як кисневі, так і для підведення та відведення охолоджувальної води (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Труби, які використовуються у кисневих фурмах і число сопел в наконечниках для конвертерів різної садки в конвертерних цехах КНР [7]

№ з/п	Садка конвертера	Труби, які використовуються у кисневій фурмі	Число сопел в наконечнику
1	80-100	0219x10, 0180x6, 0133x6	4,5
2	100-120	0245x10, 0203x6, 0159x6	4,5
3	120-150	0273x12, 0219x6, 0168x6	4,5
4	150-200	0299x12, 0245x7, 0194x6	4,5
5	200-220	0325x12, 0273x8, 0203x6	5, 6
6	200-250	0351x12, 0299x8, 0219x10	5,6
7	250-350	0402x12, 0351x8, 0245x10	5,6

У таблиці 1.2 в т.ч. із використанням даних [6] наведена інформація про кисневі фурми і наконечники, які використовуються у конвертерних цехах України.

При ідентичній 160т садці конвертерів в конвертерних цехах КНР застосовують кисневі фурми, які збираються із труб більшого діаметра, що забезпечує підведення більшої кількості води на охолодження фурми і її наконечника [7].

Досить повне узагальнення стосовно конструкцій наконечників і власне кисневих фурм, їх стійкості і впливу на технологічні і техніко-економічні показники

конвертерної і мартенівської плавки виконано авторами [7-21].

Важливим параметром наконечника кисневої фурми є число сопел. Мінімальна кількість сопел в типовій кисневій фурмі з центральним підведенням кисню 3, максимальна 6.

Таблиця 1.2

Параметри наконечників кисневих фурм в конвертерних цехах України

№ з/п	Завод	Місткість конвертера, т	Витрата кисню, м ³ /хв	Діаметр зовнішньої труби мм	Кількість сопел шт.	Кут нахилу сопел град.	Витрата кисню на одне сопло •5 м /хв.	Тиск кисню МПа	Тиск охолоджуючої води МПа	Витрата води м ³ /го дина
1	МК "Азов - сталь"	350	800-1200	426	5,6					
2	ДМК	250	800-	426	5,6	17	133-210			
3	Криворізь-сталь	160	380-400	219x8 168x5 140x5	4,5	18-20	76-100	1,6	1,2	120
4	ММК Ілліча	160	380-420	219 219x8 159x6 114x8	5	20	74-84	1,5	1,2	120
5	ЕМЗ	160	380-390	219x8 168x5 140x5	5	20	76-78			80-95
6	ДМЗ	67	180-200	219	4,5	12,16	36-50			

Для розосередження вдуваного кисню по поверхні та в об'ємі ванни сопла нахилиють під певним кутом до вертикальної осі фурми. Як правило, зі збільшенням числа сопел кут їх нахилу до вертикалі росте. Деяке узагальнення наведене авторами [6] у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Характерне число сопел в наконечнику і кут їх нахилу до вертикальної осі фурми

Число сопел	3	4	5	6
Кут нахилу до вертикальної осі фурми	8-12	10-15	12-16	14-18

Число сопел у наконечнику фурми задає хвилинну витрату кисню на одне сопло (q_{o2}) і "продукта" ванни. Зі збільшенням садки конвертера, глибини і розмірів металевої ванни хвилинна витрата кисню на одне сопло також збільшується.

Для конвертерів садкою 100-150т хвилинна витрата кисню складає $50-70\text{м}^3/\text{хв.}$ на одне сопло, для конвертерів садкою 250-350т величина q_{o2} досягає $110-150\text{м}^3/\text{хв.}$

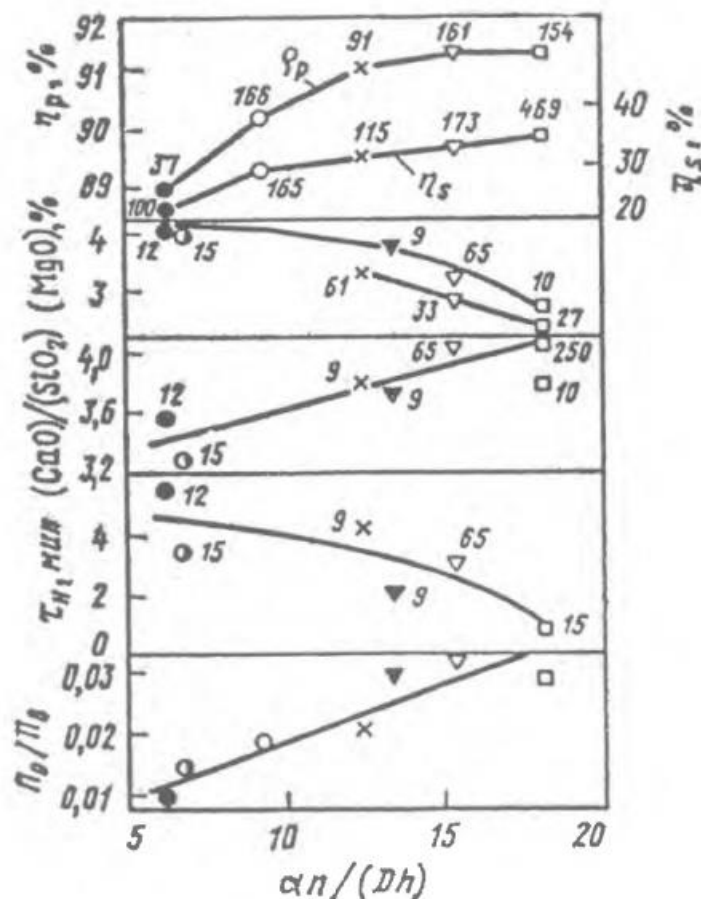


Рис. 1.2. Залежність показників конвертерної плавки від показників розосередження дугтя $\alpha n/(Dh)$ при використанні фурм різної конструкції [20]: η_s і η_p - ступінь десульфурації і дефосфорації; τ_n - тривалість періоду наведення шлаку; P_o/P - відношення площі "гарячої плями" до площі дзеркала спокійно] ванни (P_o - частина площі дзеркала, обмежена окружністю, що проходить через точки зустрічі осей кисневих струменів із дзеркалом ванни при висоті фурми $H_f = 1,5\text{м}$); цифри біля крапок - кількість плавок

Інтенсивність продування, число сопел, кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми відносять до технологічних характеристик наконечника кисневої фурми. Так збільшення інтенсивності продування прискорює окислення вуглецю конвертерної ванни, збільшення числа сопел в наконечнику забезпечує "м'якше" продування, покращує шлакоутворення і створює умови для кращого видалення сірки і фосфору в ході продування, збільшення кута нахилу сопел до вертикалі фурми розосереджує дуття, збільшує поверхню проникнення кисневих струменів, що також покращує шлакоутворення [1-20].

У роботі [20] оцінку впливання числа сопел n і кута їх нахилу до вертикальної осі фурми α запропоновано проводити із використанням показника розосередження дуття :

$$\frac{\alpha \cdot n}{D/h} \quad (1.1)$$

де D та h – діаметр і глибина конвертерної ванни, відповідно.

Залежність показників конвертерної плавки від величини $\alpha \cdot n/D/h$ для 160т конвертерів при використанні наконечників різної конструкції наведена на рис. 1.2.

Як відмічають автори [20] зі збільшенням ступеню розосередження дуття скорочується тривалість наведення шлаку, підвищується його основність, ростуть показники дефосфорації і десульфурзації металу і знижується знос футерування. Поліпшення шлакоутворення при значному збільшенні діаметра конвертерів після їх реконструкції було досягнуте зі збільшенням кута нахилу сопел та їх кількості і одночасним зменшенням відношення D/h шляхом потовщення футерування.

До важливих технологічних параметрів продування технологи відносять положення кисневої фурми над рівнем металевої ванни h_f [1-7].

Змінюючи положення фурми над рівнем ванни регулюють швидкість зневугледцювання і режим шлакоутворення.

Автори [5] наводять рівняння, що враховує вплив вмісту вуглецю у ванні [C], витрати Q кисню ($\text{м}^3/\text{хв}$) і положення фурми над рівнем металу h_f на кількість кисню $V_{02,Fe}$, що витрачається на окислення заліза:

$$\lg V_{02,Fe} = a_1 \cdot h^2 + a_3 / Q^2 + a_2 + a_3 \lg [C], \quad (1.2)$$

де a_1 , a_2 і a_3 - постійні коефіцієнти.

Проф. Охотський В. Б., як і низка інших авторів, зв'язують мінімальний рівень кисневої фурми над ванною з висотою виплесків металу під час продування [4]. Згідно [22]:

$$h_f \geq [(\pi^2 \beta v^2 h C D^2 \cos^4 \alpha)^{1/3} - 1], /L \quad (1.3)$$

де $\beta v = 1$; CD - коефіцієнт опору; α - кут нахилу сопла до вертикалі;
L - глибина реакційної зони.

Продувочні процеси в конвертері, зокрема дут'єві параметри, розташування наконечника кисневої фурми над поверхнею металевої ванни, шихтовка плавки узагальнені за участю автора в роботах [23,24].

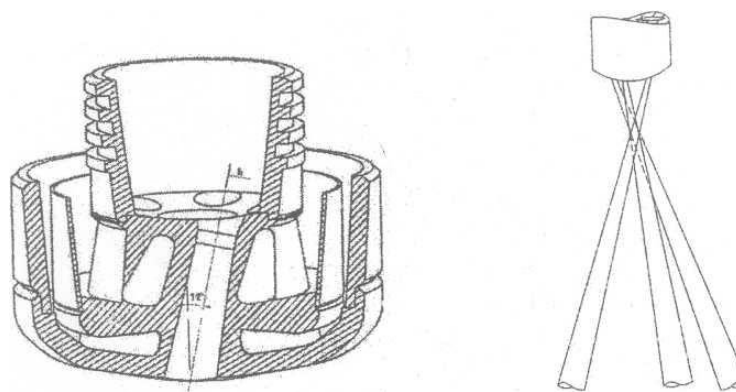


Рис. 1.3. Наконечник кисневої фурми з "вихровим" розташуванням сопел і відповідним "вихровим" закручуванням кисневих струменів

У наконечнику з центральним підведенням кисню нерідко стикаються з проблемою розміщення входних ділянок сопел в кисневому штуцері. Обмежений діаметр кисневої труби і штуцера не дозволяє розмістити по колу входні ділянки сопел (наприклад, 5 сопел). В цьому випадку входну ділянку сопла укорочують, входний діаметр сопла зменшують до можливого розміщення по колу усіх сопел. Останнє призводить до роботи сопла в нерозрахунковому режимі і нерозрахунковому витіканню кисневих струменів.

У роботах [6,9] описано наконечник кисневої фурми з "вихровим" розташуванням сопел і відповідним "вихровим" закручуванням кисневих струменів (рис. 1.3).

У конвертерних цехах Китайської Народної республіки застосовують конусні фурми. Їхня конструкція зменшує зашлакованість фурми [7].

Багаторежимна киснева фурма з газодинамічними модулями, (рис. 1.4) які організовують пульсації кисневих струменів. Встановлено, що при відповідному підборі амплітудно-частотних характеристик дуття можна впливати на процеси знеуглецювання, наведення шлаку та інші [9,25].

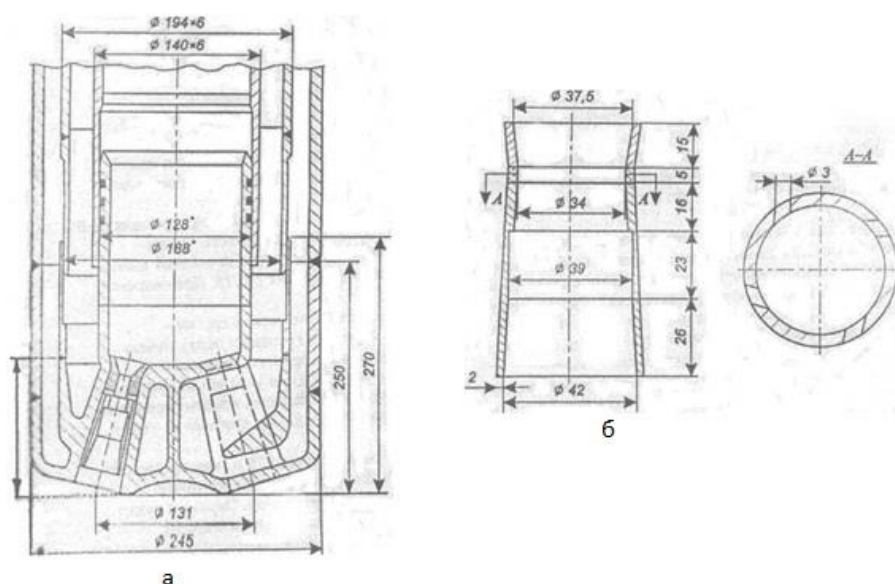


Рис. 1.4. Наконечник кисневої фурми з газодинамічними модулями (а) і конструкція сопла, призначеного для їх встановлення (б)

У кисневих фурмах з центральним підведенням кисню можна розмістити обмежену кількість сопел - максимум 5. У п'ятисоплового наконечника канал для проходження охолоджувальної води звужений, що погіршує охолодження центральної частини наконечника. Крім того, нерідко жертвують геометрією вхідної ділянки сопла, зменшуючи діаметр вхідних ділянок сопел для їх розміщення по колу.

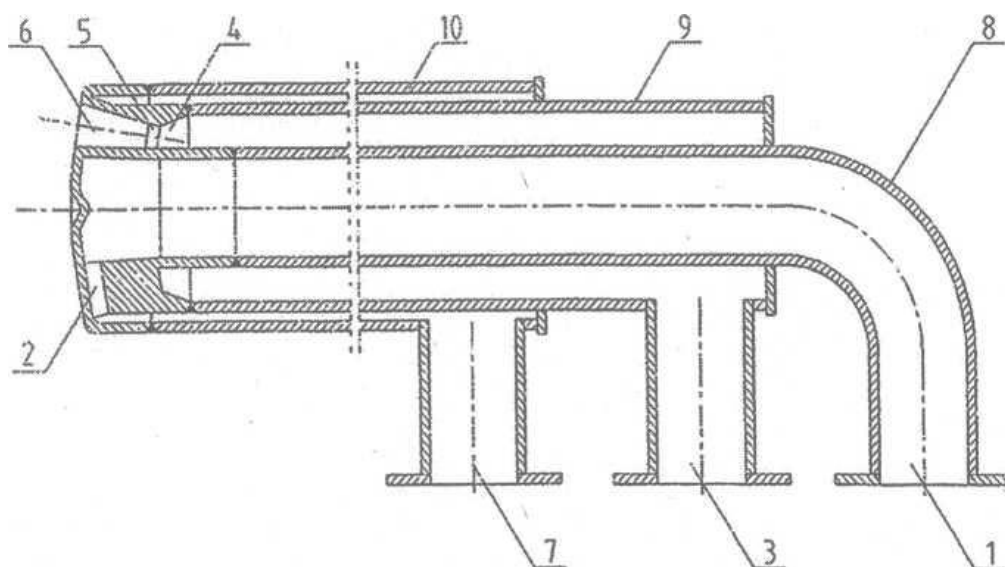


Рис. 1.5. Конструкція кисневої фурми з центральним водяним охолодженням:
1 - підведення води; 2 - відведення води; 3 - підведення кисню; 4 - ділянка сопла Лавалю, що звужується; 5 - критичний діаметр сопла Лавалю; 6 - ділянка сопла Лавалю, що розширюється; 7 - відведення води; 8 - внутрішня труба; 9 - проміжна труба; 10 - зовнішня труба

Для конвертерів великої місткості (250-400т) як показує практика їх роботи частотність сопел у наконечнику фурми 6. Відомі випадки, коли число сопел в наконечнику і більше 6. Розмістити таку кількість сопел у наконечнику з центральним підведенням кисню не можливо. Тому киснево-конвертерні фурми для великих ковертерів іншої конструкції - підведення води організовують по центральній трубі, а кисню по кільцю між внутрішньою і проміжними трубами.

Принципова конструкція такої фурми представлена на рис. 1.5 [7].

На рис. 1.6 представлена конструкція наконечника кисневої фурми з дворядним розташуванням сопел. Особливість конструкції не лише в розташуванні сопел малого діаметра по периферії наконечника, але й організація подання кисню по окремому (другому) тракту [7].

Таким чином, конструкція кисневої фурми припускає два тракту для подання кисню - центральний, кисень подається на основні продувальні сопла і кільцевий, де кисень подається на сопла малого діаметра. Киснева фурма включає чотири труби, що формують центральний канал і три кільцеві канали.

Конструкція такої фурми припускає широкі можливості для регулювання режиму дуття, в т.ч. за рахунок зміни в ході продування співвідношення кисню, що подається на основні і додаткові сопла.

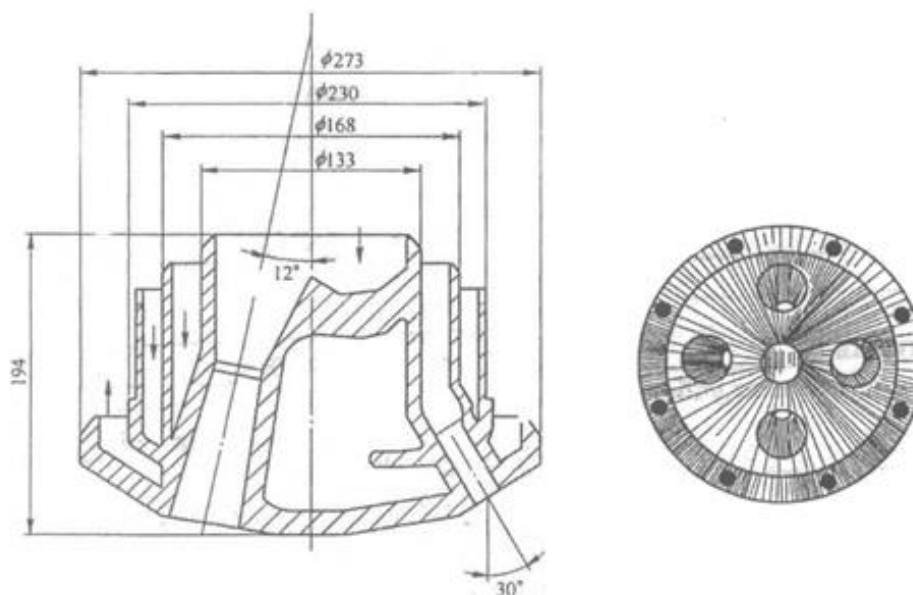


Рис. 1.6. Конструкція наконечника кисневої фурми з дворядним розташуванням сопел і підведенням кисню по двох трактах

Інший тип кисневої фурми (рис. 1.7) організовує подання кисню на основні і додаткові сопла через центральний канал підведення кисню [26-29].

Обидва типи кисневих фурм забезпечують повніше допалювання монооксиду

вуглецю в порожнині конвертера і покращують теплову роботу агрегата. Покращуються також умови шлакоутворення.

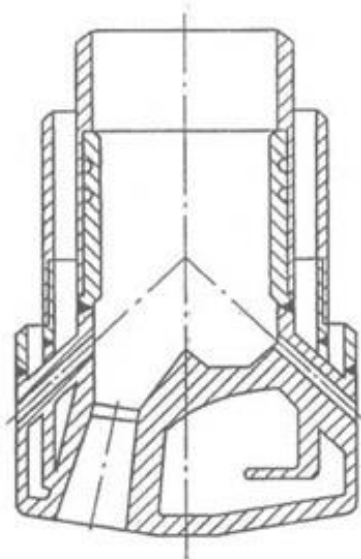


Рис. 1.7. Конструкція наконечника кисневої фурми з двоярядним розташуванням сопел і підведенням кисню через центральний канал

Організоване подання кисню через сопла другого ярусу дозволяло поліпшити теплову роботу (160т і 250т) сталеплавильного агрегата за рахунок допалювання монооксиду вуглецю в порожнині конвертера [30-39]. Покращувалися і низка інших технологічних і техніко-економічних показників конвертерної плавки, зокрема зменшувалося винесення металу з конвертера, покращувалося шлакоутворення.

1.2. Стійкість наконечників, способи їх виготовлення та експлуатаційна надійність кисневих фурм

Конструкція наконечника визначає не лише технологічні і техніко-економічні результати конвертерної плавки, але і його експлуатаційні характеристики і, в першу чергу, стійкість. Недостатнє охолодження призводить до прогарів на зовнішній поверхні вінця наконечника, утворенню застійних зон і розпалу навколосоплових ділянок. Застарілі та неефективні системи компенсації термічної напруги можуть бути причиною тріщиноутворення передусім у зварювальних швах. В усіх випадках слід зменшувати кількість зварювання швів і, особливо, на

зовнішній поверхні кисневої фурми і наконечника. У роботах [37-48] наводяться відомості про причини виходу кисневої фурми з експлуатації.

Типовий розпал вихідних ділянок сопел в наконечнику кисневої фурми наведено на рис. 1.8. Причиною такого розпалу автори [40-51] називають недостатнє охолодження навколосоплових зон на внутрішній тепловідвідній поверхні вінця і утворення «застійних» зон.

Стійкість наконечників кисневих фурм однозначно пов'язана із способами їх виготовлення і збирання.

Тому розвиток конструкцій наконечників супроводжувався вдосконаленням способів їх виготовлення і збирання. Широке поширення, в т.ч і в Україні і Китаї отримала технологія виготовлення суцільнолитих наконечників [7,52-56]. Литий мідний наконечник має грубозернисту і пухку структуру, підвищений вміст кисню, що знижує тепловідведення від зовнішньої поверхні наконечника до внутрішньої тепловідвідної. Виразно зафіксовані горизонтальні і вертикальні тріщини в грубозернистій структурі.

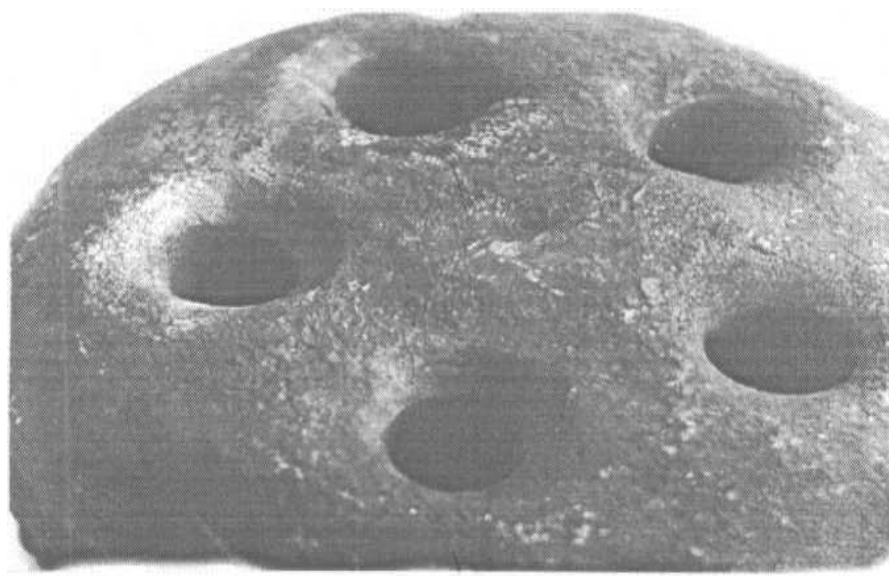


Рис. 1.8. Типовий розпал вихідних ділянок сопел на зовнішній поверхні наконечника кисневої фурми після виведення її з експлуатації

Стійкість таких наконечників невисока і не перевищує 100 плавок.

У усіх випадках під час продування висока температура збільшує зерно міді, що є характерною її особливістю. Після закінчення продування наконечник охолоджується, а зерно структури міді зменшується. В результаті багаторазових повторень між зернами міді з'являються тріщини. Окрім цього при високих температурах мідь інтенсивно взаємодіє з агресивним середовищем конвертера, що погіршує її теплопровідність. У приповерхневому шарі можуть утворюватися горизонтальні тріщини, які перешкоджають відведенню тепла з поверхні. Цей шар міді може оплаватися і виникає ерозійний знос. В той же час, ливарний метод формоутворення дозволяє отримувати наконечники із складною фасонною формою із розвиненою системою внутрішніх багатоканальних порожнин. Останніми роками [55-57] розроблені і застосовані нові технології лиття міді, які дозволяють отримати якісні відливання, в т.ч складної форми.

Зокрема - це лиття в сухі піщані форми, отримані методом ХТС (холоднотверділих сумішей), по моделях, що виплавляються, із заповненням ливарних форм розплавом гравітаційних заливок (ГЗ), з подальшою кристалізацією під атмосферним тиском з модифікатором УДП (ультрадисперсні порошки), або газовим тиском 0,45-0,5МПа без модифікатора, вичавлюванням розплаву з кристалізацією під механічним або газовим тиском (спосіб ЛВКД).

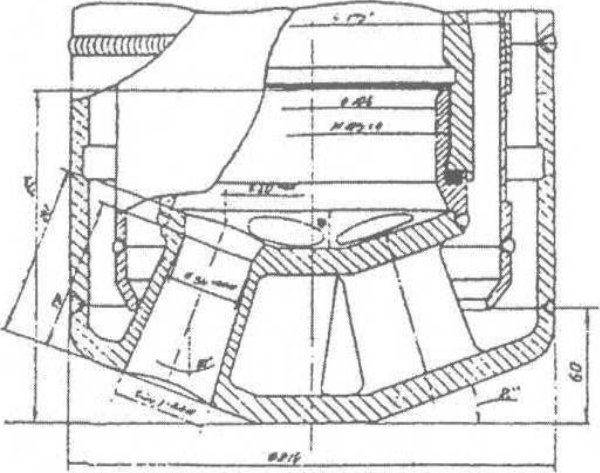
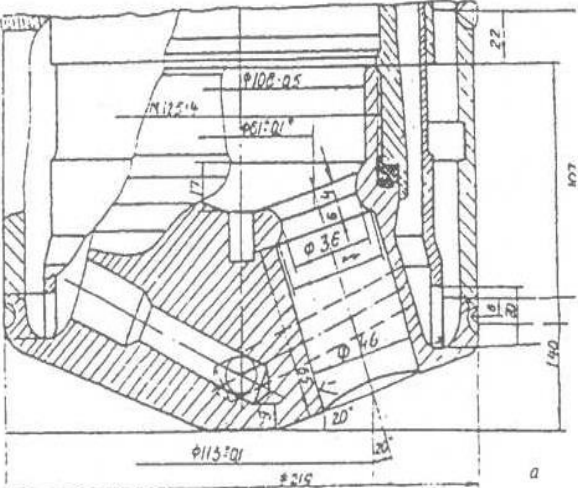
Випробування литих наконечників, виготовлених за новими технологіями лиття, показали, що кращі результати дає спосіб ЛВКД (лиття вичавлюванням з кристалізацією під тиском) з кристалізацією під газовим тиском - середня гарантована стійкість таких наконечників не менше 100 плавок.

У таблиці 1.4 узагальнені способи виготовлення наконечників фурм і наведені приклади їх конструкцій. Практично одночасно з виробництвом литих наконечників стали застосовувати технології механічної обробки цілісних мідних заготовок [58-61]. Стійкість цільноточених заготовок в 2 - 3 рази вища від литих. Проте великі матеріальні витрати, трудомісткість, ускладнення з отриманням оптимальної геометрії внутрішніх каналів для охолодження обмежували застосування цієї технології.

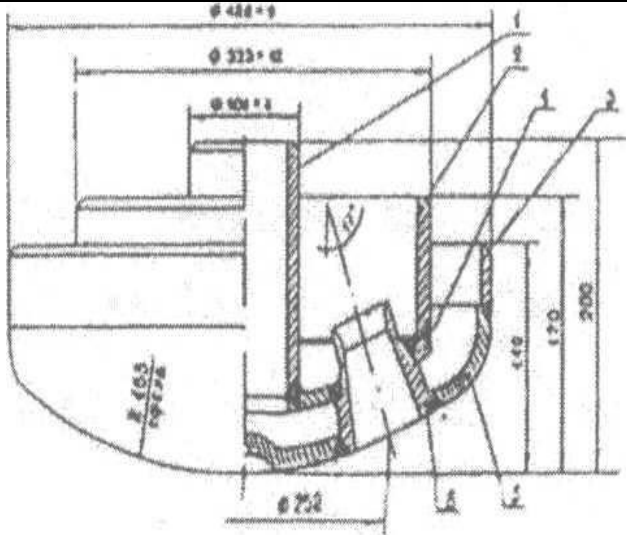
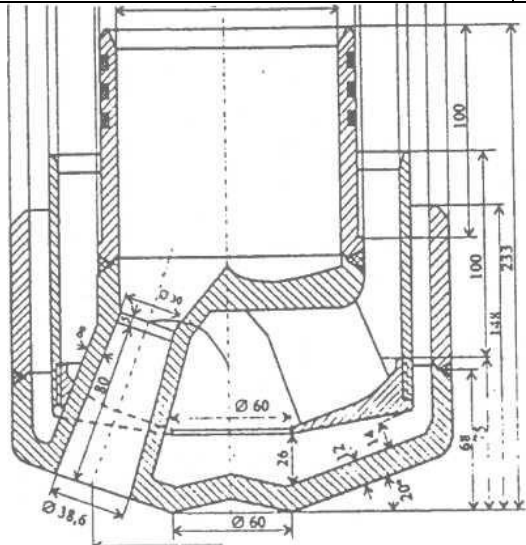
Нині відомими розробниками цільноточених наконечників [59] запропоновані нові конструкції зі зміненою системою охолодження соплового блоку, що привело до значного збільшення середньої стійкості наконечників до 180 плавов. Для великовантажних конвертерів застосовують зварювальний метод виготовлення наконечників. Вінець наконечника штамнують з мідного листа, сопла виточують з прутка, верхню тарілку також штамнують з міді або її сплавів [61-63].

Таблиця 1.4

Способи виготовлення наконечників кисневих фурм

№ з/п	Способи виготовлення наконечника	Конструкція наконечника	Джерела інформації
1	Суцільнолиті Метод формоутворення вінця наконечника застосовується з 60-х років ХХ століття. Можливе виготовлення наконечників різної конструкції з кількістю сопел від 3 до 6 плюс допоміжні. Стійкість: до 100 плавов. Недоліки: Пухка структура міді, підвищений вміст кисню, підкоркові пухирі, велике зерно структури, компенсатор деформацій розташований у верхній частині фурми (металоруков, тарілчастий або сальниковий <u>компенсатор</u>)		[55-57]
2	Суцільноточені Перед механічною обробкою заготовка піддається гарячому куванню. Кількість сопел : 4, 5, 6, 8, 9. Стійкість: 90-100 плавов 80-120 плавов; 90-188 плавов Недоліки: Гірша організація охолодження; Виготовлення трудомістке, матеріаломістке: на 40 % потрібно більше міді; Компенсатор деформацій розташований у верхній частині фурми (металорукав, тарілчастий або сальниковий).		[58-60]

Продовження табл. 1.4

3	Зварювальні Методи формоутворення вінця - штампування з листа; сопла отримують точінням з прутка. Потім з'єднання вінця з соплами за допомогою зварювання. Кількість сопел : 3, 4, 5, 6. Стійкість: 40-50 плавков; 60-80 плавков, до 218 плавков. Недоліки: прогар болової частини відбувається в зоні зварювання швів сопел. Компенсатор деформацій розташований у верхній частині фурми (металорукав тарілчастий або сальниковий компенсатор).		[61-62]
4	Штамповані (об'ємноштамповані) Метод формоутворення мідного вінця - об'ємне штампування. Кількість сопел : 3, 4, 5, 6. Дрібнозерниста структура, підвищена механічна міцність, поліпшена теплопровідність. Стійкість більше 450 плавков. Компенсатор - у вигляді гумових кілець, знаходиться в самому наконечнику, тобто в зоні максимальної термічної дії.		

Потім складові частини наконечника зварюють. Із-за поривів в місцях зварювання зварні наконечники мають невисоку стійкість (max~200 плавков). Споживачі наконечників кисневих фурм все частіше відмовляються від використання суцільнолитих, зварювальних наконечників, віддаючи перевагу штампованим [7,64-67].

Ці та інші технологічні особливості виготовлення дозволили значно підвищити стійкість наконечників і їх експлуатаційну надійність. Середня стійкість таких наконечників перевищила 450 плавков.

Подальше підвищення стійкості таких наконечників можливе за рахунок нанесення термостійких покриттів на лобову поверхню наконечників [68,69]. Нині

розроблені технології нанесення широкої номенклатури покриттів, стійких до дії металургійних розплавів.

Наприклад, за технологією газотранспортних СВС - реакцій можна отримувати покриття на основі боридів, нітридів і інших з'єднань завтовшки від 5 до 150мкм. Важливе те, що форма виробів, що покриваються, зазвичай значення не має. Промислові використання наконечників з покриттями показують, що можливе збільшення стійкості на 30% - 40% [70].

На рис. 1.9 узагальнені дані середньої стійкості наконечників кисневих фурм досягнутої в різні роки.

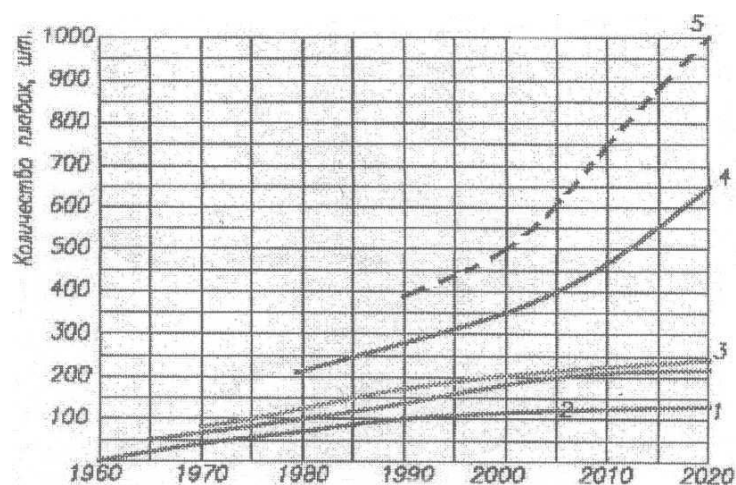


Рис. 1.9. Середня стійкість наконечників фурм досягнута в різні роки:

- 1 - суцільнолиті; 2 - суцільноточені; 3 - зварювальні; 4 - штамповані;
 5 - виготовлені з нових матеріалів на основі нітридних, оксинітридних і боридних з'єднань – прогноз

Радикальне збільшення стійкості наконечників можливе при застосуванні сучасних термостійких матеріалів, розробкою виробничих методів їх отримання і формоутворення. Більш високі службові властивості мають керамічні вироби на основі нітридних, оксинітридних і боридних з'єднань. СВС - технологія дозволяє порівняно дешево синтезувати матеріали цього класу. По стійкості до дії металургійних розплавів СВС - керамічні матеріали значно перевищують традиційну оксидну кераміку, вони не змочуються і практично не взаємодіють з

металургійними розплавами. СВС - вогнетривкі матеріали і вироби значно переверщують вживану оксидну кераміку по термостійкості (у 2-3 рази) і стійкі до дії металургійних розплавів (у 3-5 разів) [70].

1.3. Вплив конструкції і технології виготовлення наконечників на їх експлуатаційну надійність

Верхні кисневі фурми працюють в напівбезперервному циклічному режимі із черговим прикладанням та зняттям температурних, гідравлічних, пневматичних, силових вантажень.

Конструкції продувальних фурм, які використовуються нині в конвертерному виробництві, мають один або декілька компенсаторів деформацій, об'ємних і лінійних розширень.

Найбільше поширення отримали компенсаторні пристрої, які дозволяють переміщатися деталям і вузлам фурм один відносно одного в осьовому напрямі прикладення навантажень і після їх зняття.

Такі компенсатори встановлюють на центральній внутрішній трубі, яка служить або трактом для подання кисню або для підведення охолоджувальної рідини [6,7].

До теперішнього часу широке застосування знаходили компенсаторні пристрої із азбестовою прокладкою [7].

Принципом роботи цього пристрою є розташування м'якого матеріалу між двома фланцями, з подальшим затягуванням болтів для отримання ефекту ущільнення і можливості переміщення труб відносно одна одної (рис. 1.10).

Цей компенсатор розташовується у верхній частині фурми. Недолік азбестового компенсатора полягає в тому, що при досить хорошому ущільненні погано компенсуються деформації фурми.

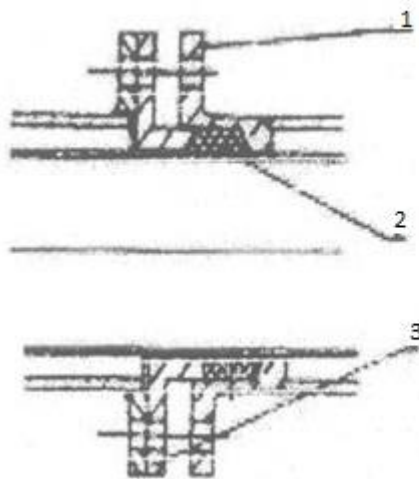


Рис. 1.10. Компенсаторний пристрій з азбестовою прокладкою [7]

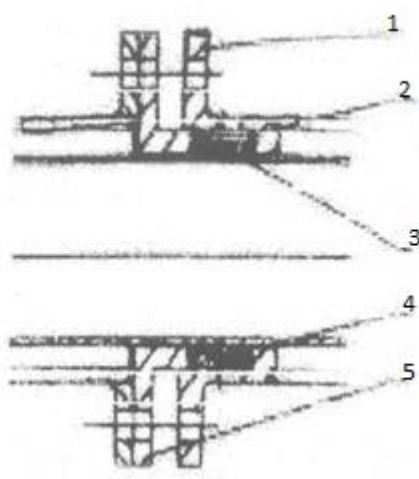


Рис. 1.11. Компенсаторний пристрій з гумовим каркасом [7]

Для усунення цього недоліку розроблено і використовується компенсаторний пристрій з гумовим каркасом [7].

Цей пристрій за конструкцією аналогічний конструкції компенсатора з азбестовою прокладкою, але принцип роботи інший. При щільному з'єднанні гуми і тиску води гума деформується, ущільнюючи з'єднання.

Спеціальна гумова прокладка забезпечує герметичність з'єднання при тиску води 1,2-1,5МПа не ускладнюючи вільне переміщення труб при температурних розширеннях (рис. 1.11).

Недолік: складність збирання, висока вартість виготовлення гумової прокладки і каркаса. Аналогічний недолік має компенсатор з гумовим ущільненням без каркаса, який розташовують на верхній ділянці фурми.

При затягуванні фланців болтами прокладка деформується, забезпечуючи герметичність. Цей пристрій простий у збиранні і при хорошій герметичності забезпечує вільне переміщення труб.

Недоліком служить складність у виготовленні фланців і, у зв'язку з цим, висока вартість.

Нині широко застосовують "о"- подібний кільцевий ущільнюючий компенсаторний пристрій. Герметичність такого з'єднання досягається за

допомогою гумових "о"- подібних кілець [71].

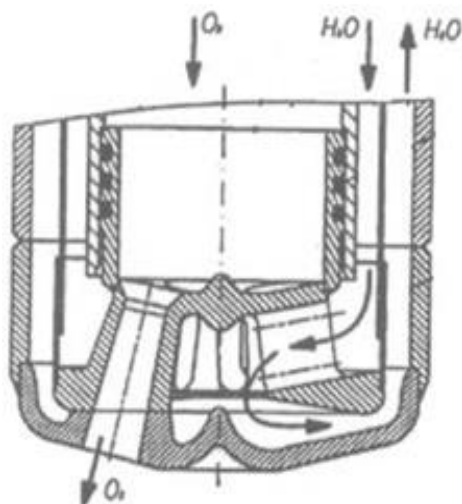


Рис. 1.12. Компенсаторний пристрій з "о"- подібними кільцевими ущільнювачами для фурм з центральним підведенням кисню [7]

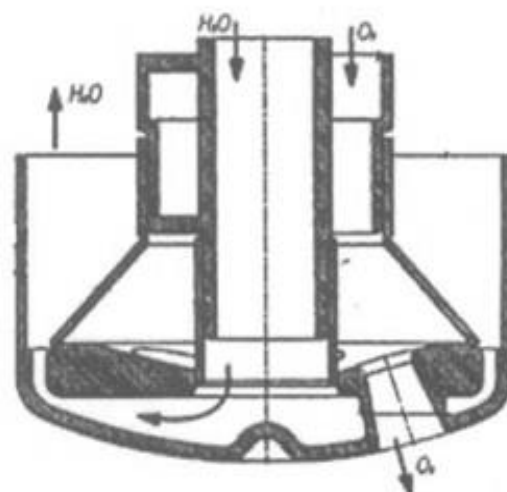


Рис. 1.13. Компенсаторний пристрій з "о"- подібними кільцевими ущільнювачами для фурм з центральним підведенням охолоджувальної води [7]

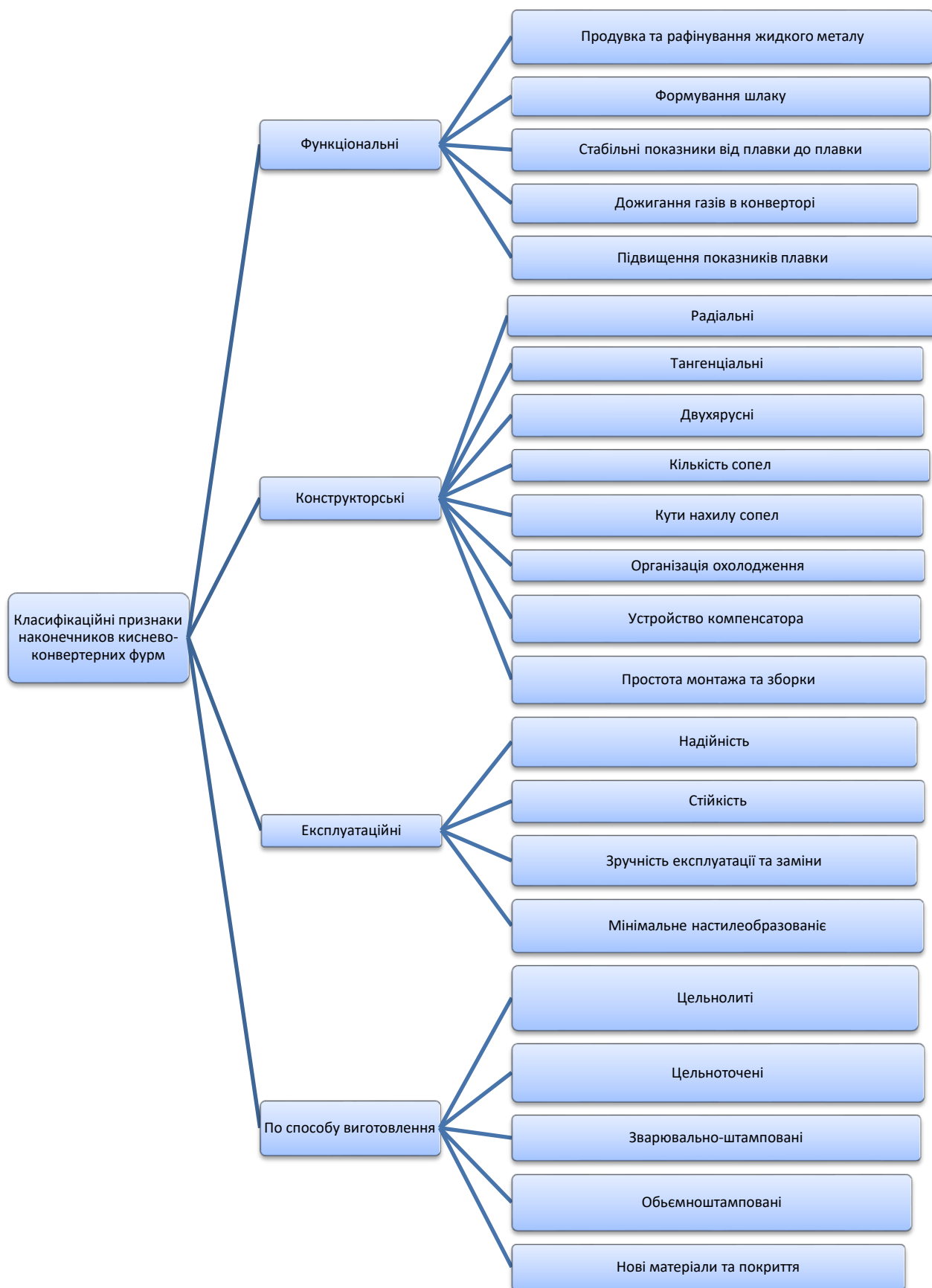


Рис. 1.14. Структура класифікаційних ознак наконечників кисневих фур

На рис. 1.12, 1.13 показані конструкції фурм з центральним поданням кисню і центральним підведенням охолоджувальної води.

Така конструкція компенсатора значно спрощує встановлення наконечника фурми, вирішує завдання компенсації температурних розширень і осьових переміщень деталей і вузлів.

При цьому зручна у збиранні, проста форма "о"-подібного кільця дозволяє виготовляти такий компенсатор без особливих витрат.

Недоліком цієї конструкції є те, що гумові ущільнення досить швидко руйнуються під впливом різного роду вантажень, особливо якщо при збиранні компенсатора припустилися похибок.

В першу чергу, це, що зм'яття першого гумового кільця при збиранні. Для забезпечення герметичності встановлюють не менше трьох кілець.

Оскільки гумові кільця не можуть виконувати функції центрувальних і направляючих елементів для забезпечення сукупності телескопічно зібраних кисневої труби і циліндричного патрубку. Проміжок між ними має бути мінімальним.

На основі проведеного аналізу запропонована структура кваліфікаційних ознак наконечників кисневих фурм, яка включала їх розділення (об'єднання) за (рис. 1.14) : 1 - функціональним призначенням; 2 - конструктивним рішенням; 3 - експлуатаційними характеристиками; 4 - і, нарешті, за способом виготовлення.

Запропонована кваліфікація наконечників не претендує на абсолютну повноту і завершеність.

Залежно від вдосконалення існуючих і створення принципово нових конструкцій вона може розширюватися і уточнюватися.

Висновки до першого розділу

Наконечники кисневих фурм, їх конструкція і організація продування конвертерної ванни визначають дуттєвий і шлаковий режими конвертерної плавки,

її техніко-економічні показники.

Вдосконалення конструкцій наконечників кисневих фурм, у тому числі, системи охолодження є актуальним завданням і затребуване практикою конвертерного переділу.

Стійкість вживаних наконечників недостатньо висока, а розпал навколосоплових ділянок призводить до нестабільного продування конвертерної ванни.

Прийнятніше виготовлення штампованих наконечників з мінімізацією технологічних операцій і собівартістю виробництва.

РОЗДІЛ 2

НОВІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ І ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

Як уже зазначалося в розділі 1, різноманіття відомих конструкцій наконечників фурм, не вирішує багато проблем, в т.ч. пов'язаних з організацією продувки ванни киснем. Зберігається невисока стійкість наконечників. Тому питання створення дугтьових пристроїв оптимальної конструкції і технології їх виготовлення є актуальними і становлять практичний інтерес.

Для вітчизняних підприємств, що виготовляють наконечники фурм, S - криві життєвого циклу технологій показують, що традиційна прихильність до нинішніх зрілих технологій, не тільки в довгостроковому плані, але в даний час неминуче веде до технологічного відставання [94]. Тому на основі аналізу наукових і технологічних розробок та патентної інформації були розроблені нові конструкції і технології виготовлення наконечників для задоволення сучасних вимог виплавки сталі [95].

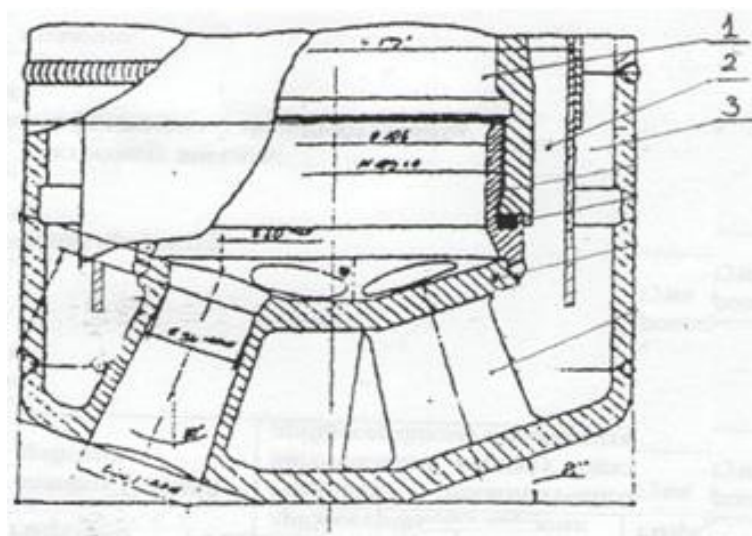


Рис. 2.1. Конструкція типового наконечника фурми: 1-тракт підведення кисню; 2-тракт підведення води; 3-тракт відводу води

Типовий наконечник кисневої фурми із зовнішнім діаметром 219 мм, який використовується у конвертерних цехах України являє собою конструкцію, наведену на рис. 2.1. Зазвичай це 4-х або 5-ти сопловий литий наконечник виробництва «Костянтинівського заводу металургійного обладнання» або виготовленого в ремонтно-механічному цеху металургійного підприємства.

Аналіз охолодження типових наконечників проведено з використанням 3D програмного комплексу ANSYS CFX. COSMOS Flo Works [72]. Моделювання розподілу швидкостей потоків (рис. 2.2 а) і потоків охолоджувача (рис. 2.2 б) показало недостатнє охолодження мідного вінця, який приймає основні теплові потоки від ванни, що продувається.

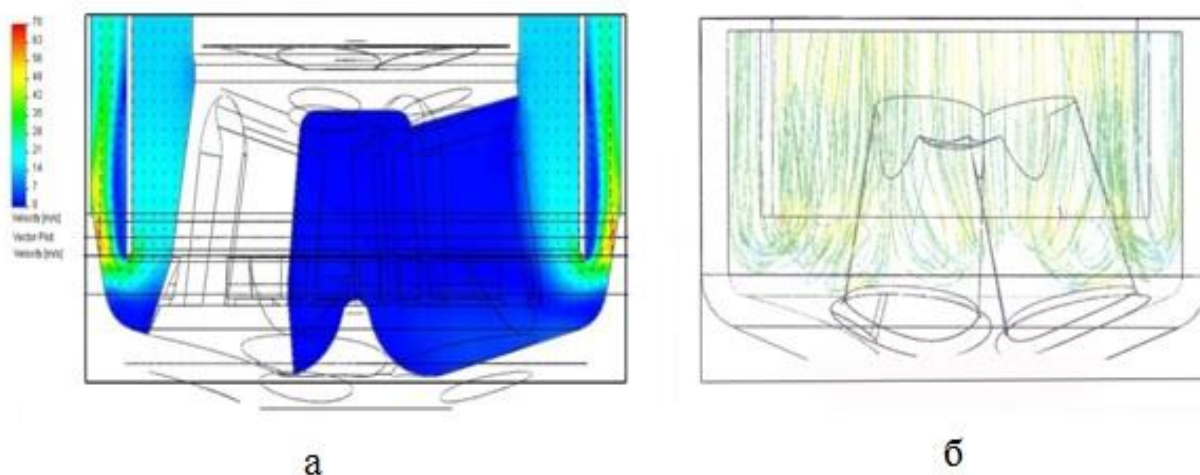


Рис. 2.2. Спектри розподілу швидкостей потоків (а) і потоків охолоджувача (б) у наконечнику типової конструкції

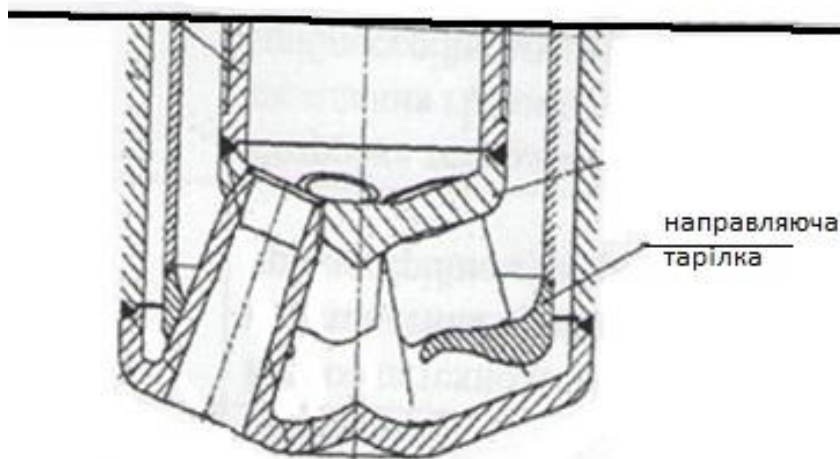


Рис. 2.3. Конструкція наконечника з направляючою тарілкою

Як видно з рис. 2.2 охолоджуюча вода, що підводиться, тільки частково використовується на охолодження центральної частини вінця наконечника (лобовини).

Основні потоки розвертаються в районі закінчення розділової труби і не беруть участі в охолодженні центральної частини наконечника і відводяться по тракту, створеному розділовою та зовнішньою трубами.

У роботах [42,44] встановлено, що тільки 30-40% води, що підводиться, охолоджує центральну частину вінця, а 60-70% взагалі не бере участі в охолодженні наконечника.

Недостатня кількість підвідної у центральну частину наконечника охолоджуючої води і невисокі швидкості її обтікання внутрішньої тепловідвідної поверхні лобовини не забезпечують ефективне охолодження наконечника і його високу стійкість.

Автором запропоновано направити всю підвідну на охолодження воду в центральну частину наконечника.

Для реалізації останнього, як показано на рис 2.3, запропоновано в наконечнику встановлювати направляючу тарілку.

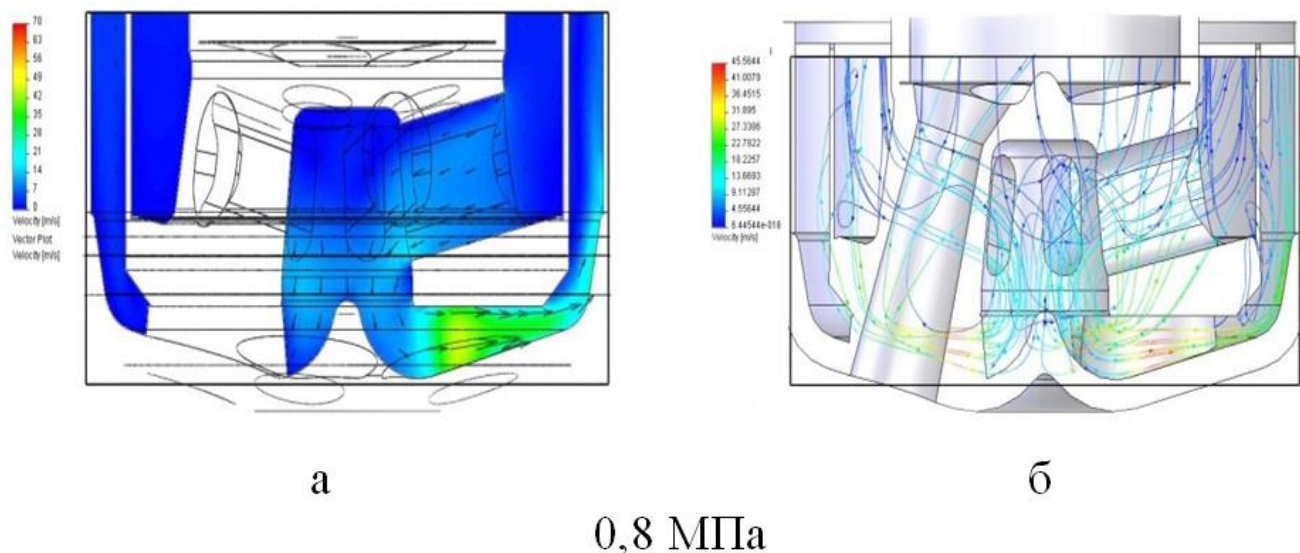


Рис. 2.4. Спектри розподілу швидкостей (а) і потоків охолоджувача (б) у наконечнику з направляючою тарілкою

У цьому випадку, як показано на рис. 2.4 потоки води, що надходять по тракту 2, направляються направляючою тарілкою 2 в центральну частину наконечника 3, омивають поверхню наконечника 4 і по каналах між соплами відводяться в тракт 3, утворений проміжною і зовнішньою трубами.

Такі рішення відомі у зарубіжній практиці [7]. Однак, при складанні виникають проблеми із centruванням направляючої тарілки і можливими її перекосами вже у процесі експлуатації.

Одним з перших виробників наконечників такої конструкції за кордоном є компанія «Saar Metall» (Німеччина). Схема такого наконечника представлена на рис. 2.5 [73].

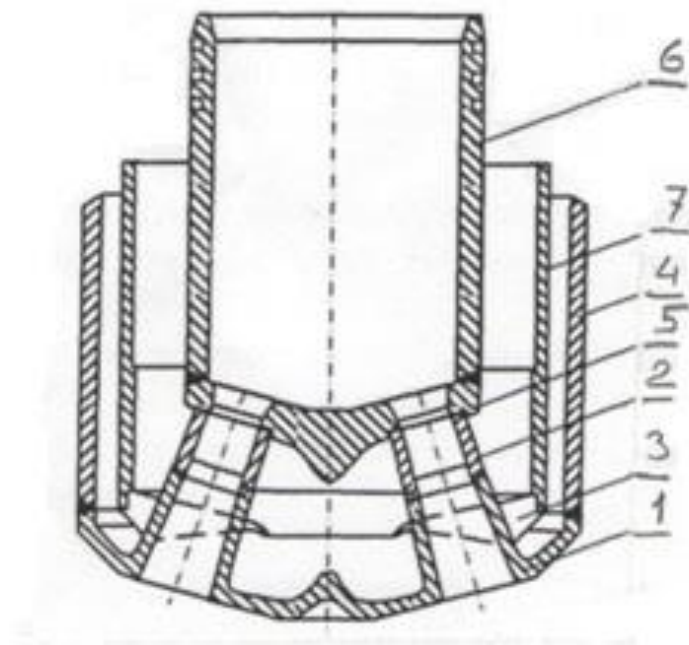


Рис. 2.5. Конструкція типового наконечника фурми, виробленого компанією «Saar Metall» (Німеччина)

Він складається з мідного штампованого вінця 1. Для подовження продувних сопел вінця приварюються мідні соплові вставки 2, на них вільно встановлюється сталева направляюча тарілка 3. Продувальні сопла з'єднують і зварюють із верхньою чашею 5. До цієї чаші приварюють центральну трубу 6 для подачі кисню. Потім із направляючою тарілкою 3 зістиковують трубу 7, яка утворює тракт підведення води. Остаточною операцією складання є стикування і зварювання мідного вінця 1 із зовнішньою трубою 4.

Збирання такої конструкції представлено на рис. 2.6. Нумерація позицій та ж, що і на рис. 2.5.

Описана технологія збору пропонує обробку стикувальних поверхонь деталей наконечника з високою точністю а потім зварювання цих поверхонь у середовищі захисних газів. Труднощі представляє зварювання мідних і сталевих деталей, особливо у важкодоступних місцях із гарантованою герметичністю.

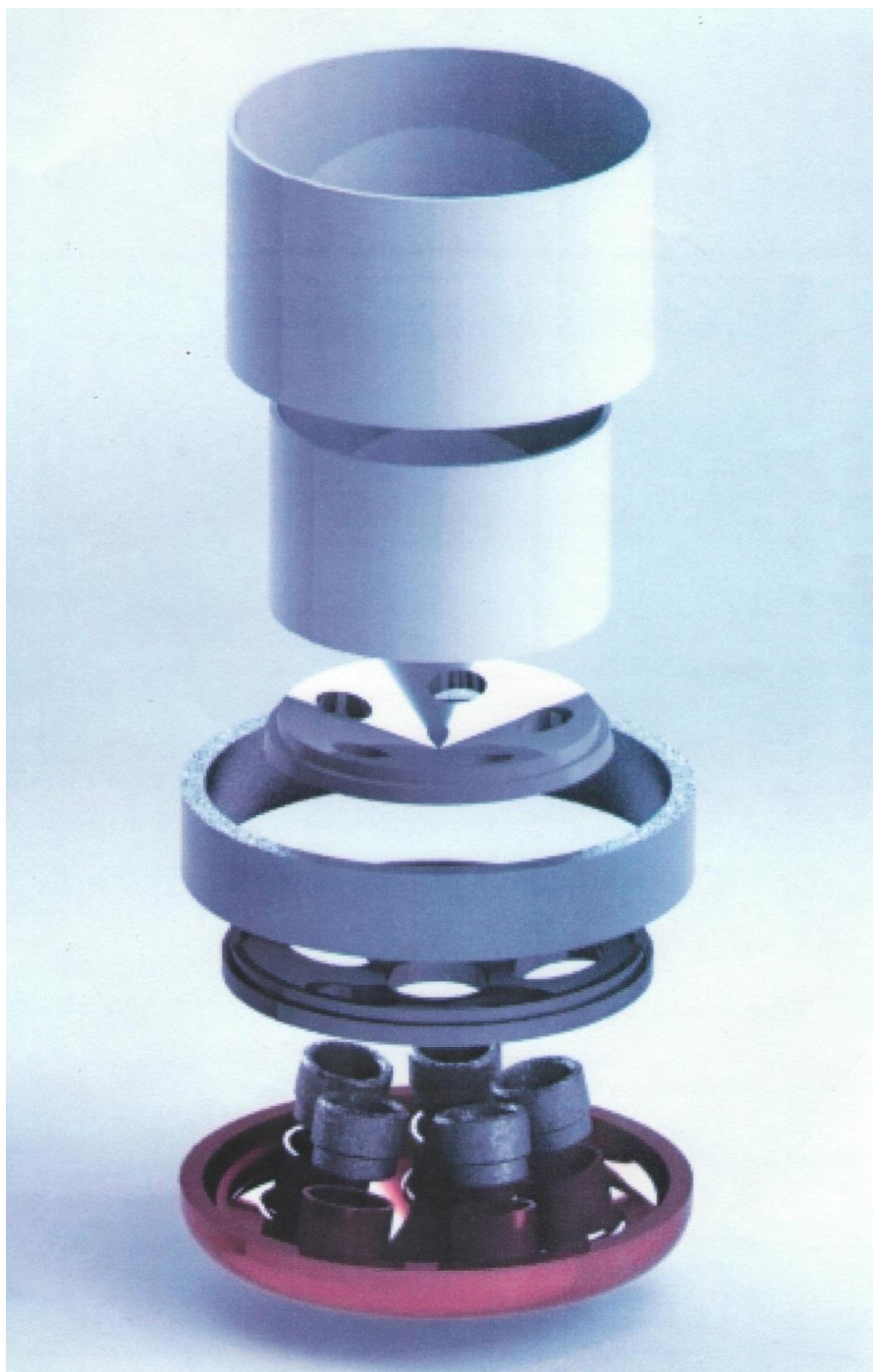


Рис. 2.6. 3D модель збору наконечника, виробленого компанією «Sear Metall»
(Німеччина)

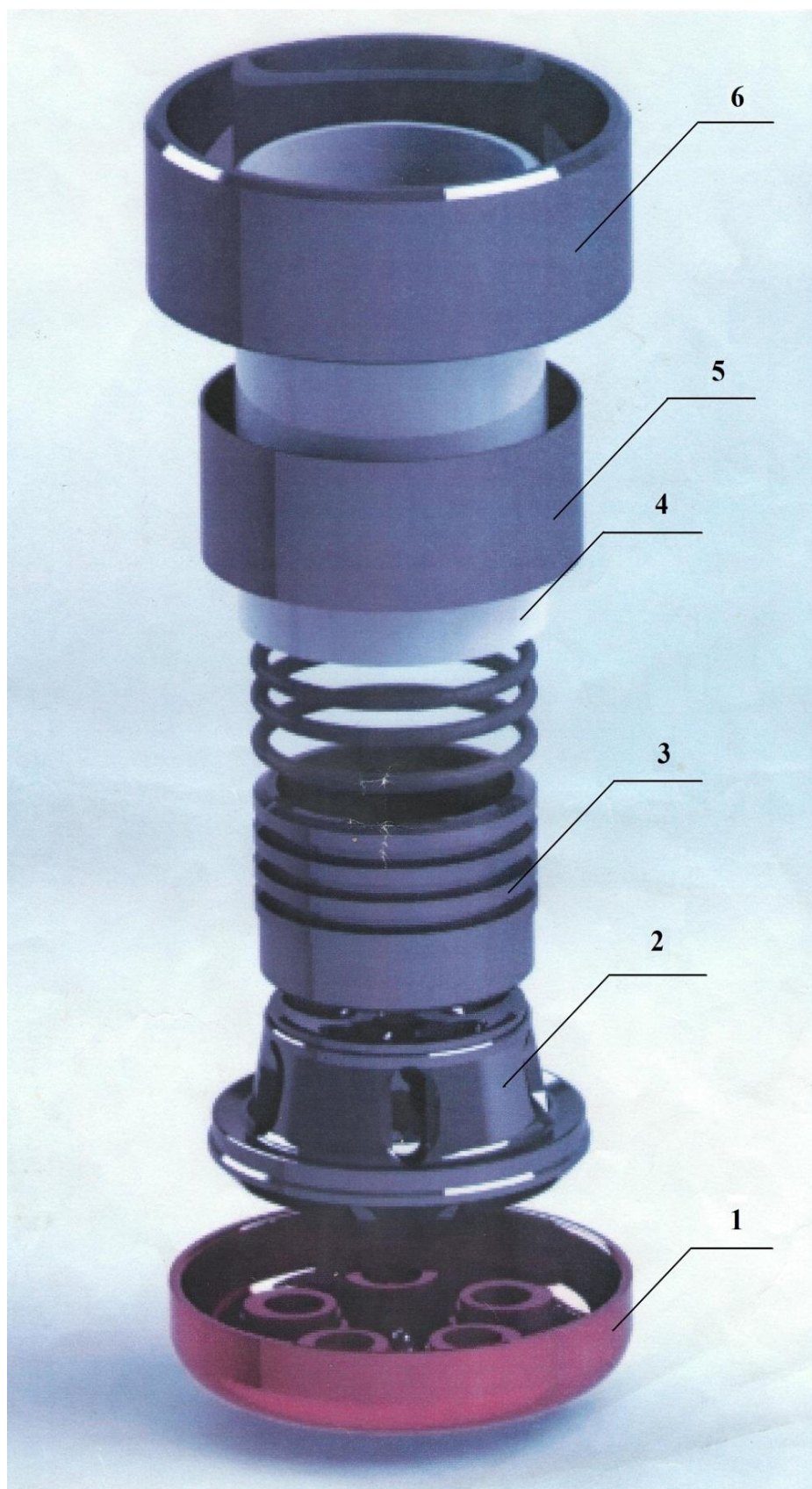


Рис. 2.7. 3D модель збору розробленого наконечника зі штампованим мідним вінцем 1 та сталевим сопловим блоком, об'єднаним із направляючою тарілкою

Автором розроблена конструкція наконечника (рис. 2.8) [74]., що складається з двох основних деталей – штампований мідний вінець 1 та сталевий сопловий блок із направляючою тарілкою 2.

Збір такої конструкції наконечника представлено на рис. 2.7.

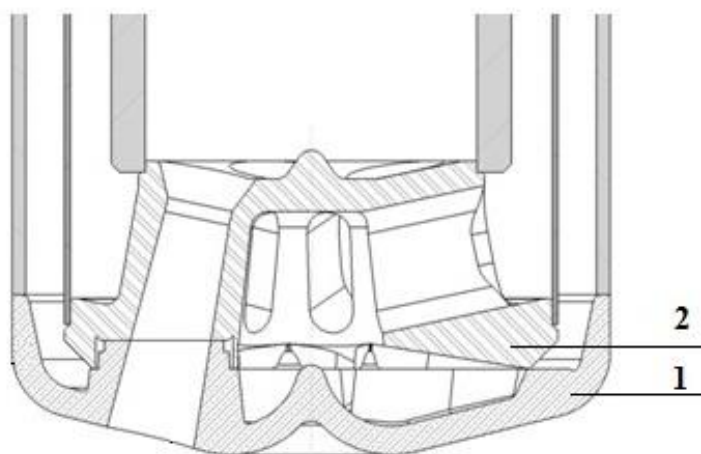


Рис. 2.8. Конструкція розробленого наконечника зі штампованим мідним вінцем 1 та сталевим сопловим блоком із направляючою тарілкою 2

Продувальні сопла мідного вінця 1 стикують і паяють із соплами сталевого блоку 2, виконаного із направляючою тарілкою. До сталевому блоку 2 приварюється компенсатор температурних розширень 3 із «о»-подібними гумовими ущільнювачами. Кисневу трубу 4 сполучають із компенсатором 3. Розподільну тарілку сталевому блоку 2 суміщають із проміжною трубою 5. На завершення до мідного вінця приварюють зовнішню трубу 6.

2.1. Запропонований телескопічний компенсатор термічних і механічних впливів на наконечник фурм

Для компенсації термічного впливу на наконечник фурми розроблена конструкція наконечника з гумовими ущільнювачами (рис.2.9). Компенсатори такого типу з «о»-подібними гумовими ущільнювачами застосовують у розвинених країнах (ФРН, США, КНР та ін.), однак ефективність їх використання знижується при порушенні співвісності. Внаслідок цього відбувається зминання гумових кілець, що призводить до розгерметизації рухомого з'єднання.

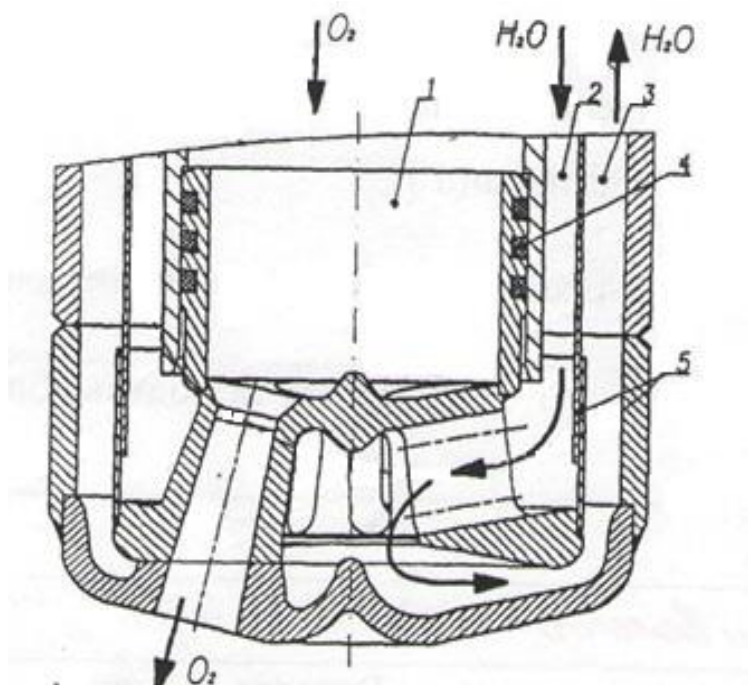


Рис. 2.9. Запропонована конструкція наконечника киснево-конвертерної фурми з гумовими ущільнювачами

Розроблена автором конструкція передбачає центрувально-направляючі елементи з визначеними триботехнічними характеристиками. У компенсаторі фурми, в якому раніше формували два порожніх циліндри, телескопічно з'єднаних через гумові ущільнюючі кільця, перед ущільнювачами і за ними встановлюють бронзові центрувально-направляючі кільця.

Кільце перед гумовими ущільнювачами має центрувальну фаску 30° і циліндричний направляючий поясок шириною 6мм. Кільце за гумовими ущільнювачами виконують з контактною сферичною поверхнею 4 радіусом 5мм.

Розміщення центрувально-направляючого і направляючого кілець знижує трудомісткість складання наконечника фурми із магістральними трубами і забезпечує не змяття першого гумового кільця ущільнення.

Друге направляюче кільце остаточно визначає співвісність телескопічного з'єднання циліндричного патрубку корпусу наконечника і внутрішньої труби фурми. На рис. 2.10 показана конструкція компенсатора з центрувально-направляючим кільцем перед гумовими ущільнювачами та направляючим кільцем за ними.

Наявність антифрикційних кілець дозволяє зменшити і кількість гумових ущільнювачів без зниження герметизації рухомого з'єднання. Гумові кільця дають можливість взаємного переміщення уздовж осі фурми і повороту навколо цієї осі.

Свобода пересування окремих елементів – значно розвантажує зварювальні шви і тим самим збільшує експлуатаційну надійність фурм.

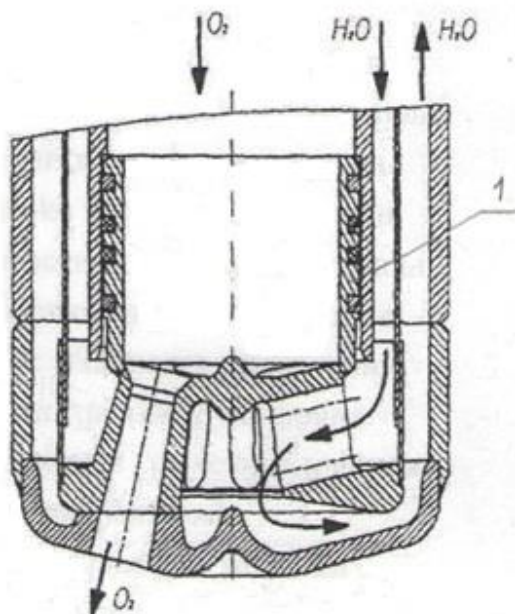


Рис. 2.10. Наконечник кисневої фурми з компенсатором із резинових ущільнень, centruючим і направляючим кільцями

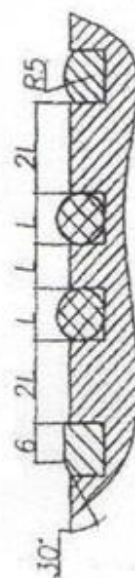


Рис. 2.11. Геометричні параметри елементів компенсатора

На рис. 2.11 наведено розташування мідних і гумових кілець. Взаємне розташування, геометричні параметри, використання гумових і антифрикційних матеріалів виключає утворення задирів і зменшує знос сполучної внутрішньої поверхні патрубка кисневої труби 1.

На розроблений компенсатор автором спільно зі співавторами отримано патент України на корисну модель [76]. Вдосконалена конструкція телескопічного компенсатора для кисневих фурм позитивно впливає на збільшення стійкості наконечників фурми, зменшує трудомісткість і складність проведення робіт з обслуговування і заміни наконечників.

2.2. Конструювання наконечників кисневих фурм на основі модульних технологій

Сучасні підходи до конструювання і виготовлення наконечників кисневих фурм характеризуються широкою різноманітністю.

У роботі [77] різноманіття поверхонь деталей об'єднані в два класи - виконавчі і єднальні.

Відповідно до службового призначення, виконавчі поверхні деталей підрозділяють на два підкласи: робочі і базуючі.

Для конструкцій наконечників такий підхід цілком прийнятний при організації виробництва.

Автором запропоновано виділити модулі поверхні наконечника чотирьох класів: виконавчі (МПВ), робочі (МНР), базуючі (МПБ) і єднальні (МПЄ) [78,79].

Оскільки наконечник під час продування піддається потужному тепловому впливу, він повинен мати поверхні, які ефективно відводять тепло в охолоджувальну рідину.

Передача тепла є робочим процесом і тому відповідні поверхні можна назвати робочими. До них пред'являються специфічні вимоги - максимально можлива площа, геометрія, шорсткість.

Службове призначення поверхонь сопел визначає подання кисню з певними параметрами (витрата, швидкість) в розплав металу.

Такі поверхні є виконавчими і до них висувають певні вимоги щодо їх геометрії, точності обробки і шорсткості.

Приклад конструктивного оформлення мідного вінця базового наконечника в модульному поданні наведено на рис. 2.12а.

Вінець наконечника включає п'ять виконавчих модулів поверхонь (3ІІ21, 14ІІ21, 19ІІ21, 24ІІ21, 35ІІ21) для передачі кисню, семи робочих модулів поверхонь (8Р122, 10Р121, 18Р122, 21Р21, 27Р21, 29Р122, 36Р21), для підведення і відведення охолоджуючої води.

Комплект основних баз, що визначає положення вінця в наконечнику, – це базуючий модуль 1Б112.

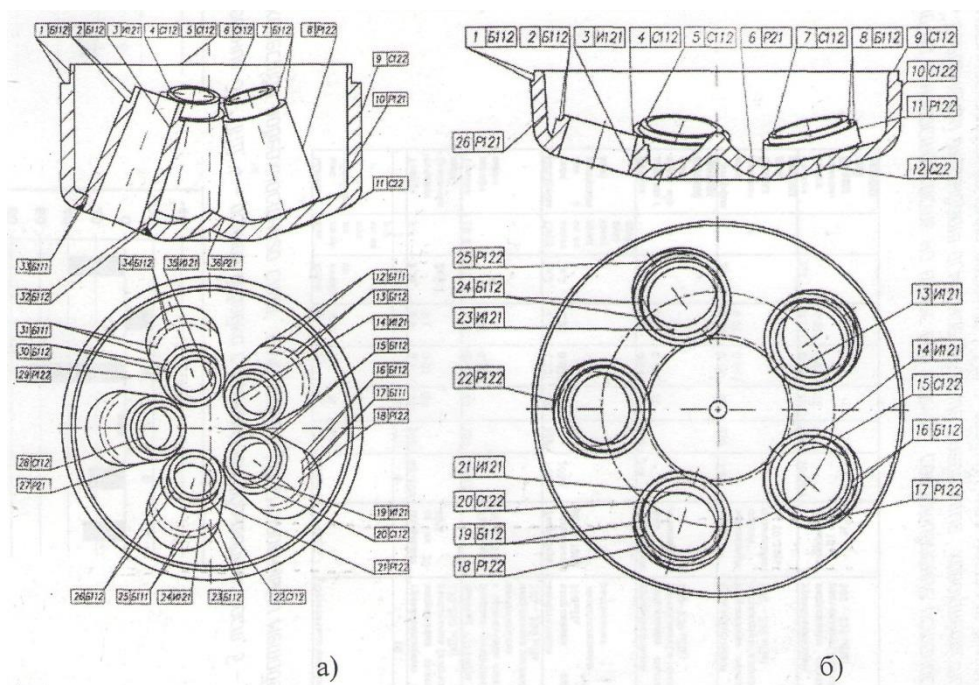


Рис. 2.12. Конструкція мідних вінців наконечників фурм у модульному поданні: а) базового; б) проектного

Він складається з короткої циліндричної поверхні – подвійна опорна база і торцевої поверхні – установча база.

Тут сполучення наконечника з зовнішньої сталевую трубою фурми.

Сполучення з центральною трубою, через яку подається кисень, здійснюють за допомогою верхньої тарілки (умовно не показана).

Верхня тарілка з'єднується з соплами при посередництві базуючих модулів 2Б112, 7Б112, 15Б122, 26Б112, 30Б112, 34Б112, які і сполучаються з базовими модулями тарілки 12Б111, 17Б111, 25Б111, 31Б111, 33Б111.

Решта поверхні, зібраного таким чином наконечника, виконують сполучні функції і їх можна віднести до сполучних модулів 4С112, 5С112, 6С112, 7С112, 9С122, 10С122, 22С112, 28С112.

На рисунку 2.12б наведено приклад конструювання нового вінця наконечника кисневої фурми в модульному поданні з урахуванням оптимальної технології формоутворення заготовки.

Запропоновано варіант об'ємного штампування вінця – штампування мідної тарілки з прутка з наступною механічною обробкою базових поверхонь і приєднання сопел за допомогою пайки.

Важливою перевагою розробленого вінця наконечника, крім перерахованих технологічних операцій, є відсутність зварних швів на зовнішній поверхні вінця.

Проектований новий вінець наконечника в модульному виконанні складається (як і базовий) з п'яти виконавчих поверхонь (3І121, 13І121, 14І121, 21І121, 23І121) і семи робочих модулів (6Р21, 1.1Р122, 17Р122, 18Р122, 22Р122, 25Р122, 26Р121) і восьми сполучних (4С112, 5С112, 7С112, 9С112, 10С122, 12С22, 15С112, 20С112).

Разом з тим, базуючих модулів значно менше (1Б112, 2Б112, 8Б112, 16Б112, 19Б112, 24Б112).

Для зіставлення модулів поверхні і аналізу їх співвідношення побудована гістограма розподілу (рис. 2.13 а, б).

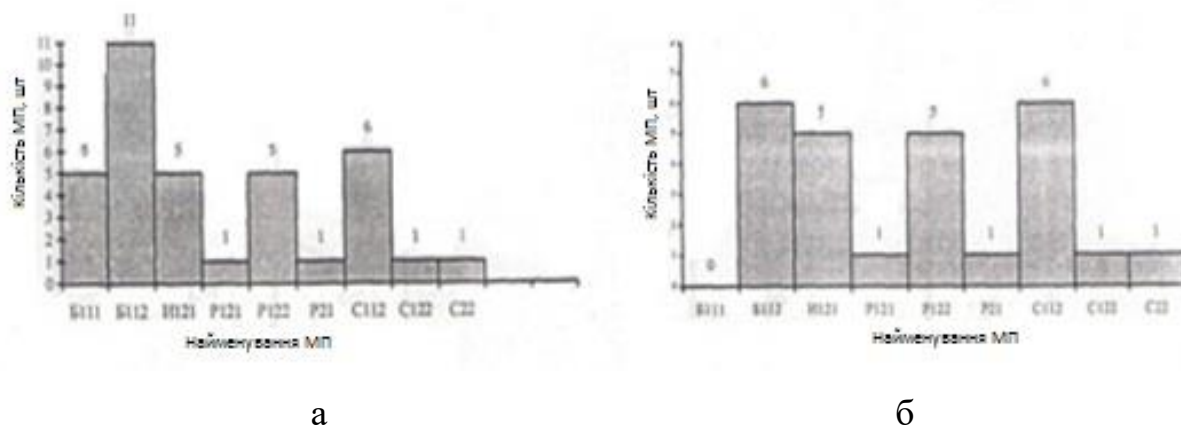


Рис. 2.13. Гістограми модулів поверхонь наконечників конвертерних фурм: а) базового; б) проектового

Проведено оцінку (у відсотках) модульних поверхонь цих різних за конструктивним оформленням і методу формоутворення вінців наконечників. Базовий вінець наконечника має модулів поверхонь на 28% більше, ніж новий спроектований [78,79].

Зіставляючи гістограми МП вінців наконечників, можна відзначити, що у базового вінця домінує клас МПБ – 44,4%, клас МПІ становить 13,9%. У знову спроектованого вінця домінує клас МПБ – 21,3%, клас МПІ – 19,2%.

До точності і шорсткості цих модулів поверхонь пред'являються більш високі вимоги, тому вони піддаються не тільки чорновій, а й чистовій механічній обробці. Якщо кількість МП базового вінця наконечника прийняти за 100%, то у спроектованого нового вінця точно оброблюваних поверхонь менше на 21,1%.

Проведені дослідження дозволили науково обґрунтовано підійти до конструювання наконечників і оптимізувати їх виготовлення.

2.3. Розробка конструкції наконечника кисневої фурми з турбулізаторами охолоджувача

Внутрішні поверхні наконечників кисневих фурм утворюють складний простір, в якому розташування продувних сопел перешкоджає ефективному

охолодженню через виникнення застійних зон за соплами по ходу руху потоків води. Останнє є однією з причин розпалу лобовини в районі застійних зон і зниження стійкості дуттєвих пристроїв.

Відомі конструкції багатосоплових наконечників [7,9,21,39-50] дозволяють певною мірою інтенсифікувати охолодження засоплових зон наконечників, однак, ці наконечники мають складну конструкцію, трудомісткі у виготовленні і збірці, а додаткові конструкційні елементи гальмують потоки охолоджувача.

На підставі виконаного аналізу запропоновано технічні рішення, що дозволяють зменшити або навіть виключити утворення застійних зон. В основі рішень наступне.

Під дією сил тертя на внутрішній поверхні тарілки, що омивається, частки рідини в пристінковому шарі гальмуються.

Коли кінетична енергія, що витрачається на подолання потенційного бар'єру гальмування, виявляється недостатньою, в пристінковій області рух рідини гальмується і в решті решт припиняється. З

У певних точках або на певних поверхнях прикордонний шар відривається від граничної поверхні. Найближча до стінки лінія струму при цьому йде від тіла. Ці явища характерні і для засоплової зони.

Турбулентний прикордонний шар більш стійкий до відриву, ніж ламінарний, тому в засопловій зоні необхідно створити умови турбулентності. У термінології, прийнятій для течії рідини при низьких числах Рейнольдса, пристрої, стимулюючи перехід від ламінарної до турбулентної течії, називають турбулізаторами.

Тому доступним способом «підкачки» енергії в прикордонний шар з метою підвищити його стійкість до відриву є посилення турбулентності [80]. Запропоновано організувати генерацію додаткових вихорів за рахунок направляючих лопаток, які використовують енергію для створення вихрового руху з зовнішнього потоку [81]. Направляючі лопатки запропоновано розташувати в засопловій зоні наконечника.

У наконечнику фурми (рис. 2.14) на мідному вінці 5 за кожним продувальним соплом по ходу напрямку руху води розміщують по одному турболізатору потоку

рідини у вигляді дугоподібної направляючої лопатки, контур якої є відрізками двох спіралей Архімеда, які описуються виразами:

$$x(\varphi) = 12,8 * \varphi * \sin\varphi, y(\varphi) = 12,8 * \varphi * \cos\varphi \quad (2.1)$$

для зовнішньої і

$$x(\varphi) = 12,79 * \varphi * \sin\varphi, y(\varphi) = 12,79 * \varphi * \cos\varphi \quad (2.2)$$

для внутрішньої відповідно,

де φ - кут повороту в радіанах (починається дотично до сопла і закінчується на перетині з зовнішнім діаметром фурменної головки), сполучається з радіусом в межах $1/7 - 1/8$ зовнішнього діаметра.

Контур прохідного каналу, утвореного діаметром продувочного сопла і контуром турбулізатора, утворює сопло Лавалю, що забезпечує збільшення швидкості охолоджуючої води в засопловій зоні.

Вибрані коефіцієнти (12,8 і 12,79) визначені експериментально.

Охолодження наконечників відбувається наступним чином. Вода по підвідному тракту 2 (рис. 2.14) і по направляючій тарілці соплового блоку 4 надходить у центральну зону мідного вінця 5.

Далі проходить через вузькі зазори між продувними соплами 8 і надходить у засоплову зону, обмежену турбулізаторами потоку води 6. Останні виконані у вигляді напрямних криволінійних лопаток, які з одного боку, об'єднуючи потік, закручують його за годинниковою стрілкою з виходом у відвідний тракт 3.

З іншого боку потік, рівний товщині пограничного шару води, що охолоджує, потрапляючи в розширюючий у вигляді сопла Лавалю канал, прискорюється, турбулізується і, тим самим, виключає утворення застійних зон і зон відриву потоку від поверхонь.

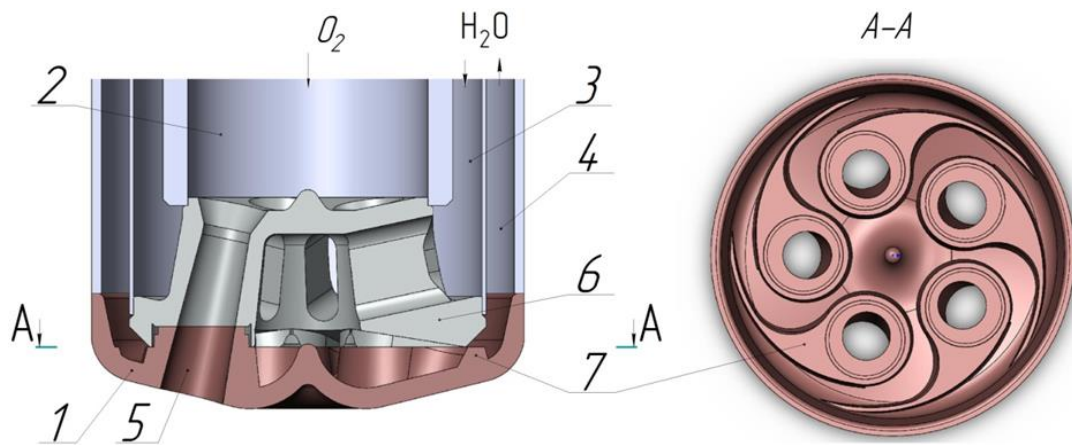


Рис. 2.14. Кисневий тракт 2; тракт для підведення води 3; тракт, що відводить воду 4; сталевий блок 6 з продувними соплами 5, тарілка, що скеровує потоки води до центру мідного вінця 6; турбулізатори 7 потоків води на мідному вінці 1 і турбулізатори 7 потоків води на сталевому блоці 6

Рівномірне ефективне теплоснімання зі всієї внутрішньої поверхні наконечника виключає утворення локальних ділянок його перегріву.

На рис. 2.15 червоний колір спектра в засоплових зонах омивання підтверджує, що потік рухається зі швидкістю більше, ніж 6м/с (результати математичного моделювання).

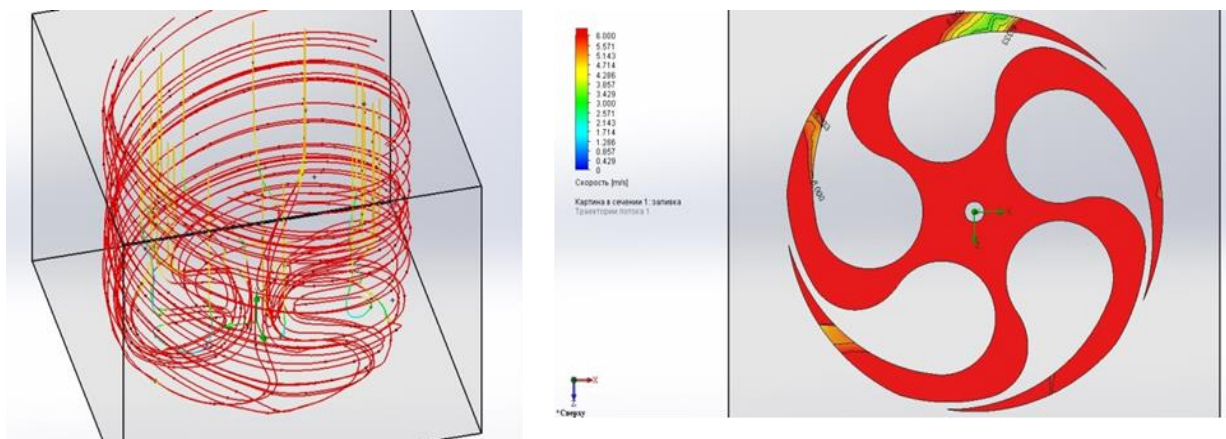


Рис. 2.15. Гідродинамічне моделювання руху потоків охолоджувача в наконечнику з турбулізаторами

Разом з тим, розроблена конструкція при тисках охолоджуючої води менше 1,0 МПа, не забезпечує необхідної турбулізації рідини в пристінковому шарі, що може викликати припинення руху води і, тим самим, зменшити експлуатаційну надійність наконечника.

У цьому випадку доцільно збільшити поздовжні компоненти швидкості. У виробничих умовах зробити це за рахунок збільшення тиску охолоджувача важко.

Тому запропоновано встановити додаткові роздільники потоків і забезпечити перенесення охолоджуючої води з віддалених від стінок областей в пристінковий шар.

При цьому повністю основні і додаткові потоки охолоджувача рухаються в одному напрямку.

Для збільшення поздовжньої компоненти швидкості охолоджуючої води - на сопловому блоці 4 розміщені розподільники 7 в зоні між вінцем 5 і блоком 4 у вертикальній площині, і між продувними соплами 8 і турболізаторами 6 в горизонтальній площині (рис. 2.16, 2.17).

Контури роздільників 7 створені двома спіралями Архімеда, початок яких знаходиться в центрі продувних сопел соплового блоку 4, а закінчуються останні на зовнішньому колі блоку 4 (рис 2.17).

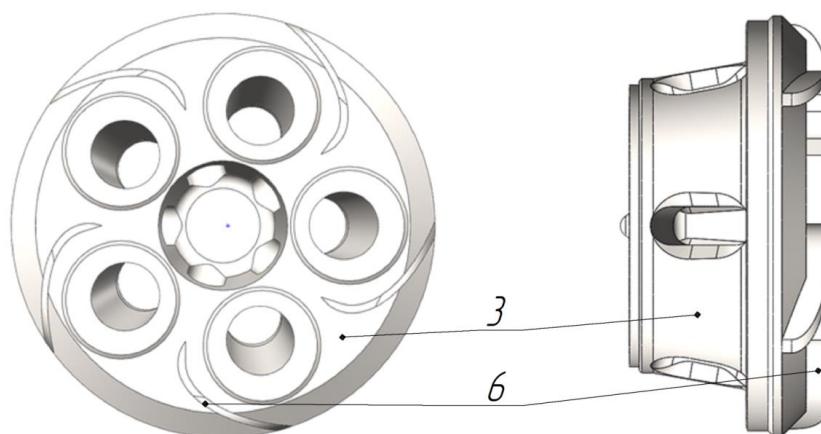


Рис. 2.16. Сталевий сопловий блок з розподільною тарілкою, на якій розташовані дугоподібні, направляючі лопатки

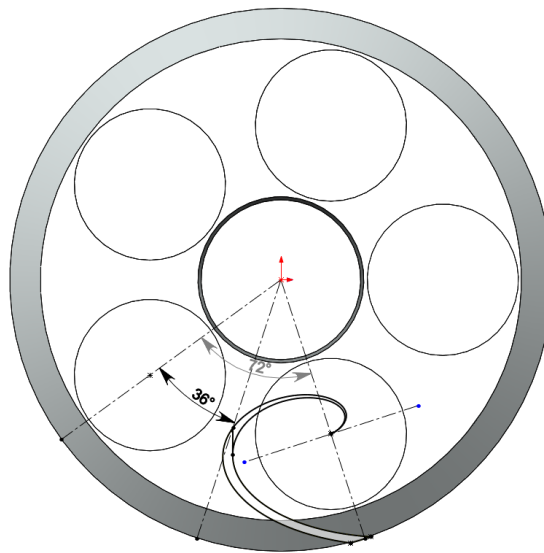


Рис. 2.17. Дві спіралі Архімеда, що утворюють контур розподільника (початок в центрі продувного сопла, закінчення на зовнішньому діаметрі сталевго корпусу)

Такі геометричні параметри розподільників і їх розміщення дозволяє перерозподілити потоки охолоджуючої води і інтенсифікувати охолодження застійних зон, і розміщення описують виразами:

$$x(t) = -22 * t * \sin t, y(t) = 13 * t * \cos t \quad (2.3)$$

- для зовнішньої і

$$x(t) = -20 * t * \sin t, y(t) = 12 * t * \cos t \quad (2.4)$$

- для внутрішньої відповідно і закінчуються на внутрішньому діаметрі корпусу.

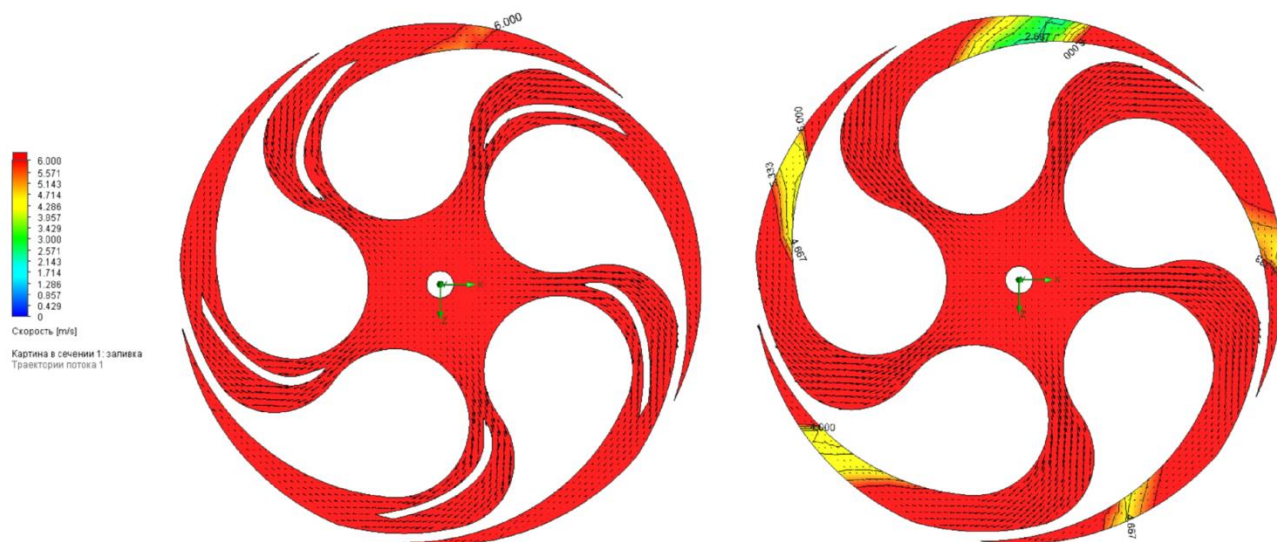


Рис. 2.18. Результати гідродинамічного моделювання потоків охолоджуючої рідини у внутрішній поверхні вінця наконечника

За рахунок цього забезпечують ефективне використання повного об'єму води, що охолоджує при тисках, які застосовують в конвертерних цехах. Останнє підтверджують результати моделювання: на рис. 2.18а червоний колір спектра означає, що потік рухається зі швидкістю більше, ніж 6м/с при тиску 0,8МПа; на рис 2.18б – у засоповій зоні наконечника без елементів пасивного посилення турбулентності охолоджувача спостерігають ділянки, де швидкість потоків не перевищує 4-5м/сек при тиску 0,8МПа, що може призвести до розпаду сопел на зовнішній поверхні лобовини наконечника.

Розроблена конструкція наконечника кисневої фурми з турбулізаторами охолоджувача захищена автором двома патентами України [83,84].

2.4. Нанесення кластерних термобар'єрних покриттів на зовнішні поверхні наконечників фурм

Багаторічний досвід експлуатації наконечників кисневих фурм різних конструкцій, статистика аварій, експериментальні дослідження переконують у тому, що, як правило, руйнування наконечника починається з поверхні. Якість поверхні

мідного наконечника фурми є одним із ключових факторів, що визначає термічну міцність, а також пластичну деформацію або деформацію повзучості, яка призводить до розпалу крайок сопел, руйнування зварювальних швів тощо.

У процесі продувки розплавленої ванни киснем (опускання фурми в конвертор) наконечник починає миттєво деформуватися, унаслідок цього виникає перша стадія повзучості. На цій стадії швидкість повзучості поступово зменшується, досягаючи постійного (сталого) значення для другої стадії повзучості. На третій стадії продувки швидкість повзучості починає зростати, що призводить до початку руйнування поверхневого шару. На четвертій стадії (підйом фурми до верхнього положення) наконечник починає деформуватися внаслідок різкого охолодження.

Як правило, деформація повзучості є функцією наступних змінних:

$$\varepsilon_{ij} = f(\sigma_{ij}, t, T), \quad (2.5)$$

де ε_{ij} - деформація повзучості; σ_{ij} - напруження при повзучості; t - час;

T - температура.

Відомо, що чим меншою є шорсткість поверхні, тим вищою є втомна міцність деталей [81].

Нерівності на поверхні є концентраторами напружень і однією з причин зниження втомної міцності.

Для запобігання розпалу крайок мідних наконечників кисневих фурм зовнішню поверхню покривають тугоплавкими металами, наприклад, молібденом, вольфрамом та ін. [81]. Проте нанесення суцільного покриття з тугоплавких металів не забезпечує високої стійкості. Це зумовлено виникненням внутрішніх напружень у покритті й матеріалі вінця. Крім цього, у процесі продування нагрівання та охолодження мідного вінця призводять до розриву суцільності покриття та тріщин у міді у зв'язку з різним коефіцієнтом об'ємного розширення. Ефективним способом підвищення якості покриття є міцність його зчеплення з основним матеріалом, який значною мірою залежить від підготовки підкладки.

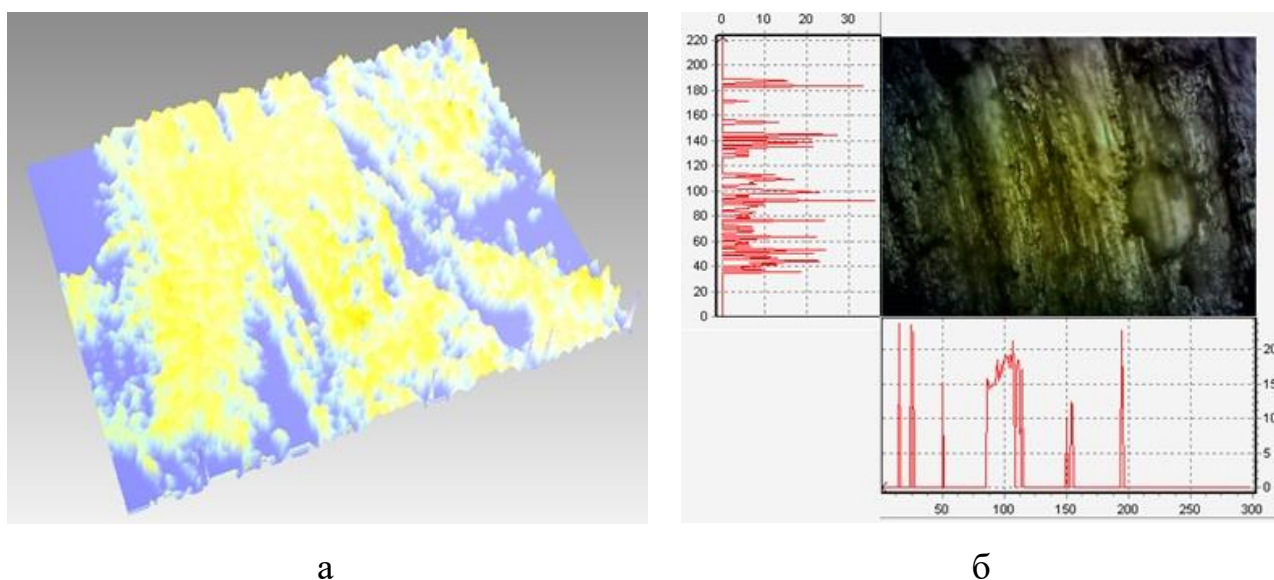
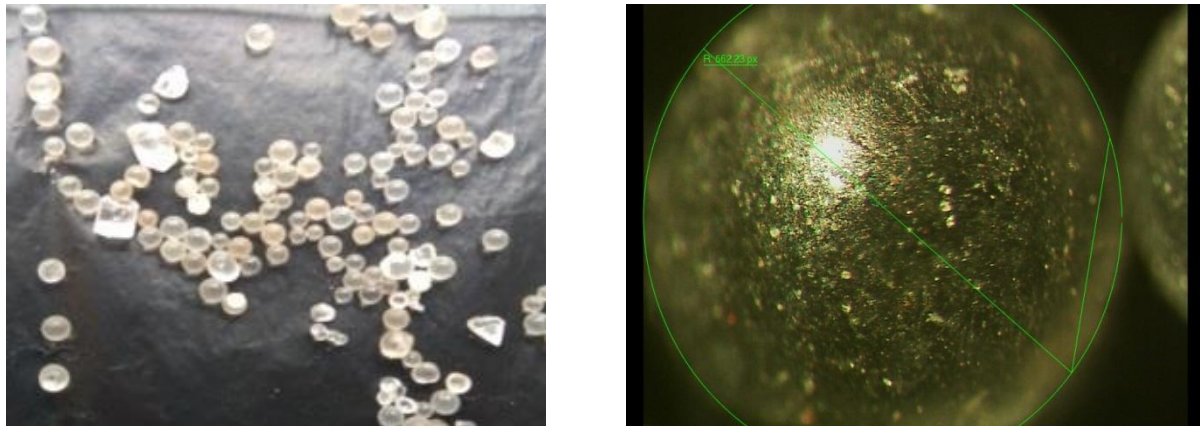


Рис. 2.19. Поверхня мідного зразка після механічної обробки перед активацією : а – 3D топографія поверхні; б – макрошліф поверхні (з розмірами рельєфу в мкм)

Для визначення оптимального способу підготовки підкладки під покриття проведено аналіз якості поверхні наконечника, обробленої за традиційною технологією (рис. 2.19).

Аналіз впливу технологічних операцій підготовки підкладки [82] на якість нанесення покриття на мідну переривчасту поверхню наконечника, яка утворена кривими другого порядку, показав, що найбільш раціональним є струменево-абразивний метод, який підвищує адгезію системи підкладка-покриття, оптимізує шорсткість і структуру зовнішньої поверхні наконечника.

Як абразивний матеріал використовували сферичні гранули [83] ударостійкого сополімер стиrolу (рис. 2.20).



а

б

Рис. 2.20. Вид гранул сополімер стиролу: а - загальний вид; б – одинична гранула

$$D_{cp.}=1500\text{мкм}$$

Взаємодія гранул сополімер стиролу з мідною поверхнею наконечника призводить до утворення довільного мікрорельєфу, зняття окисних плівок, що підвищує адгезію за рахунок нанесеного електроіскрового покриття з утвореною підкладкою.

На процес струменево-абразивної обробки впливає чимало чинників, одним із яких є дія результуючої сили на кожну гранулу

$$\bar{P}_{\Sigma} = \bar{P}_v + \bar{P}_{mp} + \bar{P}_{in} + \bar{P}_z + \bar{P}_m + \bar{P}_n + \bar{P}_T, \quad (2.6)$$

де $\bar{P}_v$ - сила тиску струменя; $\bar{P}_{mp}$ - сила, що виникає від дії моменту сил, які орієнтують гранули в абразивному потоці; $\bar{P}_{in}$ і $\bar{P}_z$ – сили інерційні й відцентрові, які виникають під час прискореного руху гранули; $\bar{P}_m$ - сила ваги; $\bar{P}_n$ - нормальна сила в контакті гранули з іншими гранулами; $\bar{P}_T$ - сила тертя в контакті гранули з оброблювальною поверхнею при пружно-пластичному деформуванні.

Дослідження проводилися на наступних припущеннях: гранули ударостійкого сополімер стиролу мають однакову сферичну форму (рис. 2.20а); гранули жорсткі, співвідношення розмірів реальних гранул і оброблювальної поверхні наконечника дозволяють розглядати робочий зазор як плоский.

Однією з умов підготовки поверхні під покриття є зниження шорсткості поверхні, зміна якої може бути визначена як:

$$Ra_i(Z, V) = \sum_{j=1}^N r(Z, V) \rightarrow \min, \quad (2.7)$$

де N - кількість одиничних актів контактної взаємодії на елементарній ділянці;
 r - величина лунки після одиничного акту контактної взаємодії; Z - зернистість абразивної частинки; V - швидкість абразивного потоку.

Разом з тим зняття матеріалу приймається як обмеження:

$$G_i(Z, V) \rightarrow \min. \quad (2.8)$$

Значення шорсткості мідної поверхні наконечника фурми, активованої струменево-абразивним методом під покриття, визначалося за допомогою безконтактного інтерференційного 3-D профілографа «Micron-alpha» виробництва ТОВ «Мікрон-система» Україна, Київ, який дозволяє реєструвати топографію поверхонь шляхом обробки послідовності інтерференційних даних (картин), що реєструються цифровою камерою при зміщенні опорного (еталонного зразка) дзеркала.

Результати дослідження поверхні зразків після струменево-абразивної обробки представлені на рис. 2.21.

За результатами аналізу експериментальних даних активація поверхні струменево-абразивним методом досить різко змінює параметри утвореного мікропрофілю, що, у свою чергу, може сприяти зменшенню повзучості і збільшення втомної міцності.

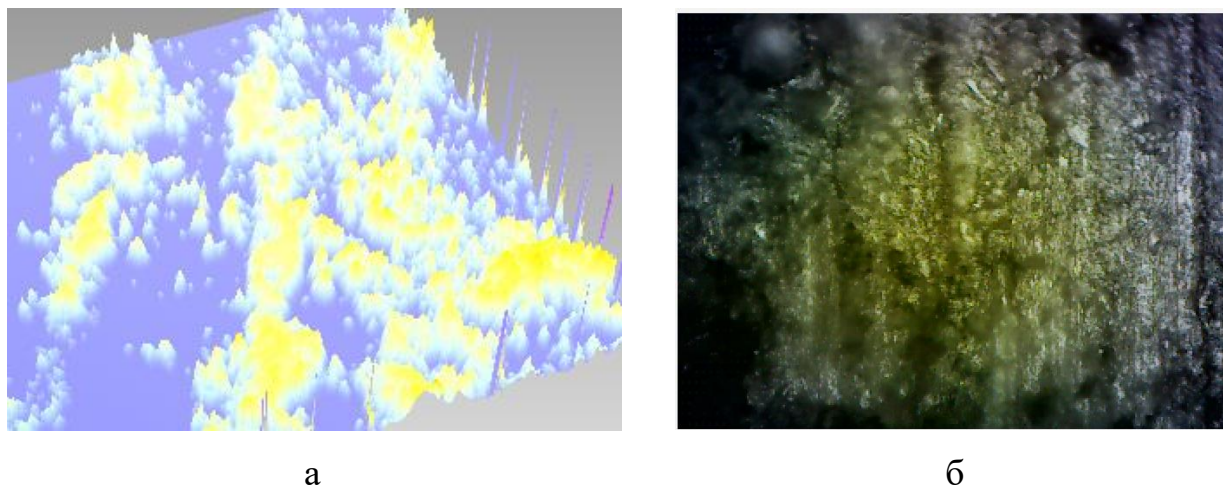


Рис. 2.21. Поверхня мідного зразка після струменево-абразивної обробки: а – 3-D топографія поверхні; б – макрошліф поверхні

Одним із перспективних напрямків підвищення зносостійкості наконечників кисневих фурм є нанесення захисних покриттів, зокрема електроіскровому легуванні (ЕІЛ) [84,85]. Основні переваги цієї технології полягають у перенесенні на поверхню різних струмопровідних матеріалів, у високій міцності, адгезії зміцненого прошарку з основного, локальному нанесенню покриттів без помітної деформації деталей, відсутності нагріву всього обсягу деталі.

Проте, використання електроіскрового легування для зміцнення поверхонь деталей металургійного устаткування стримується низкою чинників: відносно невисока продуктивність процесу, мала товщина і суцільність покриття.

Якість поверхні, обробленої електроіскровим легуванням, визначається геометричними розмірами лунок, ступенем їх взаємного перекриття, а також розмірами утворюваних напливів. Під впливом розряду метал з оброблювальної поверхні розбризкується і на лунках з'являються нерівності (напливи), які спотворюють їх.

На рис. 2.22 представлені знімки одиночних лунок, які виникли після електричного розряду при легуванні мідного зразка електродом з хромонікелевого сплаву (рис. 2.22а), одержаного на растровому електронному мікроскопі. На рис. 2.22б представлено вид мідного зразка з лункою (кластером), легованого нікелем.

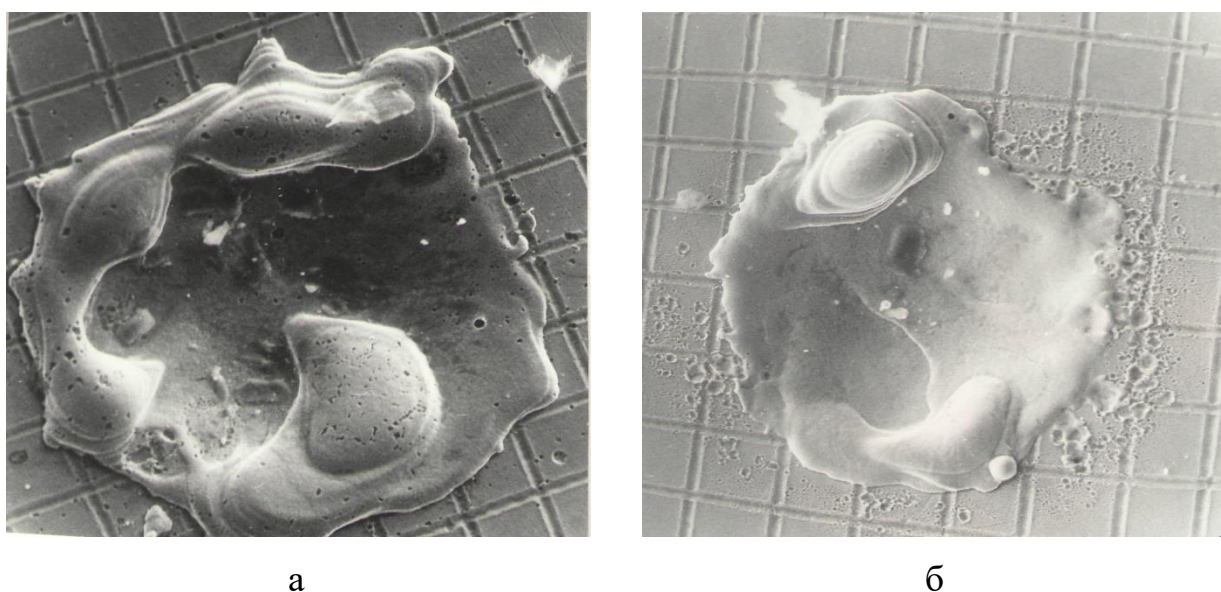


Рис. 2.22. Зображення одиночних лунок (кластерів) на поверхні мідного зразка, легованого електродом з хромонікелевого сплаву, а, б - х200

Відомо [84], що у процесі ЕІЛ в поверхневому шарі відбуваються глибокі структурні перетворення, які змінюють його фізико-механічні властивості, зокрема залишкові напруження. Так, у процесі ЕІЛ вони зумовлені нестационарними процесами нагріву й охолодження матеріалу в зоні імпульсного розряду.

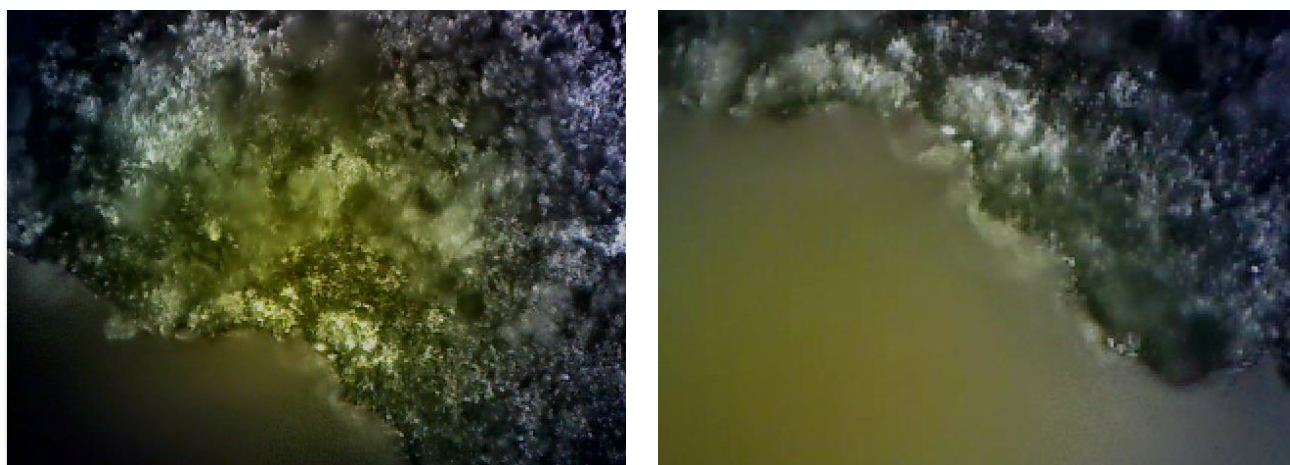


Рис. 2.23. Топографія поверхні зразка з дефектами суцільного покриття

Залишкові напруження, що виникають у покриттях, суттєво впливають на експлуатаційні властивості зміцнених деталей. На характер розподілу залишкових напружень при ЕІЛ впливають матеріал анода, питомий час, технологія нанесення покриття, але при цьому може забезпечити суцільність покриття до 70% сумарної площі, тому належить до покриттів дискретної структури [85].

Для підвищення захисних корозійних властивостей покриттів, зовнішніх мідних поверхонь наконечників кисневих фурм необхідно застосовувати технології отримання суцільних покриттів.

Матеріалами з хорошим опором повзучості при високій температурі, низькою пластичністю, а також хорошою високотемпературною корозійною стійкістю є сплави на нікелевій і хромовій основі. Як правило, їх наносять у результаті електрохімічних процесів осадження в електролітах. Однак, такі гальванічні покриття мають недоліки: розтріскування і відшарування при низькомеханічних, циклічних навантаженнях (рис. 2.23).

Відповідно до сучасних вимог перспективним способом, що дозволяє збільшити життєвий цикл наконечників кисневих фурм, є пароплазмове нанесення покриттів.

Параметрами, що характеризують процес пароплазмового нанесення покриттів, є час обробки, концентрація електроліту і якість підкладки поверхні під нанесення покриття (вид мікрорельєфу, шорсткість).

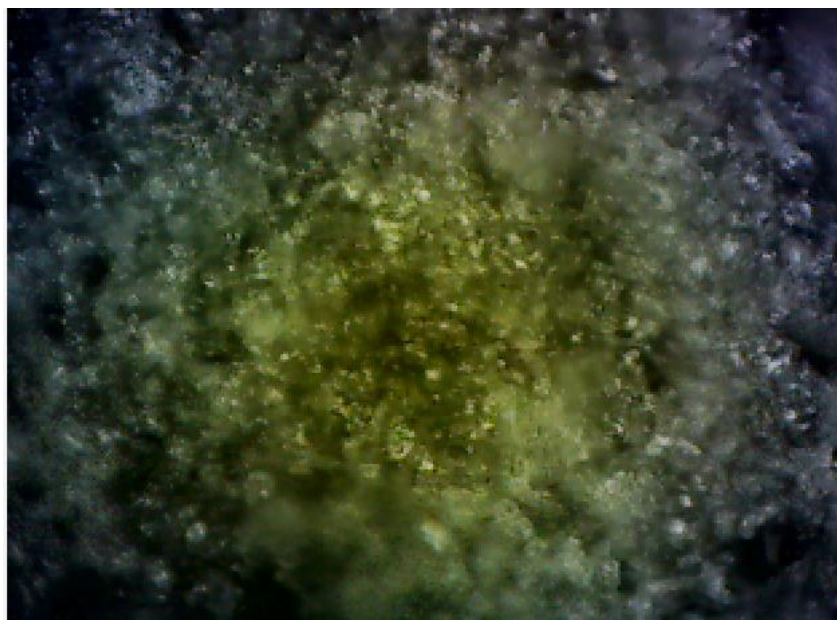


Рис. 2.24. Мідний зразок з кластерним термобар'єрним покриттям

Для процесу пароплазмового полірування (після ЕІЛ) було застосовано електроліт на основі сульфату амонію $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ з концентрацією по воді 1%. Для пароплазмового нанесення покриття нікелю (Ni) було використано 30% водного розчину сульфату нікелю (NiSO_4) з результатом $\text{pH} \sim 3,8$ і провідністю 44 мОм/см при температурі 70°C .

Ключовою умовою зарощування лунок (кластерів), утворених електроіскровим легуванням у процесі пароплазмового покриття, є нанесення необхідної товщини шару для отримання рівномірного захисного покриття (рис. 2.24).

У результаті виконаної роботи було розроблено і досліджено комплексний, економічно вигідний, екологічно безпечний технологічний процес пароплазмового нанесення термобар'єрного покриття на наконечники конвертерних фурм.

Висновки до другого розділу

Розроблена вперше конструкція наконечника кисневої фурми, що складається з двох основних деталей – штампованого мідного вінця та сталевого блоку із направляючою тарілкою.

Вдосконалена конструкція телескопічного компенсатора для кисневих фурм, яка передбачає гумові ущільнювачі та центрувально-направляючі елементи з визначеними трибо технічними характеристиками.

Запропоновано конструювання наконечників кисневих фурм на основі модульних технологій з урахуванням оптимального формоутворення заготовки. Завдяки такому підходу спроектований вінець наконечника має на 28% модулів поверхонь менше ніж базовий і відповідно на 21,1% менше точно оброблюваних поверхонь.

Вперше запропонована конструкція наконечника фурми з турбулізаторами охолоджувача на внутрішній поверхні вінця наконечника за сопловою зоною у вигляді дугоподібної направляючої лопатки, контур якої є відрізками двох спіралей Архімеда.

Вперше на сопловому блоці передбачені додаткові розподільники потоків. Контури розподільників створені двома спіралями Архімеда, початок яких знаходиться в центрі продувних сопел соплового блоку, а закінчується на зовнішньому колі блоку.

Вперше запропоновані пароплазмове нанесення покриття на зовнішню поверхню мідного вінця наконечника і технології підготовки поверхні та власно покриття, включаючи електро-іскрове легування.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ, ЩО ЗАПРОПОНОВАНІ

3.1. Математичне моделювання охолодження наконечників кисневих фурм

Охолодження типового наконечника забезпечують потоки води, що підводяться по кільцевому каналу між кисневою і проміжною трубами.

У такому наконечнику, як встановили автори [8,9], на охолодження центральної частини наконечника використовується тільки 30-40% води, що подається, а 60-70% розвертається в районі розділової труби і захоплюється потоками, що відводяться. Внаслідок нестачі води, яка підводиться, швидкості потоків у тепловідвідній поверхні центральної частини вінця наконечника фурми невисокі, що не забезпечує належного охолодження і високої стійкості наконечника.

У типовому наконечнику кількість охолоджувальної води, що потрапляє в центральну частину наконечника, визначають тиском підведеної води, міжсоплові відстані і розташуванням проміжної труби h над внутрішньою поверхнею торця наконечника. В умовах моделювання проміжок між кінцем розділової труби і внутрішньою поверхнею вінця наконечника вибирали встановлюваному зазвичай на практиці.

Міжсоплові простори задавали з умови розташування п'яти сопел в типовому наконечнику кисневої фурми для 160 тонних конвертерів. Кут нахилу сопел 20° .

Товщина стінки сопла вибрана при моделюванні відповідала товщині стінки сопла на практиці.

Результати моделювання підтвердили, що основна частина води, що підводиться, розвертається поблизу розділової труби (потоки 2 на рис. 3.1) і практично не бере участі в охолодженні центральної частини наконечника кисневої фурми, оскільки захоплюється потоками, що відводяться, 3. Лише частина води, що

підводиться 4 (рис. 3.1) між соплами «продавлюється» в центральну область наконечника і омиває внутрішню поверхню вінця.

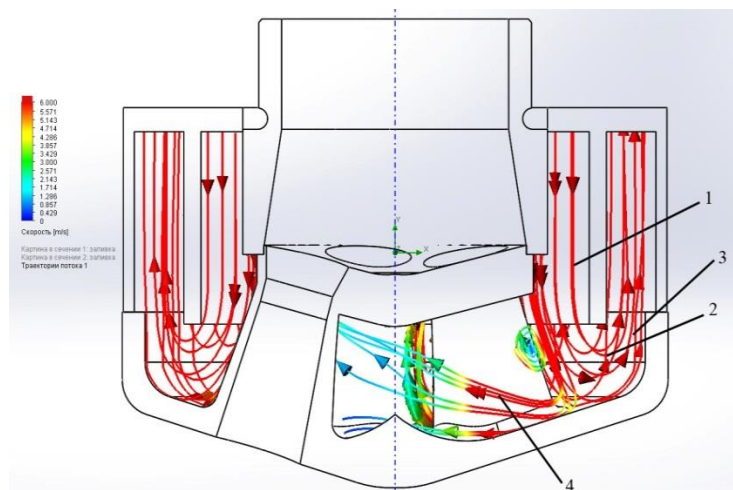


Рис. 3.1. Рух потоків охолоджувальної води в типовому наконечнику фурми (1 - потоки, що підводяться; 2 – потоки, які розвертаються в районі розділової труби; 3 - потоки, що відводяться; 4 - потоки між соплами і потоки, що підводяться в центральну частину наконечника)

На рис. 3.2 в перерізі наконечника область 1 характеризується невисокими швидкостями потоків, що підтверджує недостатній поступ охолоджувальної води між соплами в центральну частину наконечника.

Зі збільшенням тиску води, що підводиться для охолодження, швидкості потоків збільшуються, проте, в центральній частині не досягаються необхідні для ефективного охолодження швидкості обтікання тепловідвідних поверхонь.

Для підтвердження останнього досліджували поля швидкостей потоків охолоджувальної води безпосередньо у тепловідвідних внутрішніх поверхонь вінця наконечника. Результати приведені на рис. 3.3.

Зони з невисокими швидкостями течії води біля тепловідвідної поверхні вінця наконечника на рис. 3.3 забарвлені в синій колір і розташовані в центральній частині наконечника і міжсопловими просторами. Окремі ділянки в центрі мають темніший синій колір, що свідчить про швидкості руху охолоджувальної води менш 1м/сек. В

цілому, область з невисокими швидкостями течії води біля внутрішньої поверхні в центрі вінця характеризується швидкостями 3м/сек. і менше.

Дослідження показали, що зі збільшенням тиску води, що підводиться, площа недостатньо охолоджуваної поверхні вінця зі швидкостями обмивання 3м/сек. і менш істотно зменшується.

Таким чином, збільшення тиску і витрати води, що підводиться, зменшує зони недостатнього охолодження і ризик розпалу - прогару вінця наконечника.

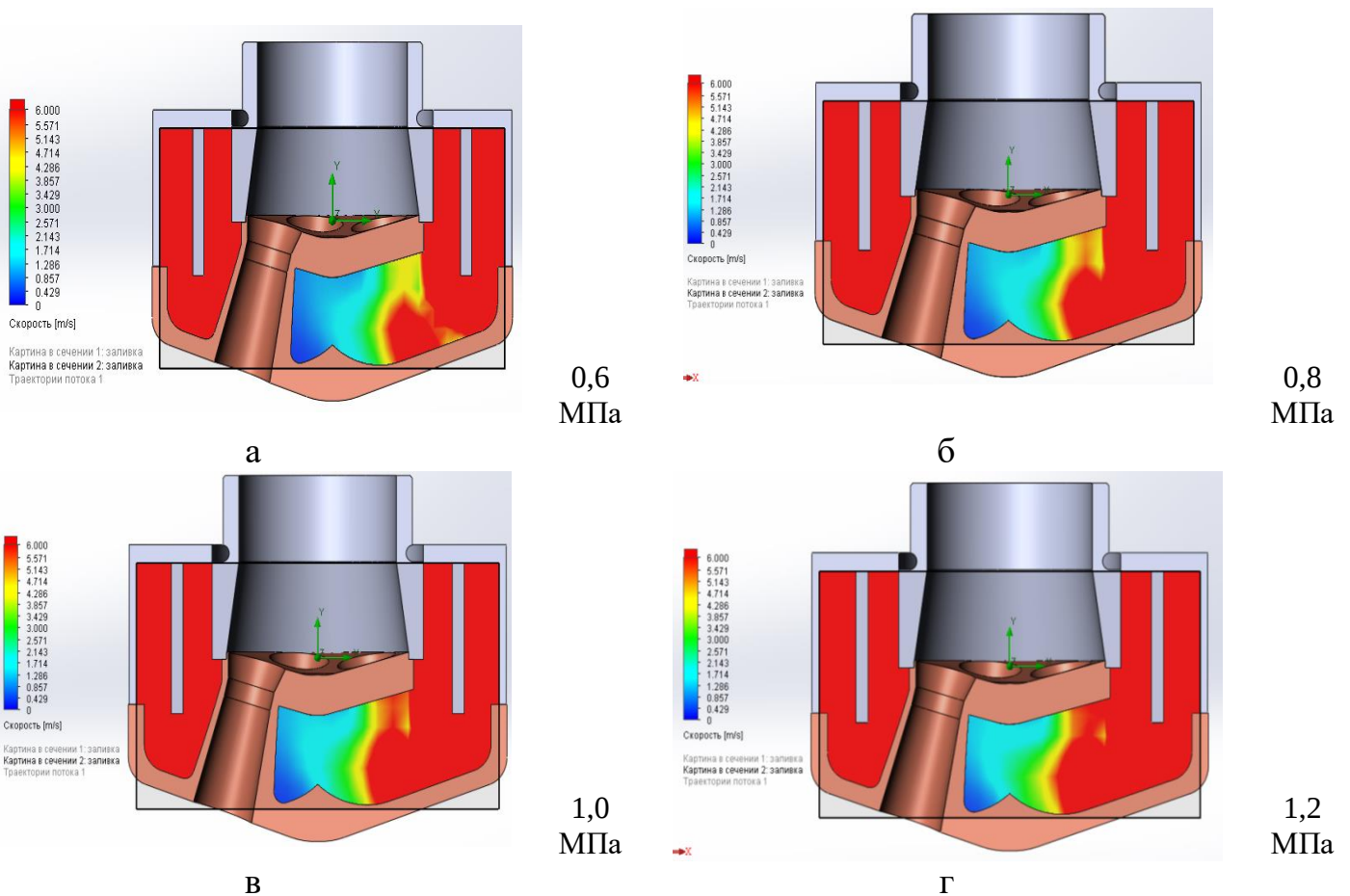


Рис. 3.2. Поля швидкостей потоків охолоджувальної води в перерізі наконечника фурми (а, б, в, г - тиск води, що підводиться; 0,6; 0,8; 1,0 і 1,2 МПа, відповідно)

В той же час, навіть при тиску води, що підводиться 1,0; 1,2 МПа мають місце внутрішні поверхні недостатнього охолодження, в т.ч. в навколосоплових зонах, розташованих ближче до центру. Тут, найімовірніше, і утворюються «застійні»

зони, непрямим підтвердженням їх формування є сегментний розпал зовнішніх навколосоплових зон близьких до центру.

В цілому, результати математичного моделювання показали, що конструкція типового наконечника і організація охолодження в ньому не забезпечують швидкості потоків у тепловідвідних внутрішніх поверхнях вінця достатніх для ефективного охолодження. В практиці спостерігаються невисокі стійкості наконечників такої конструкції і знос навколосоплових зон (ближніх до центру) на зовнішній поверхні вінця в результаті неефективного охолодження.

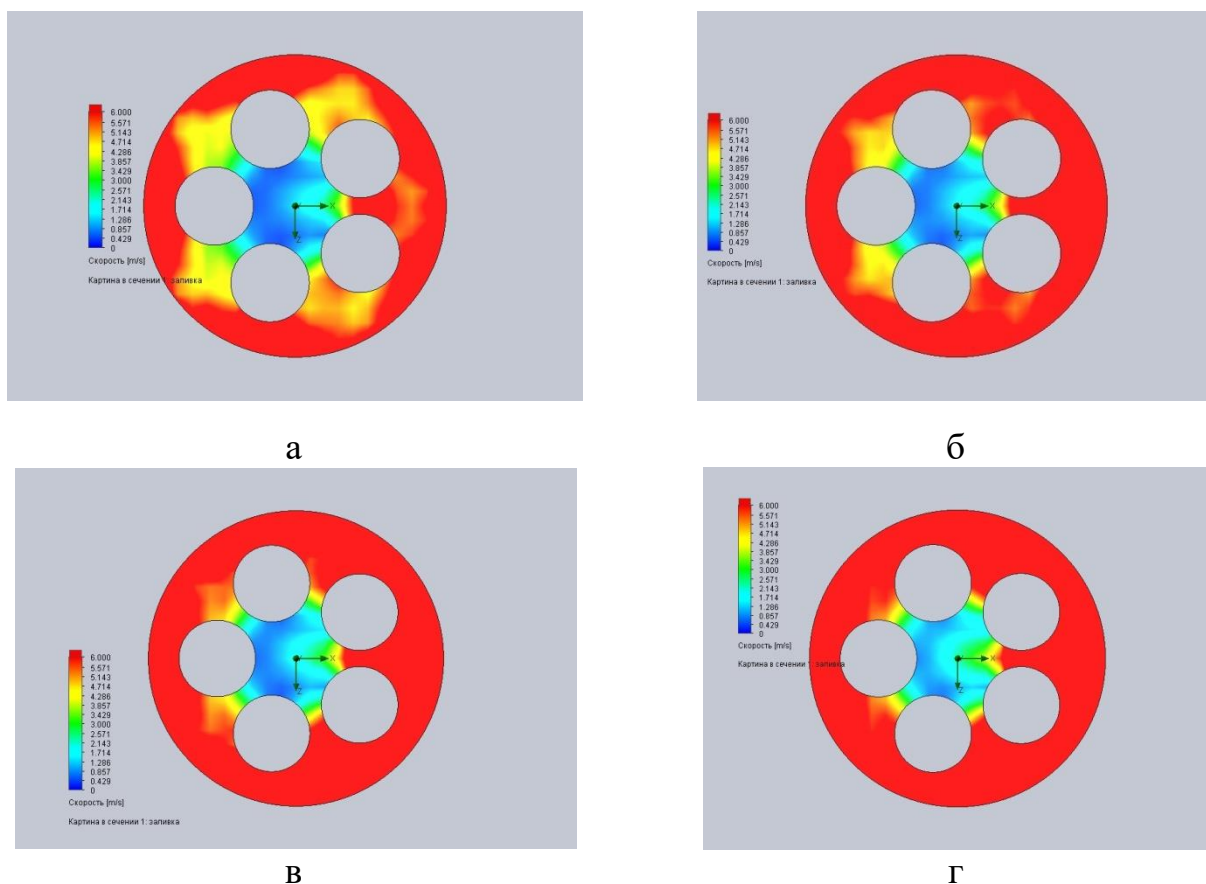


Рис. 3.3. Поле швидкостей потоків охолоджувальної води біля тепловідвідної внутрішньої поверхні вінця наконечника (а, б, в, г - відповідно, при тисках 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 МПа; 1 - швидкість потоків 1-3м/сек і менш)

3.2. Наконечник з направляючою тарілкою

Досліджено охолодження наконечника у разі розміщення в ньому направляючої тарілки (рис. 3.4). Незважаючи на периферійне підведення води, тарілка 1 направляє охолоджувальні потоки 2 в центральну і міжсоплову частину наконечника.

Охолоджувальні потоки з високою швидкістю поступають до центру вінця наконечника, омивають його внутрішню поверхню і далі між соплами відводяться на периферію і в канал, утворений проміжною і зовнішньою трубами.

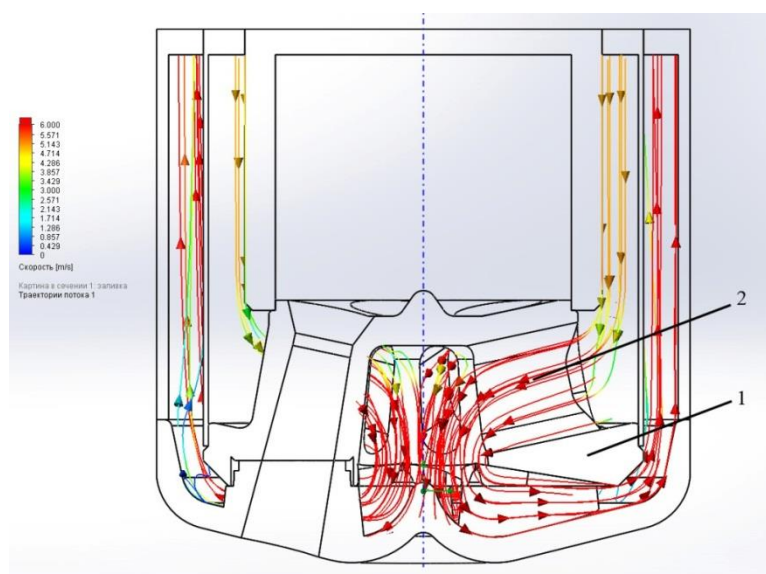


Рис. 3.4. Рух охолоджувальних потоків в наконечнику з направляючою тарілкою;

1, 2 - охолоджувальні потоки води

Як показано на рис. 3.5 швидкості потоків в центральній частині наконечника досить високі і істотно перевищують 6м/сек.

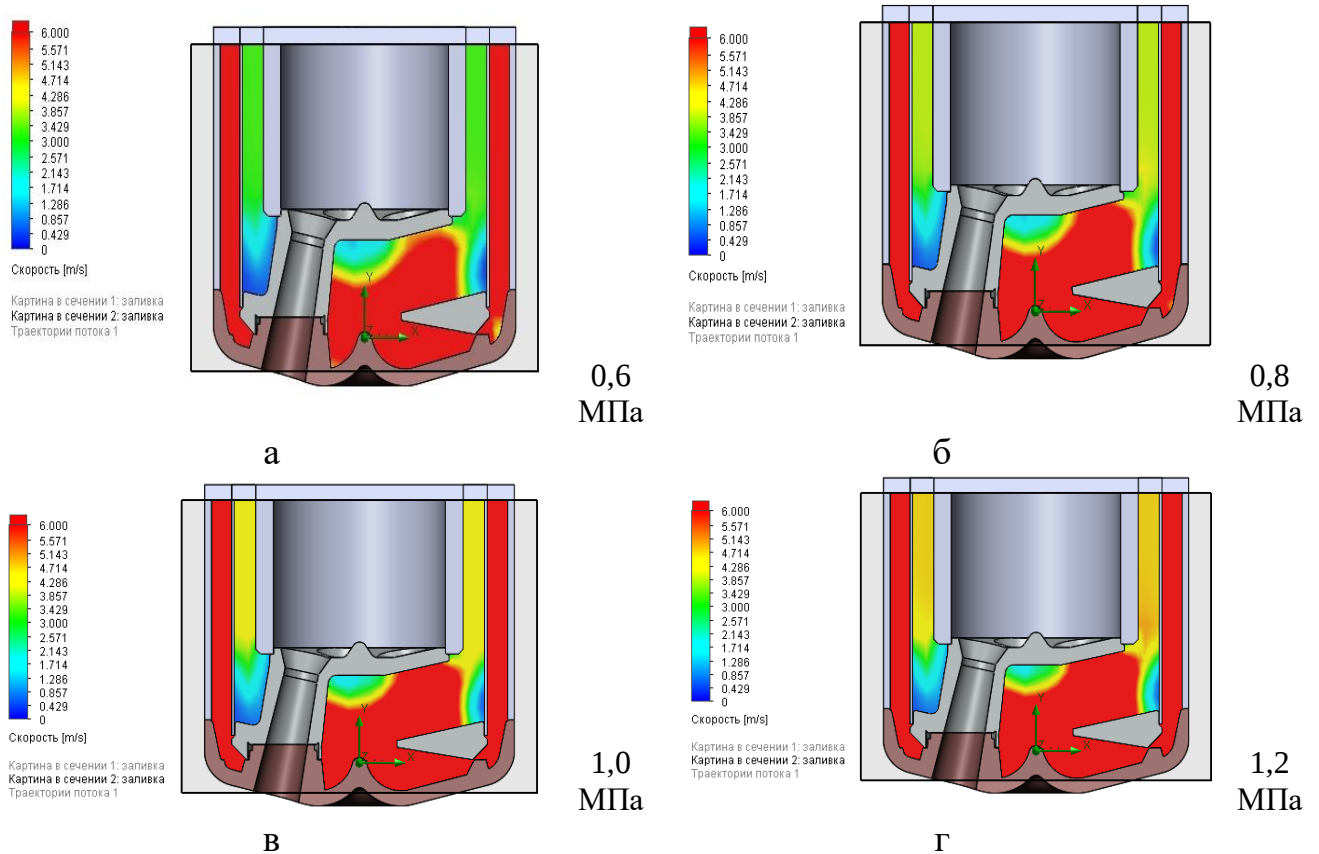


Рис. 3.5. Поля швидкостей охолоджувальної рідини в наконечнику з розділовою тарілкою при різних тисках води, що підводиться, 0,6; 0,8; 1,0 і 1,2 МПа

На рис. 3.5 приведені поля швидкостей охолоджувальних потоків біля внутрішньої тепловідвідної поверхні вінця наконечника.

Основна площа внутрішньої тепловідвідної поверхні вінця наконечника (на рис. 3.5 забарвлена в червоний колір), на відміну від типового наконечника, омивається потоками зі швидкостями більше 6м/сек, що свідчить про досить ефективне охолодження.

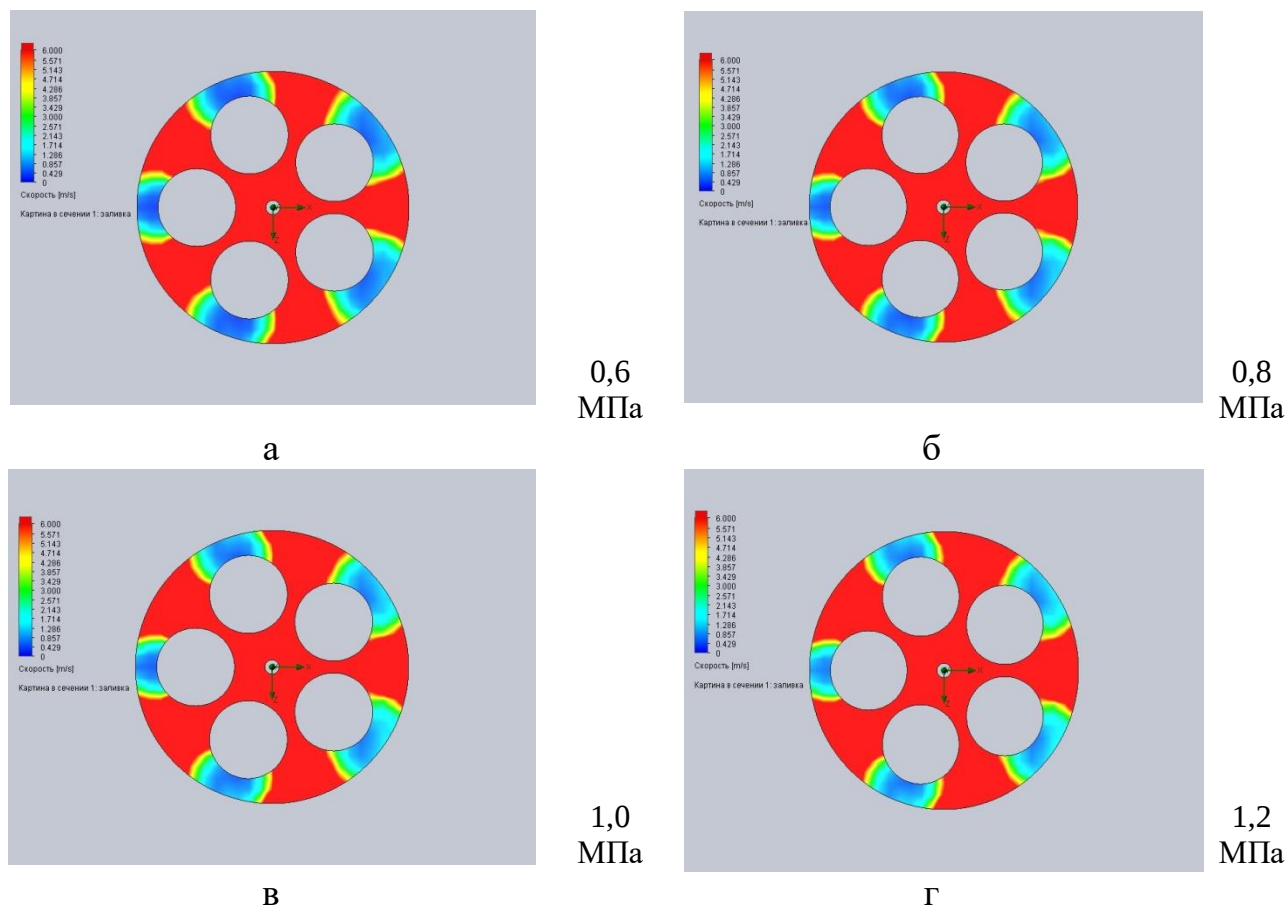


Рис. 3.6. Поля швидкостей потоків охолоджувальної води в перерізі наконечника з направляючою тарілкою (а, б, в, г - тиск води, що підводиться: 0,6; 0,8; 1,0 і 1,2 МПа, відповідно)

На периферії, після обтікання сопел, потоки охолоджувальної води втрачають швидкість і за соплами утворюються «застійні» зони 1 (забарвлені на рис. 3.6 в синій колір). Тут, біля поверхні, швидкості потоків складають 1-2м/сек і менш, чого не досить для ефективного охолодження. У місцях примикання «застійних» зон до сопел темніший синій колір свідчить про швидкість течії $< 0,5$ м/сек.

При таких швидкостях навіть при щільності теплового потоку $0,4$ МВт/м відбувається перехід від режиму однофазної конвекції охолоджувальної води до режиму поверхневого кипіння, що супроводжується практично стрибкоподібним підйомом температури внутрішньої поверхні наконечника. При підвищенні щільності теплового потоку, наприклад до 5 МВт/м² режим бульбашкового кипіння

може перейти в плівковий, різко знижується коефіцієнт тепловіддачі і, як наслідок, ще більше зростає температура наконечника аж до його розплавлення.

Очевидно, саме ці процеси в «застійних» зонах призводять до деякого розпалу навколосоплових зон з боку периферії на зовнішній поверхні вінця наконечника.

Слід зазначити, що розпал в цьому випадку несумірно менший порівняно із тим, який спостерігається на типовому наконечнику з протилежного боку виходу сопла.

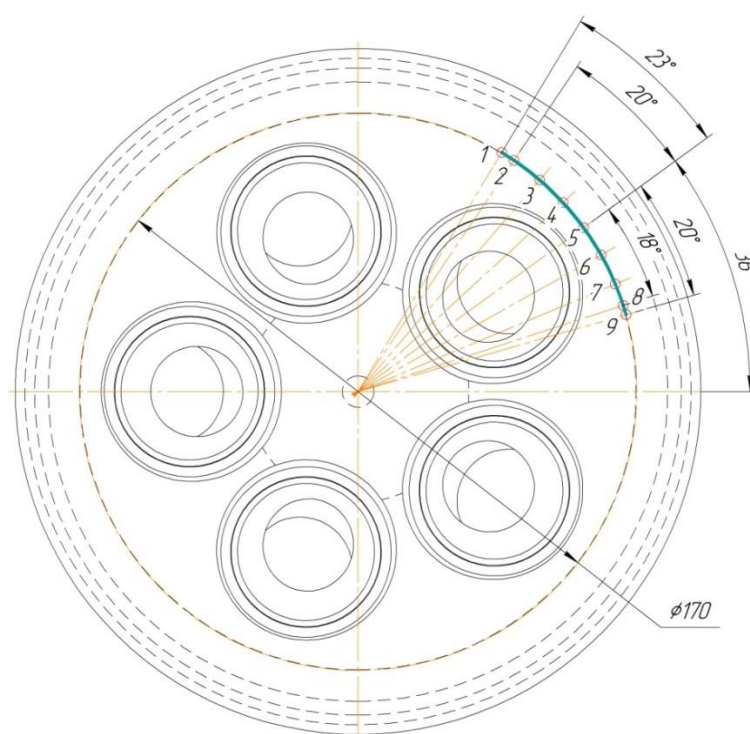


Рис. 3.7. Сектор і точки сканування швидкостей потоків за соплами біля внутрішньої поверхні вінця наконечника

Вплив збільшення витрати (тиску) охолоджувальної води, що подається, на розміри «застійних» зон не такий істотний як в типовому наконечнику. І при відносно високих для промислових умов тисках «застійні» зони мають місце (рис. 3.6), а збільшення тиску (витрати) подання охолоджувальної води, наприклад з 0,6МПа до 1,0МПа зменшує площу «застійних» зон на 15-25%.

Математична модель передбачала сканування швидкостей потоків за соплом в точках 1 - 9 на рис. 3.7. На рис. 3.8 узагальнені результати моделювання. В точках сканування 1 і 9 швидкості потоків досить високі.

У міру зміщення за сопло від точки 1 до точок 2 - 3 і далі, від точки 9 до точок 8 - 7 і далі фіксували істотне зниження швидкості обтікання. Вже в точках 2 і 8 швидкості обтікання складали 2,5 - 4 м/сек. (при тисках 0,6-1,2 МПа). Точки сканування 3, 4, 5, 6, 7 знаходилися у вираженій «застійній» зоні. У ній фіксували швидкості потоків менше 1м/сек. незалежно від тиску води, що підводиться на охолодження.

Незважаючи на існуючі застійні зони, напрямна тарілка в наконечнику дозволяє радикально змінити напрями потоків охолоджувальної рідини, організувати поліпшене охолодження поверхні вінця наконечника кисневої фурми. Як результат, наконечники з направляючою тарілкою мають істотно більшу стійкість порівняно з типовим наконечником (у 2 - 3 і більше разів).

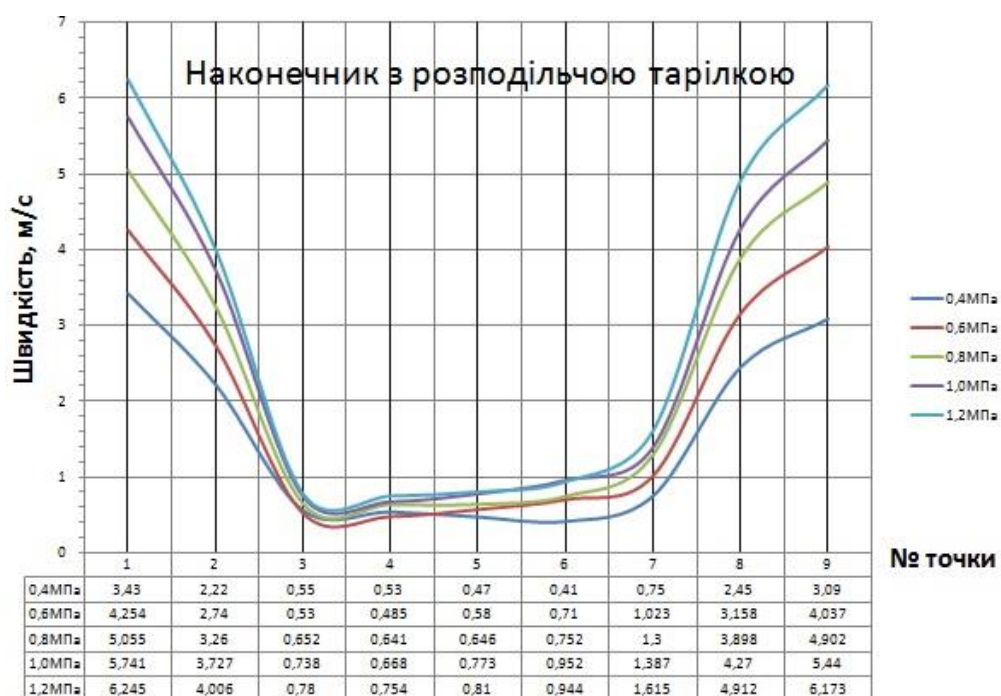


Рис. 3.8. Швидкість потоків в точках сканування

3.3. Наконечник з направляючою тарілкою і кутовими розсікачами потоків

У роботі [101] ефективне охолодження застійних зон досягали установкою за кожним соплом за ходом руху води спеціальних направляючих лопатей у формі півкільця, що і дозволяє направити охолоджувальну воду за сопла.

Автором запропонована установка між соплами на внутрішній поверхні вінця кутових розсікачів потоків (рис. 3.9). Кутові розсікачі змінюють організацію руху охолоджувальної води між соплами і за соплами. Потік води між соплами ділиться кутовим розсікачем на два у співвідношенні 50:50 і спрямовується розсікачем за сопла, де забезпечуються більш високі швидкості течії охолоджувальної рідини і кращий теплозйом з внутрішньої поверхні «застійних» зон.

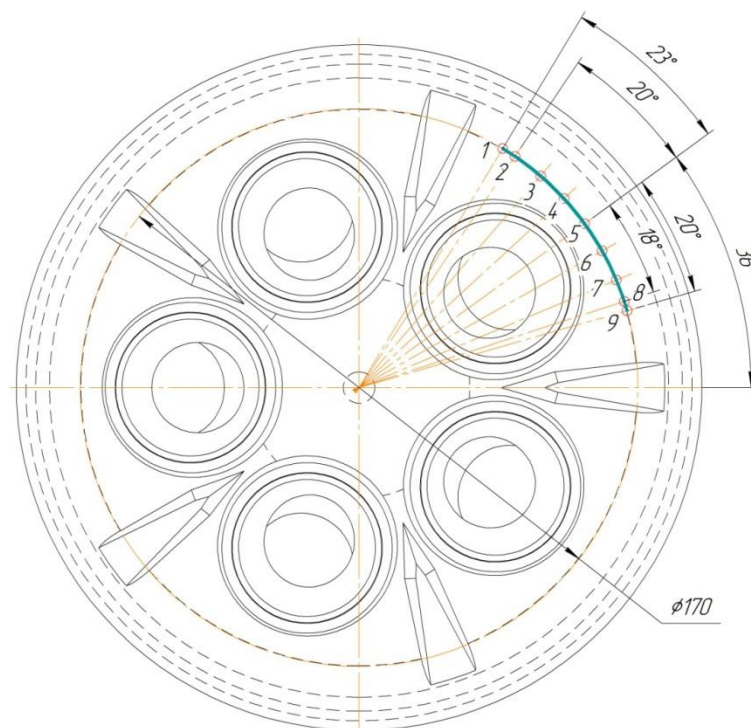


Рис. 3.9. Кутові розсікачі і точки сканування швидкостей потоків за соплами біля внутрішньої поверхні вінця наконечника

Як показали результати моделювання завдяки організованому поданню охолоджувальної води за сопла розміри «застійних» зон зменшуються (рис. 3.10). В

той же час, наявність кутових розсікачів не призводить до зникнення «застійних» зон, хоча швидкості руху охолоджувальної води в зоні «застою» збільшуються.

Швидкості потоків в точках сканування 1-9 (рис. 3.7) приведені на рис. 3.11. Так, якщо для наконечника з розділовою тарілкою «застійні» зони зі швидкостями потоків менше 1 м/сек відмічали на ділянці сканування від 3-ої до 7 точки, а зі швидкостями потоків менше 4 м/сек. від 2 до 8, то за наявності кутових розсікачів, відповідно, від 4 до 6 точки і від 3 до 7 точки.

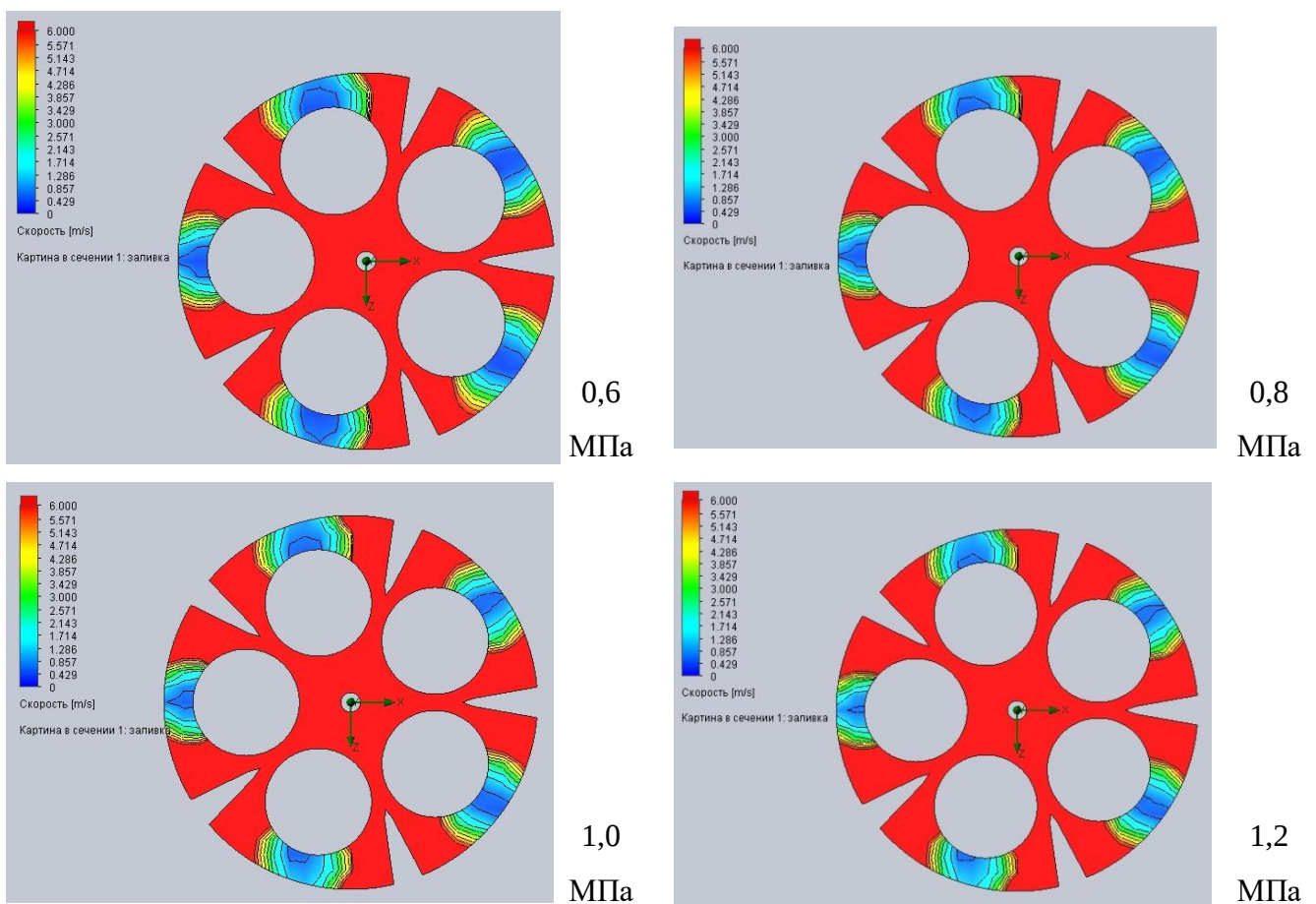


Рис. 3.10. Поля швидкостей потоків охолоджувальної рідини біля внутрішньої поверхні вінця наконечника з кутовими розсікачами при різних тисках води, що підводиться

Таким чином, наявність кутових розсікачів дозволяє інтенсифікувати охолодження в області «застійних» зон, зменшити розміри останніх, але не виключає формування «застійних» зон за соплами.

3.4 Наконечник з направляючою тарілкою і турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда на внутрішній поверхні вінця

Результати математичного моделювання течії охолоджувальної води біля внутрішньої поверхні вінця в наконечнику з направляючою тарілкою і турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда довели, що «застійні» зони в такому випадку відсутні (рис. 3.12).

Швидкості омивання в навколосоплових зонах внутрішньої поверхні вінця достатньо високі і складають більше 5-6м/сек.

Зміна швидкості потоків в точках сканування 1-9 (рис. 3.13) наведені на рис. 3.14 в мірі обтікання сопла швидкість потоків від точки 1 до точки 9 зменшується, однак на всій ділянці за соплом швидкість потоків достатня та забезпечує ефективне охолодження.

Порівняння швидкостей потоків в точках сканування 1-9 в наконечниках різних конструкцій наведено на рис. 3.15. Відносно великі «застійні» зони за соплами, де швидкості потоків нависокі, формуються в наконечнику з направляючою тарілкою. Наявність кутових розсікувачів дозволяє змінити організацію руху охолоджувальної води і зменшити зону за соплами з невисокими швидкостями охолоджувальної води. При організації обтікання сопел охолоджувальною водою за допомогою турбулізаторів у вигляді спіралі Архімеда «застійні» зони відсутні.

Таким чином, оптимальною конструкцією наконечника кисневої фурми з точки зору ефективного охолодження тепловідводного вінця є конструкція з направляючою тарілкою і вінцем з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда.

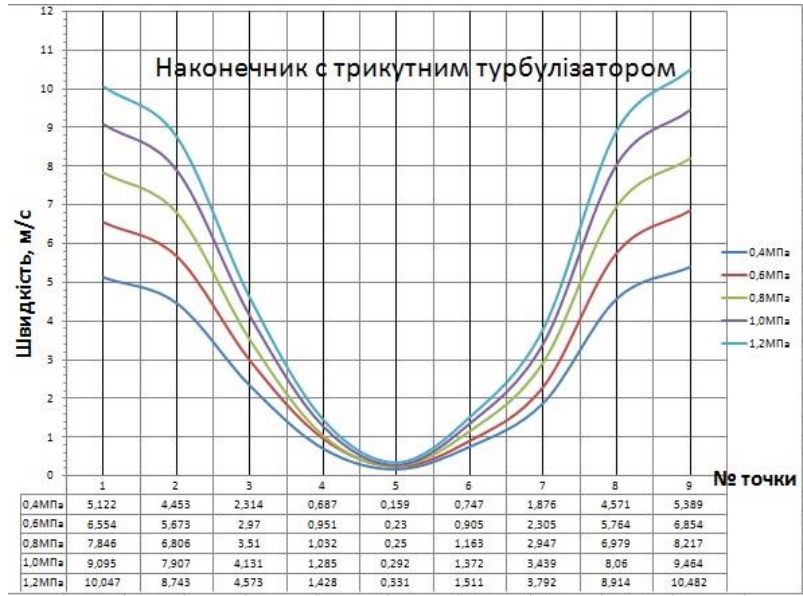


Рис.3.11. Швидкість охолоджувальних потоків в точках сканування

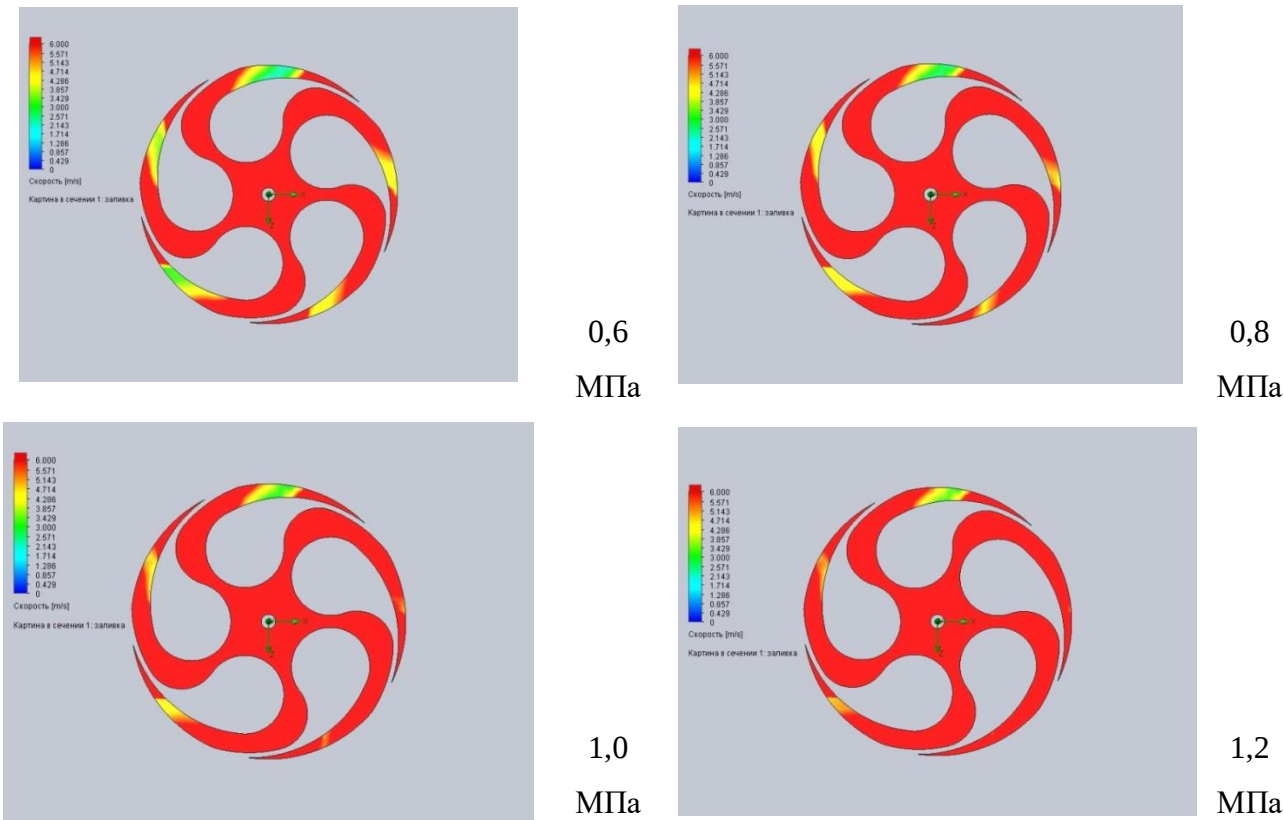


Рис. 3.12. Поля швидкостей біля внутрішньої поверхні наконечника з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда (при тиску води, що підводиться, 0,6; 0,8; 1,0 і 1,2 МПа)

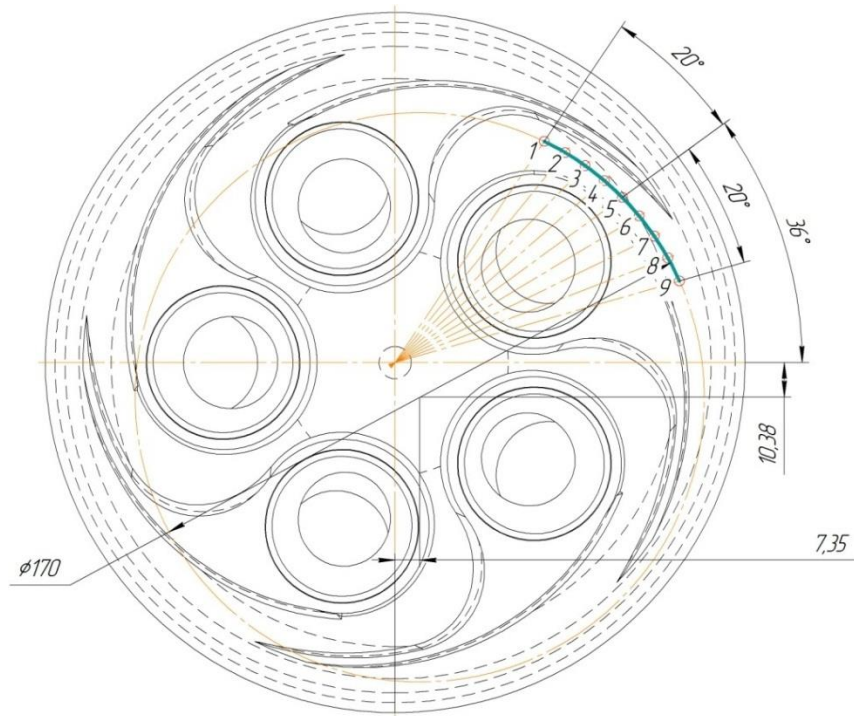


Рис. 3.13. Сектор і точки сканування швидкостей потоків за соплами в наконечнику з турбулізатором у вигляді спіралі Архімеда



Рис. 3.14. Зміна швидкостей потоків охолоджувальної води в точках сканування біля поверхні вінця в наконечнику з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда

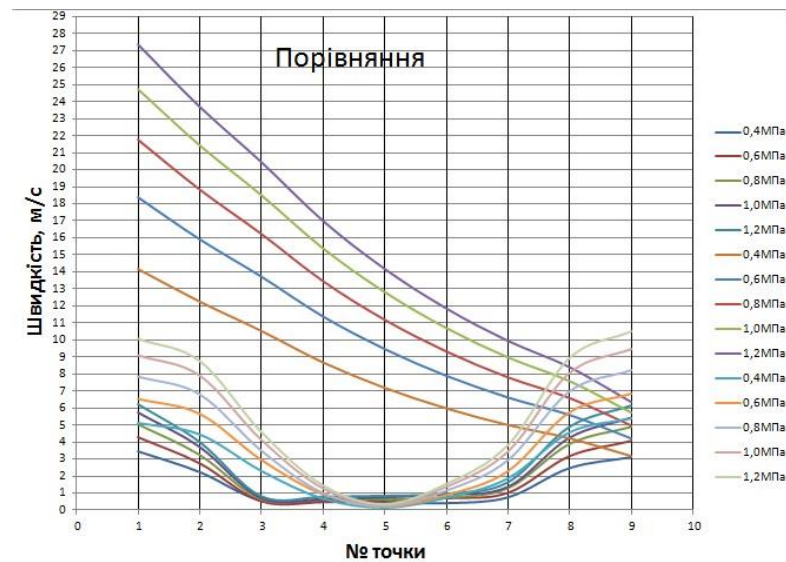


Рис. 3.15. Порівняння швидкостей потоків охолоджувальної води в точках сканування біля поверхні вінця в наконечниках запропонованих конструкцій

3.5 Наконечник з центральним підведенням води

Конструкція кисневої фурми з центральним водяним охолодженням приведена на рис. 1.5.

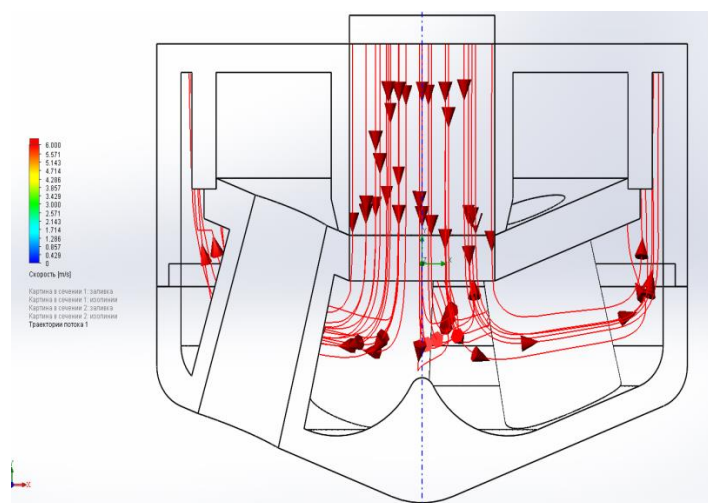


Рис. 3.16. Рух потоків охолоджувальної води в наконечнику з центральним підведенням води

В цьому випадку охолоджувальна вода по внутрішній трубі поступає безпосередньо в центральну частину наконечника і рухається від центру в міжсоплових перерізах до периферії.

На рис. 3.16 приведений рух охолоджувальної води і швидкості потоків в центральній частині і на периферії наконечника. Рух охолоджувальної води більше організований і забезпечує краще охолодження наконечника в цілому. Останнє підтверджується практикою експлуатації кисневих фурм з центральним підведенням охолоджувальної води, стійкість наконечників в яких, як правило, вище порівняно з наконечниками з периферійним підведенням води.

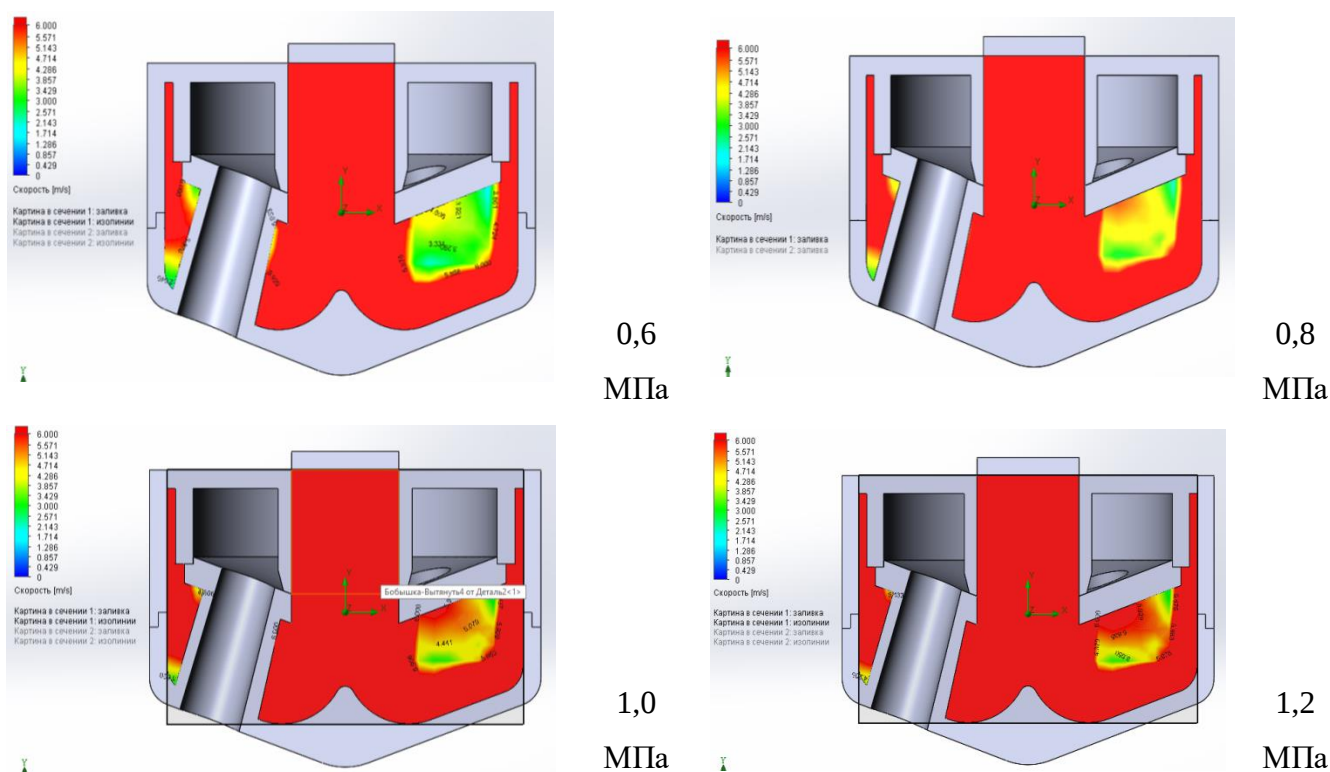
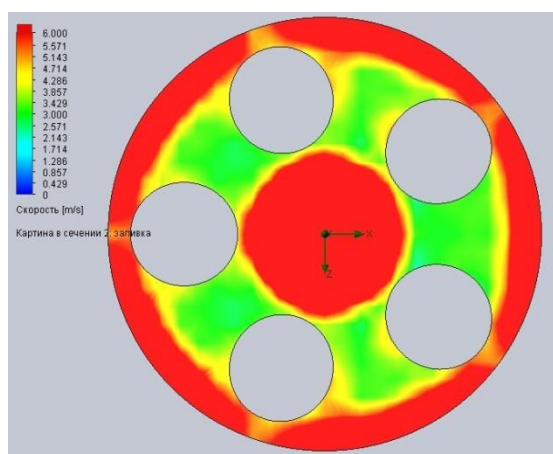


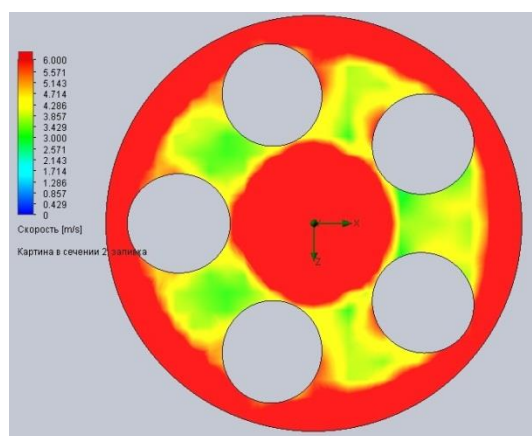
Рис. 3.17. Поля швидкостей охолоджувальної води біля тепловідвідної поверхні вінця наконечника фурми з центральним підводом води

Поля швидкостей охолоджувальної води біля тепловідвідної поверхні вінця наконечника фурми з центральним підведенням води (рис. 3.18) принципово відрізняються від формованих при периферійному підведенні охолоджувальної води, у тому числі, в наконечнику з направляючою тарілкою (рис. 3.5). У разі

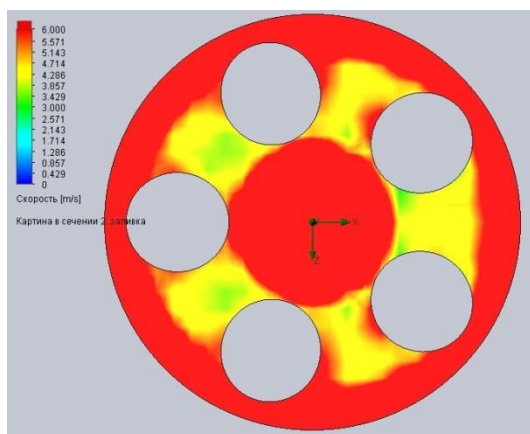
центрального підведення води «застійні» зони біля внутрішньої поверхні вінця наконечника відсутні. Деяке зниження швидкості течії води відзначається в міжсоплових зонах. При цьому навіть при тиску води, що підводиться, 0,6МПа швидкості потоків в міжсоплових зонах більше 3м/сек. З підвищенням тиску швидкості потоків збільшуються і, наприклад, при тиску 1,0МПа відзначаються мінімальні швидкості течії 4м/сек. і більше.



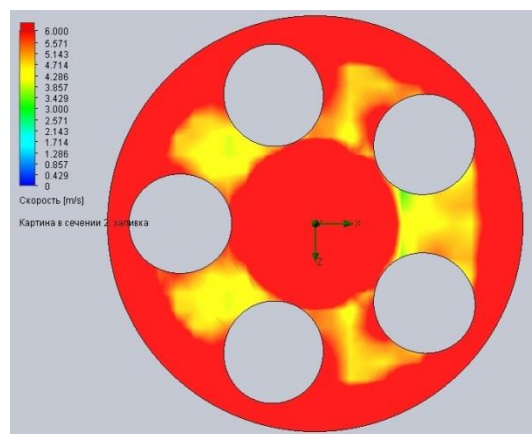
а



б



в



г

Рис. 3.18. Поля швидкостей охолоджувальної води біля тепловідвідної внутрішньої поверхні вінця наконечника фурми з центральним підводом води (а, б, в, г - відповідно при тисках 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 МПа)

Таким чином, вірогідність розпау навколосоплових зон на зовнішній поверхні вінця наконечника кисневої фурми мінімальна.

У киснево-конвертерних цехах з великовантажними конвертерами застосовують кисневі фурми з центральним підведенням води. Стійкість наконечників в цьому випадку визначається тріщиноутворенням в зонах зварювання сопел з вінцем і вінця із зовнішньою трубою. Істотного розпалу навколосоплових зон не фіксували.

Висновки до третього розділу

Виконано математичне моделювання руху потоків охолоджуючої води в наконечнику фурми та біля тепловідвідної внутрішньої поверхні вінця наконечника.

Результати математичного моделювання показали, що конструкція типового наконечника і організація охолодження в ньому, не забезпечують швидкості потоків у тепловідвідних внутрішніх поверхнях вінця достатніх для ефективного охолодження.

Доведено, що напрямна тарілка в наконечнику дозволяє радикально змінити напрями потоків охолоджувальної рідини, організувати поліпшене охолодження поверхні кисневої фурми. Разом з тим, після обтікання сопел, потоки охолоджувальної води втрачають швидкість і за соплами утворюються «застійні» зони, в яких, біля поверхні, швидкості потоків складають 1-2м/сек і менше.

Запропоновані кутові розсікачі дозволяють інтенсифікувати охолодження в області «застійних» зон і зменшити розмір останніх, але не призводять до їх ліквідації.

Доказано, що при організації охолоджуючих потоків за рахунок спіралі Архімеда в наконечнику з прямою тарілкою «застійні» зони за соплами відсутні, а швидкості омивання в за соплових зонах складають більше 5-6м/сек.

Доведено, що оптимальною конструкцією наконечника фурми з точки зору ефективного охолодження тепловідвідного вінця є конструкція з прямою тарілкою і вінцом з турбулізаторами в вигляді спіралі Архімеда.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА НОВИХ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ І ЗБОРКИ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ

4.1. Розробка, моделювання технологічного процесу і виготовлення заготовок (вінця і сталевих соплового блоку) наконечника фурми

У практиці формотворними методами виробництва наконечників кисневих фурм є лиття, штампування і технології механічної обробки мідних і сталевих заготовок [51-65].

При виготовленні мідних наконечників (із застосуванням нових методів лиття) не забезпечуються герметичність і теплопровідність матеріалу, якість робочих поверхонь через раковини та неметалеві включення.

Складність виробництва виливків з чистої міді і пов'язана з низькою міцністю міді при температурах, близьких до температури плавлення, що може формувати тріщини в литті. Для боротьби з утворенням тріщин використовують максимально розкислений розплав без надлишку фосфору, застосовують формувальні суміші, що не перешкоджають усадці виливки при кристалізації і охолодженні, задають технологію, що забезпечує необхідну спрямованість кристалізації і сприяє зменшенню усадкових напружень у виливку, який охолоджується. Технологія виробництва в сухі піщані форми із холоднотвердіючих сумішей не забезпечує необхідної якості виробу через газоусадкову пористість, окислення міді в процесі заливки в форму [52].

Розроблені конструкції цільноточених наконечників фурм показали їх досить високу технологічну ефективність при виплавці сталі [57]. Однак саме їх виготовлення з цільної заготовки з прокату є нетехнологічним, тому що значна частина дорогої міді йде в стружку. Окрім цього, як зазначають самі автори, під час експлуатації відбувається характерний знос (розпал) торцевої поверхні наконечника в зоні зосередження проточок соплового блоку, які відводять воду. Це викликано нерівномірністю умов охолодження через спрямованого однорівневого руху води.

Тому ресурсозберігаючі методи формоутворення заготовок деталей наконечників і їх виготовлення з мінімальною собівартістю є найбільш перспективними [65-67].

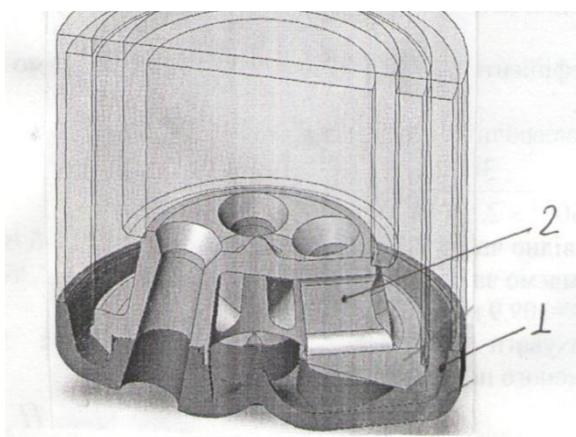


Рис. 4.1. 3D модель деталей наконечника киснево-конвертерної фурми: 1 – мідний вінець; 2 – сталевий сопловий блок із направляючою тарілкою

У наконечнику киснево-конвертерної фурми, розробленої авторами (рис. 4.1), основними частинами є мідний вінець 1 і сталевий сопловий блок 2, виконані штампуванням в закритих штампах.

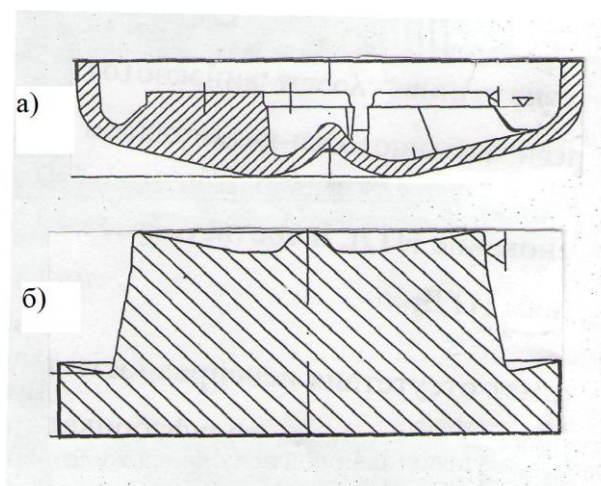


Рис. 4.2. Штамповані заготовки наконечника фурми: а) – мідного вінця б) – сталевого соплового блоку з направляючою тарілкою

Для виготовлення мідного вінця використовували мідний пруток М1 діаметром 120 мм, порізаний на мірні довжини. Розміри заготовок і поковок розраховували за прийнятими методиками виходячи з рівності обсягів металу із урахуванням витрат на чад і відходи.

Використання циліндричної заготовки для отримання досить складного геометричного тіла (рис. 4.2 а), передбачає кілька стадій обробки.

Особливо це стосується мідного вінця, тому що фізико-механічні властивості міді (перш за все висока теплопровідність) призводять до швидкої втрати температури під час штампування і, тим самим, до геометричних погрішностей вінця та інших дефектів.

Для штампування заготовок мідного вінця і сталевого соплового блоку наконечника фурми розроблені штампи збірної конструкції, що складаються з постійного пакета і змінних робочих частин (рис. 4.3, 4.4).

Пакет складається з верхньої і нижньої частин і включає чотири основні групи деталей: опорно-несучі деталі (башмаки, плити), направляючі деталі (колонки, втулки), деталі для установки і кріплення інструменту (державки, пуансонотримачі, притиски) деталі виштовхуючого механізму (виштовхувачі, втулки та ін.). Змінними робочими частинами є матриці, пуансони, виштовхувачі.

Технологію штамповки заготовки мідного вінця в розробленому штампі моделювали із використанням програмного продукту MSC Super Forge.

З метою відстеження поверхні оброблюваної деталі в ході моделювання в MSC Super Forge застосовували концепцію фасеточної (багатогранної) поверхні (facet surfact).

При цьому витікання матеріалу крізь сітку Ейлера автоматично обмежувалося геометрією поверхні, що складається з трикутних граней. Ці межі становили собою не кінцеві елементи, а геометричні об'єкти, які в сукупності забезпечували зручний механізм відстеження форми поверхні модельованої деталі.

Рух фасетної поверхні обмежували властивостями укладеного в ній матеріалу і тим самим задавали точне прикладання граничних умов не тільки при впливі інструменту, але і в разі вільної поверхні самої деталі.

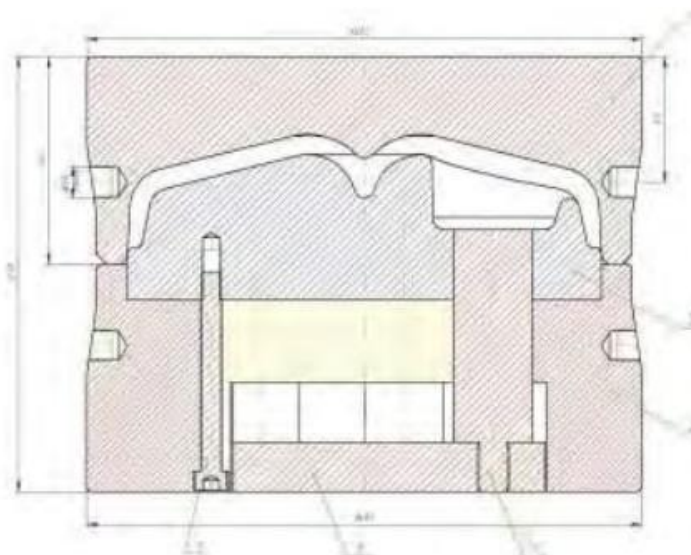


Рис. 4.3. Схема штампа для об'ємного штампування заготовки мідного вінця фурми:

1 – матриця; 2 – обойма; 3 – пуансон; 4 – виштовхувач

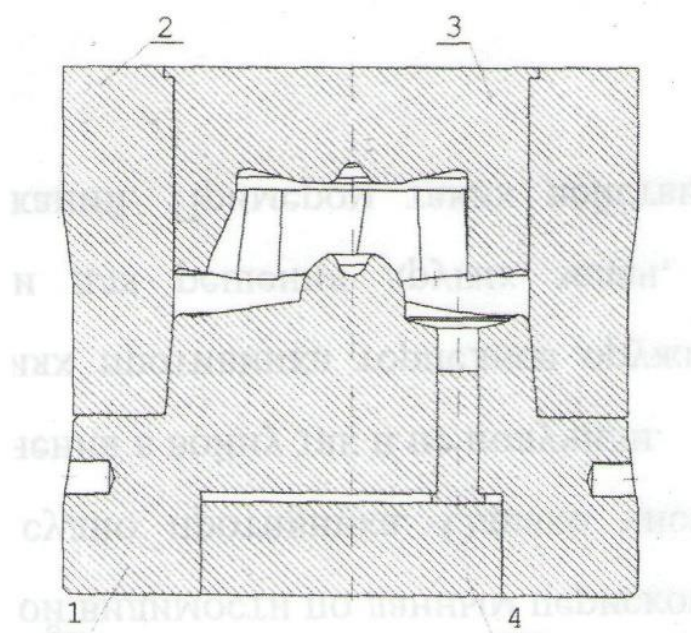


Рис. 4.4. Схема штампа для об'ємного штампування заготовки сталевого соплового блоку фурми: 1 – матриця; 2 – обойма; 3 – пуансон; 4 – виштовхувач

Програма MSC Super Forge дає можливість автоматично підвищувати точність представлення фасеточної поверхні в процесі моделювання за допомогою алгоритму

– Resolution Enhancement Technology (RET). Постійне підвищення точності відображення багатогранної поверхні необхідне для адекватного відстеження деталі, яка змінюється в бік ускладнення геометрії. Алгоритм RET в процесі деформації оброблюваної деталі дозволяв використовувати порівняно грубу первісну фасеточну поверхню для подання простої геометрії заготовки, а потім, в процесі моделювання, покращувати відображення всіх особливостей геометрії, що ускладнюється.

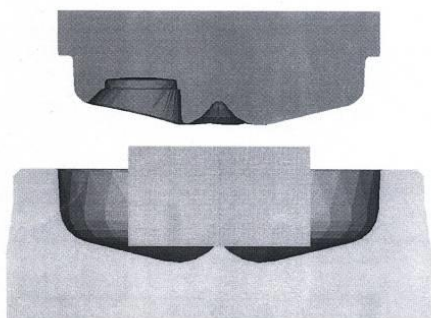
Взаємодія між жорстким інструментом (штампом) та матеріалом заготовки, який деформується, моделювали в умовах контактних поверхонь між інструментом і поверхнею заготовки. В процесі моделювання контактні умови постійно оновлювали, відображаючи рух інструмента і деформацію матеріалу, фактично моделюючи ковзання між пуансоном, матрицею і матеріалом оброблюваного вінця.

Із рекомендованого діапазону 1050-750°C температур гарячої деформації міді [62] прийнято нагрів вінця наконечника фурми – 800°C. При цій температурі відбувається незначна анізотропія механічних властивостей, що викликає утворення фестонів при глибокій витяжці. Моделювання процесу штампування (для дугостаторного 250-ти тонного преса), при такій температурі, показало, що заготовку треба нагрівати двічі, при цьому процес поділяли на кілька стадій з різними зусиллями штампування в процентному відношенні від максимального зусилля преса. Після першого нагріву деформація заготовок проходила за відсутності її контакту з бічними стінками порожнини штампа. На цій стадії відбувається осадка, вдавлювання металу в заглиблення (рис. 4.5).

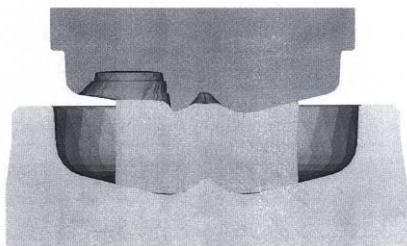
На останній стадії заготовка заповнює порожнину штампа і забезпечує умови заповнення металом кутів порожнини (рис. 4.6).

Для забезпечення видалення поковки з порожнини штампа бічні стінки порожнини виконують з ухилом, а сам штамп забезпечений виштовхувачами (рис. 4.7).

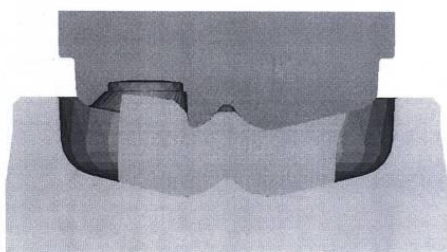
0%



30%



70%



100%

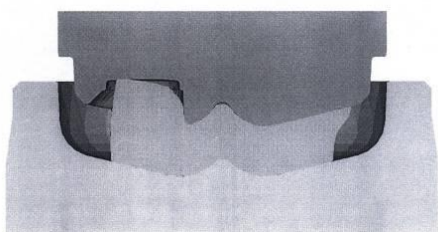
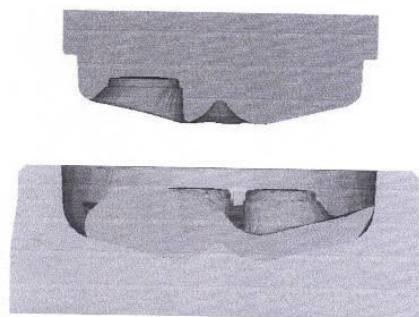
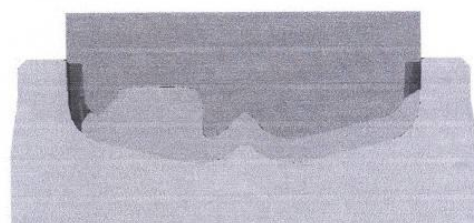


Рис. 4.5. Моделювання пластичності міді при штампуванні вінця (1-е нагрівання)

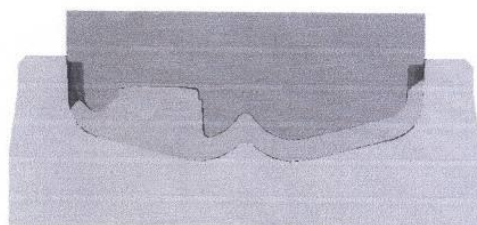
0%



30%



70%



100%



Рис. 4.6. Моделювання пластичності міді при штампуванні вінця (2-е нагрівання)



Рис. 4.7. Виготовлена матриця штампа для заготовки мідного вінця з виштовхувачем

Для виготовлення корпусу наконечника фурми застосовували сталь 10 гарячекатану круглу діаметром 90мм. Вибір цієї сталі обумовлений тим, що вона добре деформується, не схильна до відпускнуї крихкості, добре зварюється і може витримувати значні пластичні деформації [62].

З підвищенням вмісту вуглецю і частки легуючих компонентів вважається здатність сталі до розтягування, а тим самим і гнучкість сталі. Чим менше вміст вуглецю у вуглецевій сталі, тим вище початкова температура кування і тим більше діапазон температур, при яких сталь піддається куванню (рис. 4.8).

Нижче мінімальної температури кування матеріал вже не можна кувати, так як здатність матеріалу змінювати форму настільки знижується, що при продовженні кування на деталі будуть з'являтися тріщини. Можливість нагрівати низьковуглецеву сталь до високих початкових температур дозволила виробляти формоутворення сталевому корпусу за один нагрів у спроектованому штампі.

Після охолодження штампованої заготовки мідного вінця в воді з температурою не менше 50°C, а заготівля сталевому корпусу на повітрі, вони піддавалися струменево-абразивній обробці.

Особливо ретельно очищалися внутрішні поверхні заготовки вінця, так як при термічному впливі на міді утворюється окалина, яка знижує ефективність охолодження наконечник фурми.

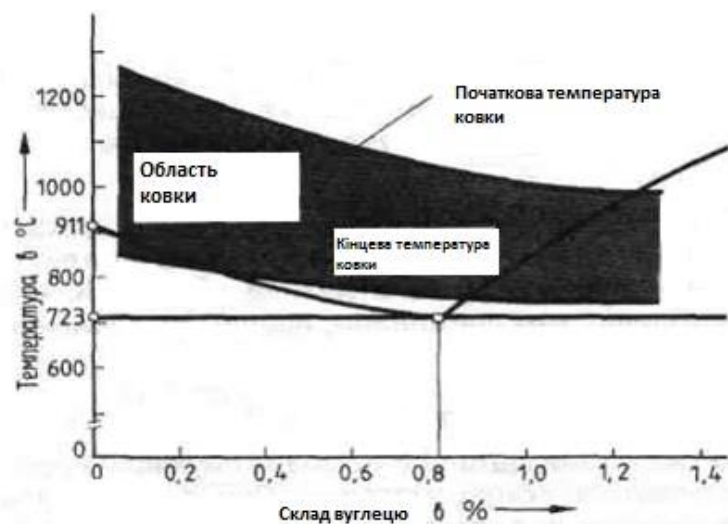


Рис. 4.8. Діапазон штампування вуглецевих сталей

Крім технологічних можливостей, розроблені конструкції штампів і технології їх виготовлення забезпечували високу співвісність верхніх і нижніх частин, збіг робочих частин при їх установці в посадочних місцях без підналагодження.

4.2. Розробка технології збирання нероз'ємних з'єднань деталей наконечників

Існуючі конструкції наконечників кисневих фурм для верхньої продувки розплаву, незалежно від методу формоутворення мідного вінця (литі, цільноточені, штаповані) нероз'ємне з'єднання зі сталеву зовнішньої трубою фурми за допомогою зварювання. Біметалічне з'єднання сталевих і мідних деталей повинне мати необхідну міцність, корозійну стійкість, герметичність, жароміцність, жаростійкість, стійкість до вібрацій та ін. З'єднуючий шов накладають із зовнішнього боку з'єднувальних деталей. Під час продування, збирання і монтажу

фурм шви піддаються значним термічним і механічним впливам, які призводять до виникнення тріщин, як в самому шві, так і в зоні навколо шва.

Статистика руйнувань нероз'ємних з'єднань конструкцій фурмених наконечників [14] показує, що утворення тріщин у шві, що з'єднує мідний вінець зі сталевим патрубком зовнішньої труби, призводить до 11,2% виходу з ладу фурм, у тому числі 0,1% з подальшим відривом наконечника від тіла фурм. До руйнування швів призводить його перебування в хімічно активному середовищі (конвекторні гази, вплив шлаку та ін.); а також різні коефіцієнти температурного розширення міді, сталі і матеріалу шва.

У конструкціях наконечників, розроблених автором, як метод з'єднання запропоноване паяння.

Паяння – високопродуктивний універсальний спосіб, що забезпечує надійне з'єднання різнорідних матеріалів (у різній комбінації, наприклад, метали і неметали). При цьому (у порівнянні зі зварюванням) відсутні значні температурні жолоблення і внутрішня напруга. Паяні з'єднання допускають багаторазове роз'єднання і з'єднання деталей (на відміну від зварювання). До недоліків можна віднести відносно невисоку механічну міцність.

Основні з'єднувальні вихідні матеріали – середньовуглецева сталь марки СТ10 і мідь марки М1. Як присаджувальний матеріал використовували латунь марки Л63. Як флюс застосовували буру $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$ з додаванням борної кислоти $\text{B}(\text{OH})_3$, що надавало флюсу велику в'язкість і густоту.

З метою підвищення довговічності, стійкості і працездатності багатосоплового наконечника фурми розроблена конструкція з'єднання вінця зі сталлюю зовнішньою трубою фурми швом, розташованим на внутрішній, водоохолоджуваній поверхні наконечника і з'єднання продувних сопел мідного вінця і сталевих блоку. Розроблена конструкція нероз'ємного з'єднання зовнішньої труби з мідним вінцем (рис. 4.9), дозволяє основну частину радіальних навантажень, які виникають у результаті внутрішньої напруги в мідному вінці, шві, зоні біля шва сприймати сталюю зовнішньою трубою, а не швом, який знаходиться на внутрішній поверхні наконечника, постійно омивається охолоджуючою водою.

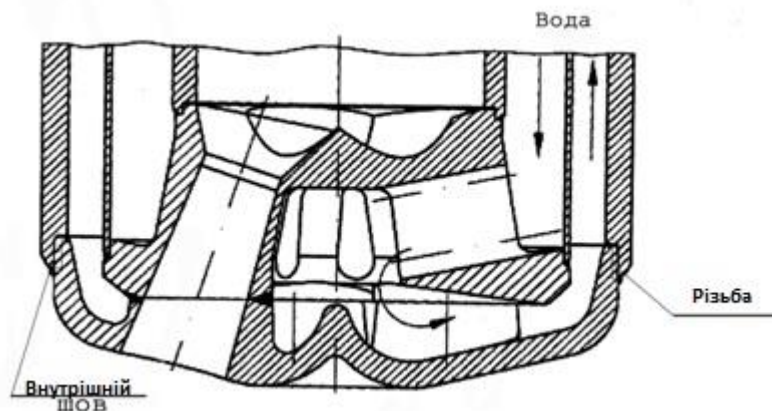


Рис. 4.9. Конструкція наконечника з внутрішнім швом з'єднання мідного вінця зі сталлюю зовнішньою трубою

Останнє захищає його від пікових температурних навантажень. Шов також захищений від хімічно агресивного середовища конвертора. Для підвищення механічної міцності з'єднання мідний вінець збирають з зовнішньої трубою за різьбою. На це інженерне рішення автором у 2007 році отримано патент України [74]. Режим паяння робить вирішальний вплив на міцність паяних з'єднань. У поняття режиму паяння входить, як правило, температура паяння, час витримки при температурі паяння, тиск, швидкість охолодження паяного з'єднання.

Правильний вибір температурного інтервалу паяння забезпечує хороше змочування припоєм поверхні, гарантоване заповнення зазорів, контрольована взаємодія припою з основним металом. Сукупність цих факторів і забезпечує максимальну міцність паяних з'єднань.

Під час паяння розрізняють мінімальну, максимальну і робочу температури. Робоча температура паяння – це оптимальна температура, при якій утворюється надійне паяне з'єднання.

З метою правильного вибору робочої температури паяння і швидкості нагріву були проведені дослідження, де експериментально визначали температури нагріву різних зон наконечника.

Місця закладання термопар показані на рис. 4.10. За результатами досліджень як робоча температура прийнята $t_p^o = 850^o - 900^o C$; час витримки при досягненні такої температури 40 хв. (рис. 4.11).

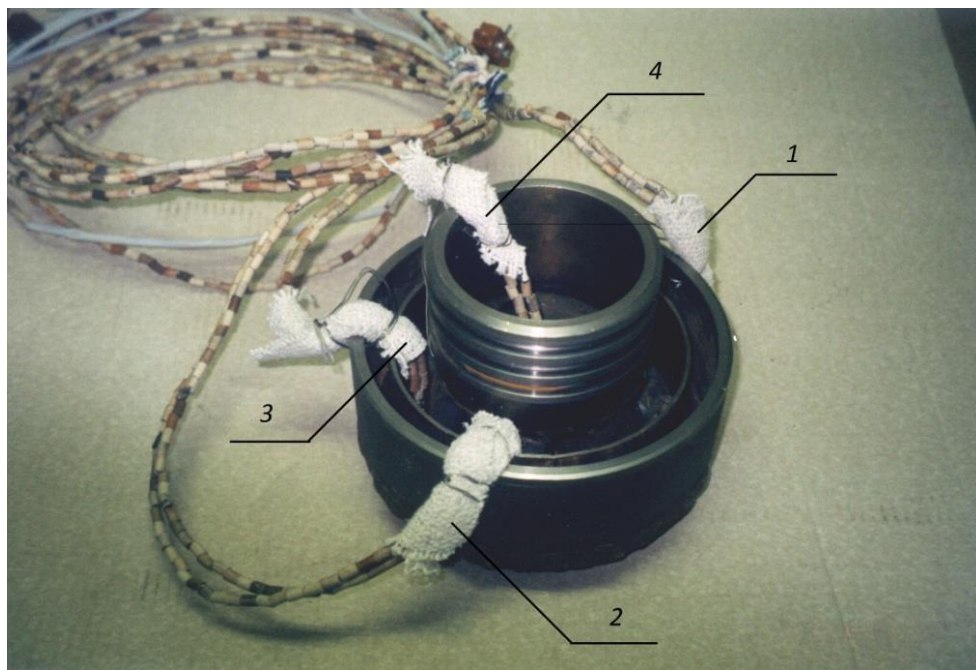


Рис. 4.10. Експериментальний наконечник з термопарами для визначення робочої температури паяння: термопара №1 - зачekanена в зовнішню поверхню мідного вінця; термопара №2 - зачekanена в поверхню сталеві труби $\varnothing 219\text{мм}$; термопара №3 - зачekanена у внутрішню поверхню мідного вінця; термопара №4 - зачekanена у внутрішню поверхню сталеві соплового блок

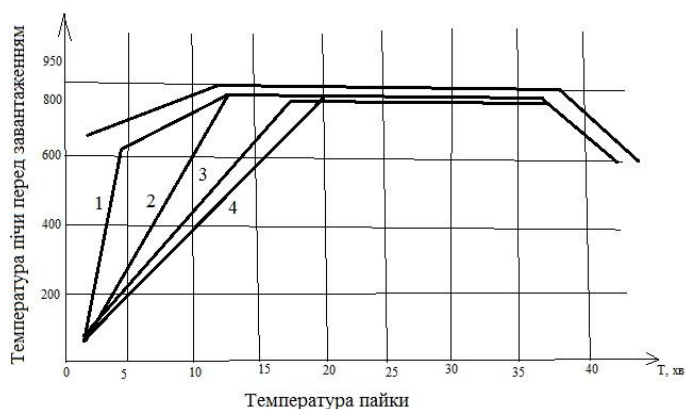


Рис. 4.11. Графіки нагріву різних зон наконечника кисневої фурми

Для отримання міцного, герметичного, нероз'ємного з'єднання мідного вінця із сталеву трубою і по п'яти соплах сталевого соплового блоку запропонували використати не стиковий шов, а напускний (рис. 4.12).

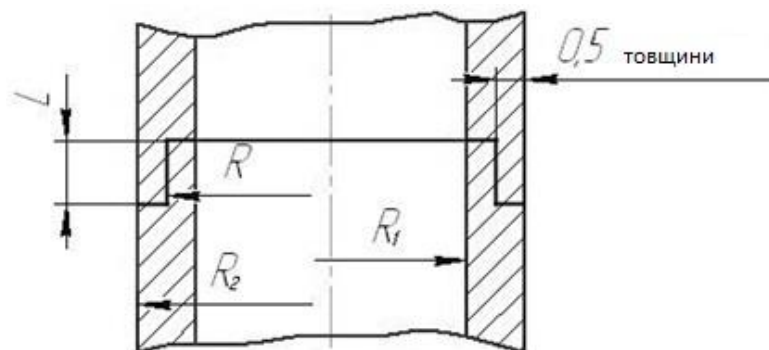


Рис. 4.12. Схема напускного нероз'ємного з'єднання елементів сопел мідного вінця з елементами сопел сталевих деталей наконечника

Розрахункова величина протяжності телескопічного шва з'єднання різьбової частини мідного вінця з різьбовою частиною сталеву зовнішньої труби $\varnothing 219\text{мм} - 15\text{мм}$, паяльний проміжок в межах - $0,25\text{мм}$.

Розрахункова величина протяжності телескопічного шва з'єднання із зовнішніх поверхонь елементів сопел мідного вінця з внутрішніми поверхнями елементів сопел сталеву соплового блоку - 7мм , паяльний проміжок в межах - $0,2\text{мм}$.

Враховуючи, габарити, масу, складнопрофільні поверхні наконечника, а також декілька зон з'єднання розроблена технологія паяння в печі, яка забезпечувала рівномірний нагрів деталей, що сполучалися, без їх деформації.

Металографічний аналіз структури проводили за допомогою світлового оптичного мікроскопа AxioObserver Aim фірми Карл Цейсе (Німеччина).

За результатами макро- і мікроструктурного аналізів були виявлені наступні особливості структури :

Макроструктура швів біметалічного з'єднання, представлена на рис. 4.13, не мала ознак розшарування, макротріщин, раковин, пір, шлакових і флюсів включень. Товщина присадного матеріалу складала 0,15-0,25мм.

Межа сталь-латунь більш чітка (рис. 4.13 а), ніж латунь-мідь (рис. 4.13 б). Відповідно межу латунь-мідь можна розцінювати як дифузійну. І тому міцнішу. Очевидно, що у разі руйнування шов найімовірніше руйнується по межі сталь-латунь.

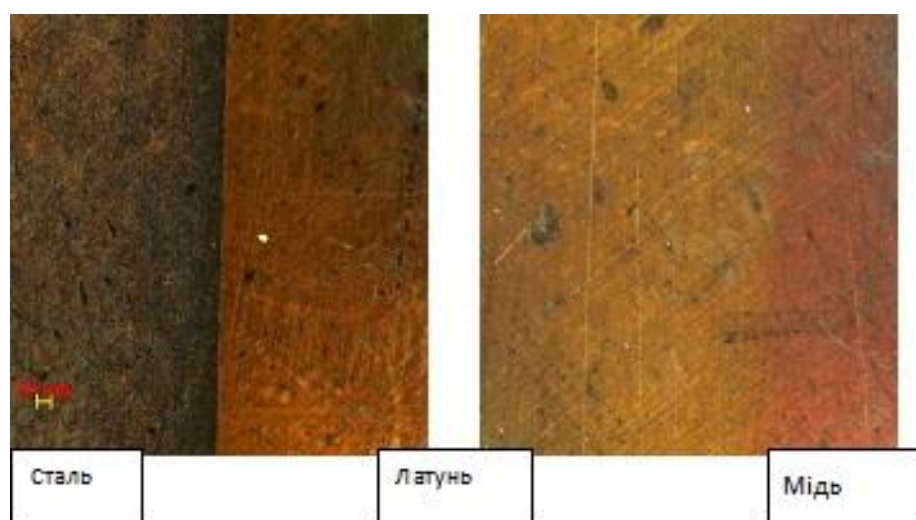


Рис. 4.13. Макроструктура зразка, х50

За результатами макро- і мікроструктурного аналізу зроблено висновок, що розроблена технологія отримання біметалічних з'єднань конструкційної сталі (Ст 10) і міді (МІ) дозволяє отримати міцне зчеплення з латунним припоєм (Л63) за рахунок однорідних перехідних зон, рівномірної структури і фазового складу шва.

4.3. Контроль герметичності

Контроль якості отриманих нероз'ємних з'єднань здійснювали зовнішнім оглядом. При цьому в місцях паяних швів не допускаються раковини, розривності, напливи; на внутрішніх і зовнішніх поверхнях не повинно бути окалини, окисних

плівок. Потім на спеціальному спроектованому стенді (схема з якого представлена на рис. 4.14) проводили випробування на герметичність і щільність паяних швів.

Гідравлічні випробування виконували на стенді з тиском води 2,0МПа протягом 15 хв.

Розроблений спосіб і стенд для випробувань наконечників на герметичність дозволяв оперативно в умовах виробництва здійснювати контроль якості паяних з'єднань.

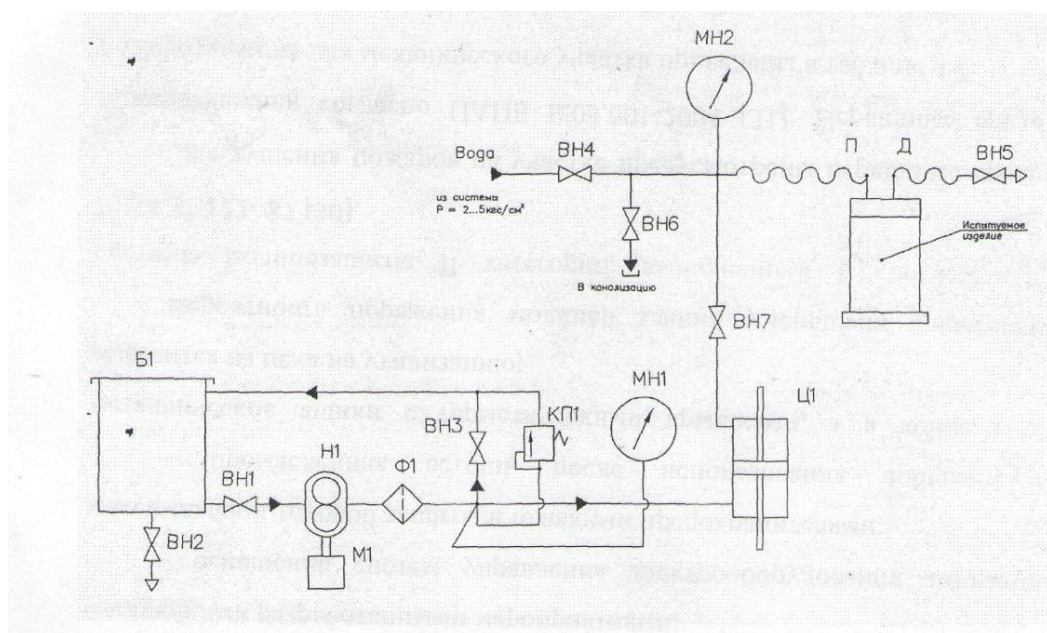


Рис. 4.14. Схема стенду для випробування наконечників кисневих фурм на герметичність і щільність паяних швів. Б1 - бак витратний У=25л.; ВН1, ВН2 - кран 11Б6бк, $d_y = 15$; ВН3 - вентиль 992 АТ-S; ВН4...ВН7 - вентилі ISB3к, d_{l5} ; КП1 - клапан запобіжний РД14-00-1; М1 - електродвигун $N = 1,1$ кВт, $n = 1420$ об/хв; МН1, МН2 - манометр МТП-160, 0...4 МПа; Н1 - насос НШ-3А; Ф1 - фільтр гідравлічний, $Q = 40$ л., Ц1 - гідроциліндр; трубопроводи: 1,2 - труба 12x18Н10Т; 6-металорукав (8x1200)

В результаті технологічного забезпечення зборки паяних з'єднань деталей наконечників кисневих фурм збільшена стійкість наконечників в 5-7 разів в порівнянні з існуючою стійкістю на металургійних заводах України.

Розроблений комплексний технологічний процес виготовлення наконечника кисневої фурми дозволяв спроектувати і виготовити деталі наконечника із заданими властивостями, здійснити технологію зборки деталей, виготовлених з різнорідних металів, отримати герметичні нероз'ємні з'єднання з підвищеною міцністю; підвищити продуктивність і скоротити складальний цикл за рахунок одночасного отримання усіх паяних швів.

4.4. Дослідно-промислові випробування експериментальних наконечників з кластерним термобар'єрним покриттям

На підставі розробленого комплексного технологічного процесу пароплазменного нанесення кластерного термобар'єрного покриття на наконечниках конвертерних фурм (див. 2 розділ) були оброблені експериментальні зразки на лабораторній установці [87], функціональна схема якої представлена на рис. 4.15.

В якості блоку живлення застосовувалося джерело вторинного електроживлення ИВЕ - 245-09 з безтрансформаторним мережевим входом, що працює на частоті перетворення 45-55кГц. Основні технічні дані блоку живлення : потужність 600-6000Вт; напруга 100-1350В; струм 0,5-7,0А.

Для процесу пароплазмового очищення електроліт на основі NaHCO_3 при концентрації 12%. Робоча напруга очищення 150-200В. При зміні концентрації електроліту в межах від 8-12% з тим, щоб визначити, вплив цієї зміни на процес очищення було відмічено, що якість очищення погіршувалася, коли концентрація складала менше 12%.

Для процесу пароплазмового полірування застосовувався електроліт на основі сульфату амонія $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ з концентрацією за водою 3% [88].

Для пароплазмового осаджування нікелю (Ni) застосовувався 20% водний розчин сульфату нікелю (NiSO_4) з результуючою рН $\sim 3,8$ і провідність $\sim 44\text{мОм/см}$ при температурі 75°C . Аналогічно, як і з електролітом для очищення, концентрація сульфату нікелю змінювалася в межах від 15 до 20%.

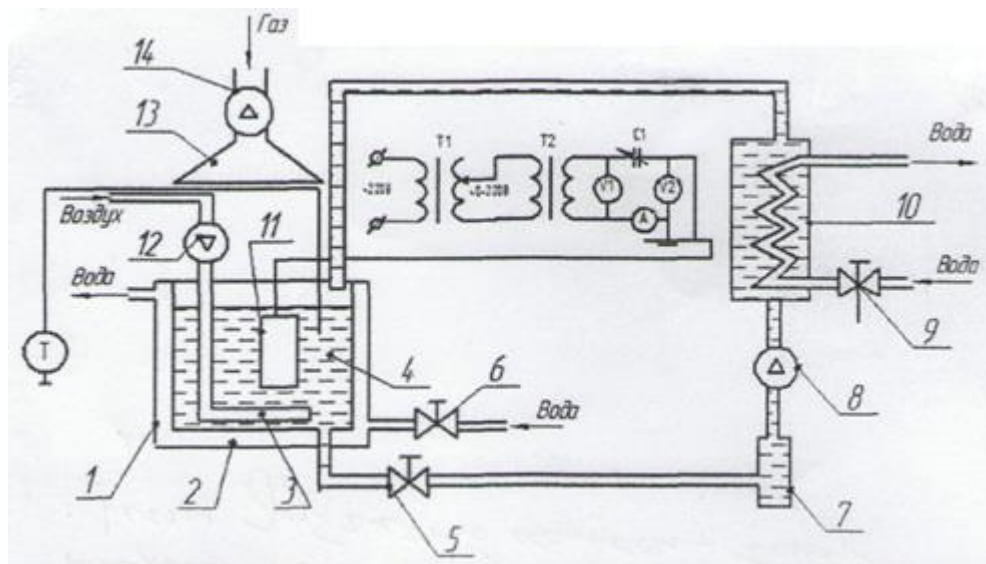


Рис. 4.15. Функціональна схема установки ЕПО : 1-гальванічна ванна; 2-сорочка водяного охолодження; 3-барботер; 4-електроліт; 5,6,9-замочна арматура; 7-фільтр; 8-водяний насос; 10-бак з теплообмінником; 11-деталь; 12-повітряний компресор; 13-витяжна парасолька; 14-витяжний вентилятор

Для проведення експериментів використали три різні електроліти залежно від конкретних технологій покриттів. Перед нанесенням покриттів усі наконечники проходили попередню механічну обробку у виробничих умовах.

Значення шорсткості мідної поверхні наконечника фурми, активованої струминно-абразивним методом під покриття, визначалося за допомогою безконтактного інтерференційного 3-D профілографа «Micron-alpha» виробництва ТОВ «Мікрон-система» Україна, Київ, який дозволяє реєструвати топографію поверхонь шляхом обробки послідовності інтерференційних даних (картин), реєстрованих цифровою камерою при зміщенні опорного (еталонного зразка) дзеркала.

Осаджування нікелю на кластерну положку мідної поверхні наконечника пароплазменним методом призводить до щільного і суцільного покриття при тривалості обробки 90с. і більше. Застосування даної технології характеризується високою швидкістю осаджування $\sim 185\text{мм/с}$.

Висновки до четвертого розділу

Розроблена нова технологія виготовлення мідного вінця і сталевого соплового блоку, що включала розробку штампів збірної конструкції, моделювання процесів штамповки, в т.ч. температурного режиму, власно штамповку заготовок та струменево-абразивну обробку внутрішньої поверхні мідного вінця.

Вперше в Україні використаний метод паяння з'єднань внапуск поверхонь мідного вінця з поверхнями сталюого соплового блоку і зовнішньої труби.

За результатами досліджень встановлені температура паяння 850-900°C і час витримки наконечника в печі 40 хв.

Вивчена макро- і мікро-структура швів біметалічного з'єднання конструкційної сталі і міді.

Доведена рівномірність структури і фазового складу шва та максимальна міцність паяних з'єднань.

Розроблені і запроваджені спосіб і стенд для випробувань наконечників на герметичність і щільність паяних швів.

За розробленим комплексним технологічним процесом виконано пароплазмене нанесення кластерного термобар'єрного покриття на зовнішній поверхні вінця наконечника кисневої фурми.

РОЗДІЛ 5

ВИПРОБУВАННЯ І РОБОТА НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАВКИ ПРИ ПРОДУВЦІ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ В КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИХ АГРЕГАТАХ

5.1 Випробування наконечників нової (запропонованої) конструкції в умовах роботи 160т конвертерів

Наконечники нової (запропонованої) конструкції були випробувані в умовах 2-х киснево-конвертерних цехів, у тому числі металургійного комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг».

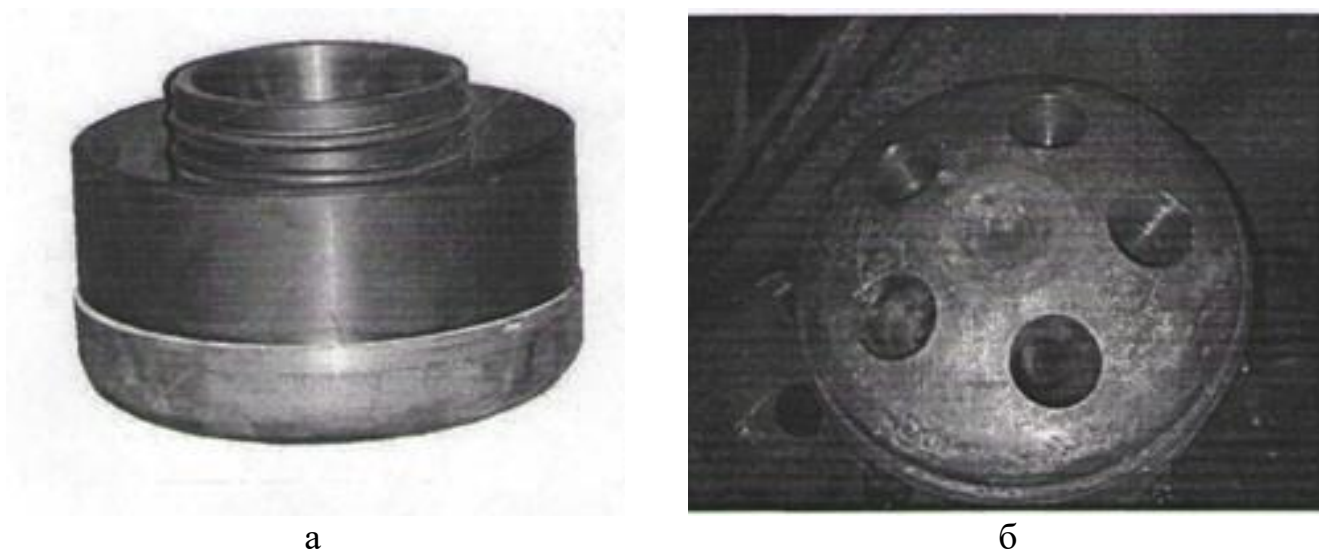


Рис. 5.1. Наконечник кисневої фурми нової (запропонованої) конструкції
а - загальний вигляд; б - вид з боку вінця

На рис. 5.1 і на рис. 5.2 приведені загальний вигляд наконечника у зборі, вид з боку вінця, в розрізі і з боку входних ділянок сопел.

Вид наконечника і кисневої фурми приведені на рис. 5.3.

В киснево-конвертерному цеху металургійного комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг» були виготовлені два типи наконечників. Перший застосовували в першій половині компанії конвертера з футерування (наконечник А), другий в

другій половині компанії конвертера по футеруванню (наконечник Б). У таблиці 5.1 приведено число сопел n , кут нахилу сопел до вертикальної осі кисневої фурми α і характеристики кисневого сопла в наконечниках А і Б.

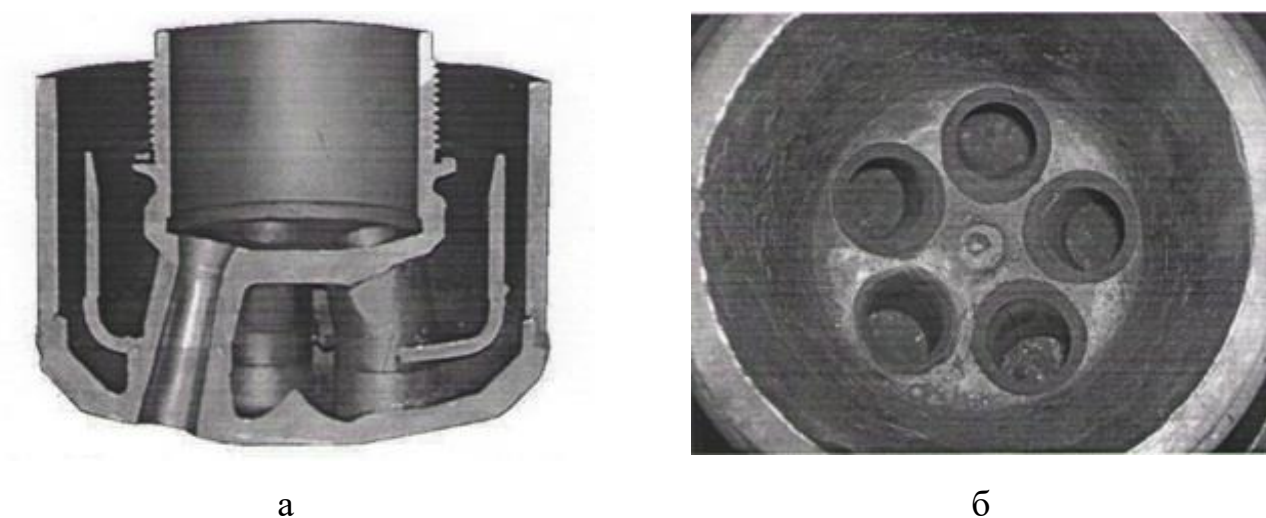


Рис. 5.2. Наконечник кисневої фурми нової (запропонованої) конструкції а - в розрізі; б - з боку вхідних ділянок сопел

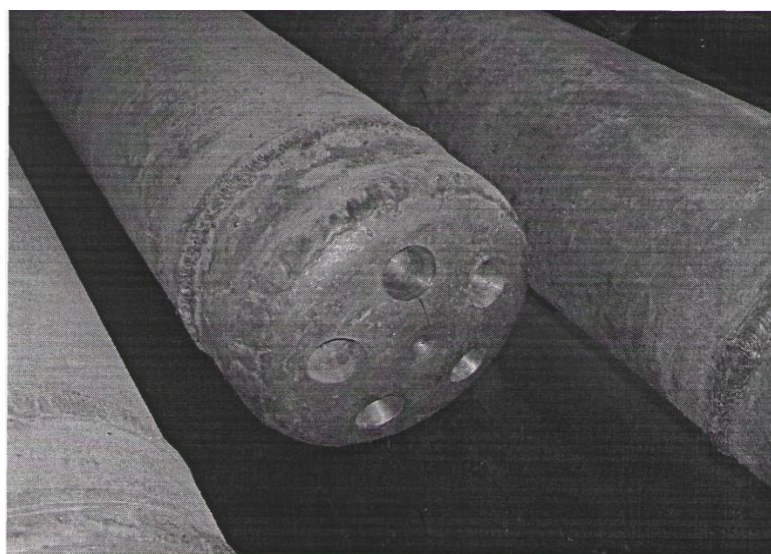


Рис. 5.3. Вид наконечника і кисневої фурми

На рис. 5.4 приведена (як приклад) конструкція запропонованого наконечника, використовуваного на плавках в першій половині компанії конвертера з футерування.

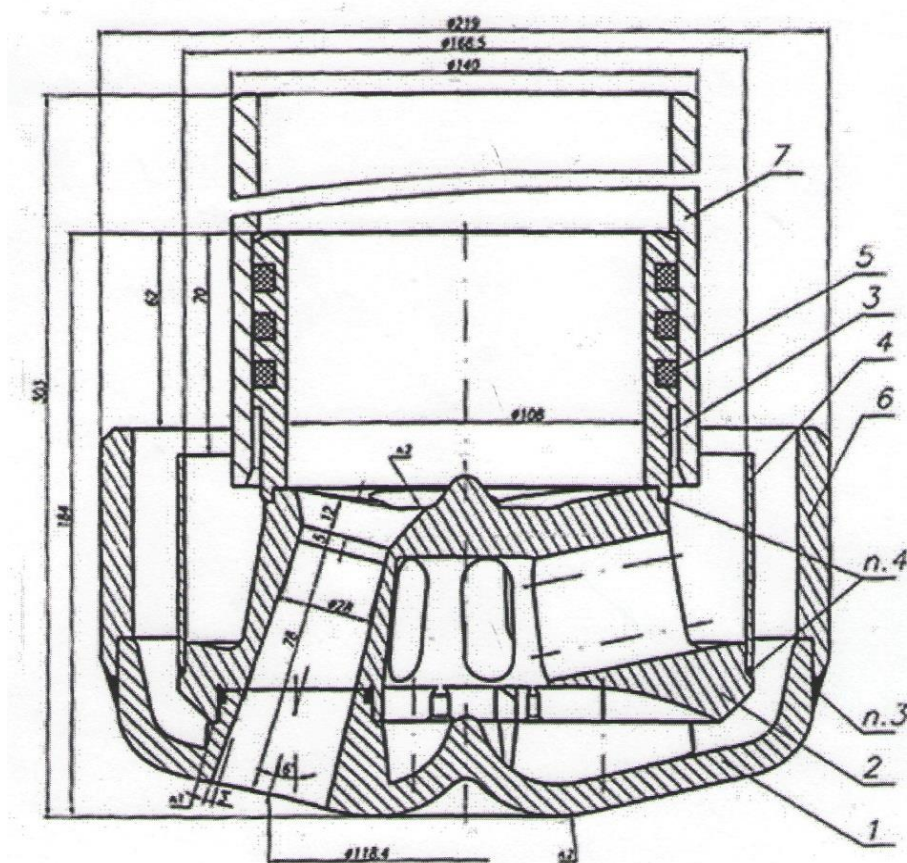


Рис. 5.4. Новий наконечник кисневої фурми для 160 т конвертера МК «АрселорМіттал Кривий Ріг» (1 - вінець наконечника; 2 - сталевий сопловий блок з направляючою тарілкою; 3 - сталевий штуцер; 4 - проміжна труба; 5 - кільця ущільнювачів; 6 - зовнішня труба; 7 - киснева труба; п. 3, п. 4 - зварні шви)

Збільшення кута нахилу сопел в наконечнику б, використовуваному в другій половині компанії конвертера з футерування пов'язано з необхідністю збільшити площу зони продування і зменшити глибину проникнення кисневих струменів в металевий розплав. При цьому забезпечити кращі умови для шлакоутворення і понизити винесення металу з конвертера.

Випробування наконечника А проводили на конвертері № 1.

Результати порівнювали з роботою конвертера № 1 при використанні типового наконечника С.

Технологічні показники роботи конвертера № 1 при використанні наконечників А і С приведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.1

Число сопел n , кут нахилу сопел до вертикальної осі кисневої фурми α і характеристики кисневого сопла в наконечниках, використовуваних в першій (А) і другій (Б) половинах компанії конвертера з футерування

№ з/п	Характеристики наконечника і кисневого сопла	Наконечники	
		А	Б
1	2	3	4
1	Число сопел n	5	5
2	Кут нахилу α	16	20
3	Критичний діаметр сопла, мм	28	28
4	Довжина сопла, мм,	95	95
	в т.ч. докритичній частині, мм	15	15
	закритичної частини, мм	80	80
5	Діаметр сопла на вході, мм	34	34
6	Діаметр сопла на виході, мм	39	39

Положення фурми над рівнем спокійної ванни в основний період продування на порівняльних плавках складало 1,2 - 1,4м.

"Жорсткіше" продування при застосуванні наконечника А призвело до необхідності ведення плавки з більш високим положенням наконечника над ванною - в середньому, 1,3 - 1,5м. Встановлено, що вихід рідкої сталі при продуванні через наконечник А і при його положенні над ванною ближче до нижньої межі ($\sim 1,2$ м) - 89,19%, при положенні наконечника ближче до верхньої межі ($\sim 1,5$ м) - 87,95%. На порівняльних плавках і застосуванні типового наконечника 88,38%.

Стабільніше і "жорсткіше" продування в ході експлуатації наконечника А дозволили скоротити тривалість продування до 21,6 - 21,8хв. проти 22.12хв. на порівняльних плавках.

Важливою перевагою застосування наконечників А і В стало підвищення їх стійкості. Порівняно з типовим наконечником їх стійкість збільшилася в 2,2 - 2,8 рази. При цьому в ході експлуатації дослідних наконечників практично був відсутній знос кромки сопла.

Таблиця 5.2

Технологічні показники роботи конвертера № 1 при використанні наконечників А (нової конструкції) і С (типових)

№ з/п	Показники	Наконечник А (нової конструкції)	Наконечник С (типовий)
1	2	3	4
1	Витрата чавуну, кг/т стали	855,2	854,6
2	Витрата лому, кг/т стали	278,2	276,8
3	Витрата металлошихты, кг/т стали	1133,4	1131,4
4	Витрата вапна, кг/т стали	63,33	63,90
5	Витрата феросплавів, кг/т стали	9,24	9,97
6	Вміст вуглецю в металі на останній повалці, %	0,1	0,1
7	Температура металу на останній повалці, град.	1612	1610
8	Тривалість продування, хв.	21,8	22,12
9	Вихід рідкої сталі, %	88,93	88,38

На рис. 5.5 приведений вид наконечника після 161 плавки його експлуатації. Кромки сопел не зношені.

Відсутність зносу забезпечувала розрахунковий режим витікання кисневих струменів, стабільний режим продування, що і сприяло досягненню високих

техніко-економічних показників плавок, проведених з використанням дослідних наконечників кисневої фурми.

Для порівняння на рис. 5.6 приведений стан типового наконечника після виведення його із експлуатації після 62 плавок.

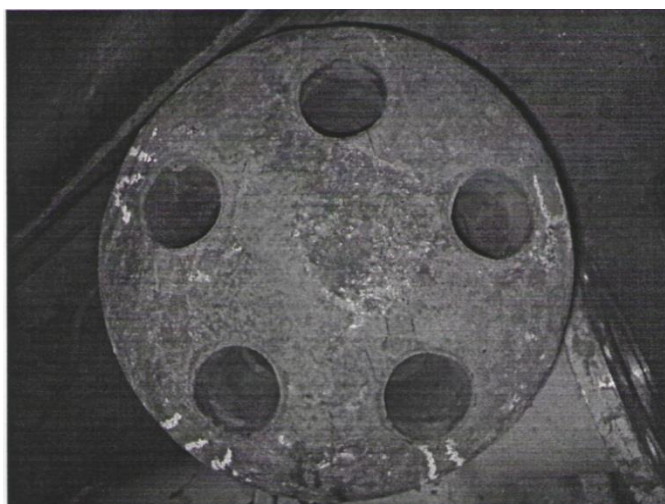


Рис. 5.5. Стан запропонованого наконечника кисневої фурми для 160 т конвертера після експлуатації



а



б

Рисунок 5.6 - Стан типового наконечника кисневої фурми після виведення його із експлуатації на 62 плавці (а) і на 41 плавці (б)

На усіх плавках відмічали істотний знос кромek сопла. Лінія зносу зазвичай розташовується під кутом 45^0 до осі сопла, а максимальний знос в зоні близької до осі фурми. Знос викликаний недостатнім охолодженням центральної частини вінця і навколосоплових зон за відсутності направляючої тарілки.

5.2 Випробування дослідних наконечників кисневих фурм нової конструкції в умовах Єнакіївського металургійного заводу

До проведення випробувань роботи наконечника запропонованої автором конструкції на 160 т конвертерах Єнакіївського металургійного заводу застосовували типовий 5-ти сопловий наконечник виробництва Константи́нівського металургійного заводу. Характеристики наконечника (типового) наступні:

- хвилинна витрата кисню - 380 - 390 м³/хв.
- хвилинна витрата кисню на одне сопло - 96 - 98 м³/хв.
- витрата води на охолодження - 80 - 95 м³/годину
- число сопел - 5
- кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми - 20^0
- критичний діаметр сопла - 32 мм
- діаметр зовнішньої труби кисневої фурми - 219 мм

Середня стійкість наконечників складала 110 плавok.

Причинами виходу наконечників з експлуатації були тріщини в зварних швах вінця наконечника і зовнішньої труби (~ 52%), розпал навколосоплових зон на зовнішній поверхні вінця наконечника (~ 26%), прогар вінця наконечника через попадання металу на його поверхню.

Продування в ході експлуатації наконечника відрізнялося нестабільним дуттьовим режимом, коливаннями окиснення шлаку.

На підприємстві "Укрфурмет" були виготовлені наконечники кисневої фурми нової конструкції (всього 21 наконечник), які були адаптовані до умов продування на 160 т конвертерах Єнакіївського металургійного заводу.

На рис. 5.7 приведено креслення нової конструкції наконечника. За наполяганням фахівців ЕМЗ - замовників, усі приведені вище характеристики типового наконечника збережені при конструюванні нового.

У новому наконечнику (рис.1) передбачена тарілка напрямної 2, "0" - подібний компенсатор температурних розширень 5. Наконечник збирався з штампованих вінця 1 і соплового блоку з направляючою тарілкою.

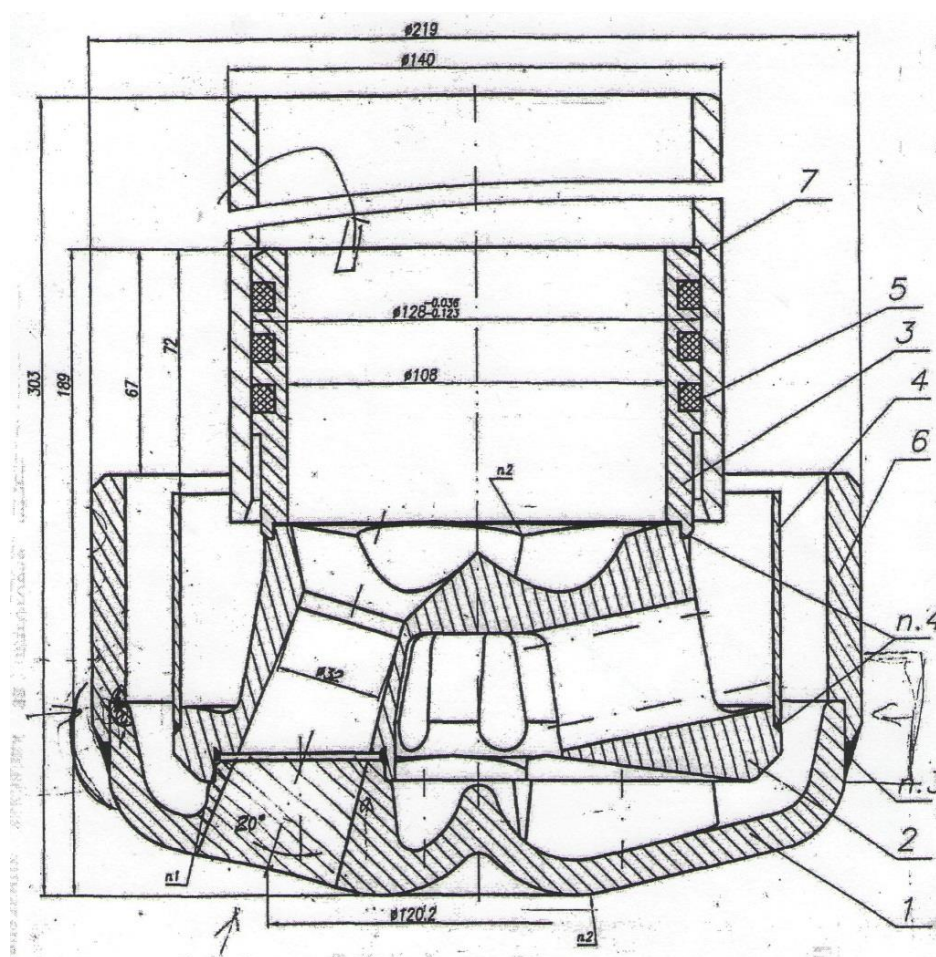


Рис. 5.7. 5-ти сопловий наконечник кисневої фурми для 160 тон конвертера ЕМЗ (1 - вінець наконечника; 2 - сталевий сопловий блок з направляючою тарілкою; 3 - сталевий штуцер; 4 - проміжна труба; 5 - кільця ущільнювачів; 6 - зовнішня труба; 7 - киснева труба; п. 3 і п. 4 - зварні шви)

Основні технологічні показники із застосуванням нових дослідних типових наконечників фурм приведені в таблиці 5.3.

Ці таблиці показують, що на дослідних плавках (наконечник нової конструкції) витрата металошихти на тонну сталі складала 1128,2кг проти 1129,7кг на плавках з типовим наконечником. Питома витрата кисню знизилася на 0,66 м³/т, а на плавку на 94м³.

Таблиця 5.3

Показники конвертерних плавов при експлуатації дослідних (дослідні плавки) і типових (порівняльні плавки) наконечників кисневих фурм (160 т конвертер)

Показники	Порівняльні плавки	Досвідчені плавки
Кількість плавов	1768	1063
Витрата металошихти, кг/т	1129,7	1128,2
Маса рідкої сталі, т	141,9	142
Вапно на плавку, кг/т	65,3	65,0
Вапняк на плавку, кг/т	0,01	0,10
Вугілля на плавку, кг/т	2,72	2,89
Кисень на продування, м /т	61,01	60,35
Тривалість продування, хв.	22	22,05
Вуглець на першій повалці, %	0,06	0,06
Fe _{заг} в кінцевому шлаку, %	17,58	17,11
Температура на повалці, град.	1618	1616

Як і слід було чекати відмічене менше окислення кінцевого шлаку. Fe_{заг} в кінцевому шлаку дослідних плавов 17,11% проти 17,58% на порівняльних.

Інші показники дослідних плавов на рівні результатів, отриманих на порівняльних плавках.

Продування в 160т конвертерах ЕМЗ ведеться на вміст вуглецю на 1-й повалці 0,08 - 0,12%.

На дослідних плавках (рис. 5.8) в ході експлуатації нового наконечника завдяки жорсткішому продуванню відмічено стабільніше попадання в заданий вміст вуглецю на першій повалці (у діапазоні 0,08 - 0,12%).

З метою забезпечення заданої температури металу на першій повалці більша кількість плавов проводила на передув з вмістом вуглецю 0,05 - 0,08%. Дослідні плавки з вмістом вуглецю на першій повалці 0,05 - 0,08% складали 43,7%, тоді як на порівняльних їх кількість 45,5%.

Кількість надто "передувтих" плавов (на вміст вуглецю $< 0,05\%$) при продуванні з використанням нових наконечників помітно менша, ніж при продуванні з використанням типових наконечників (20,1 проти 22,5%).

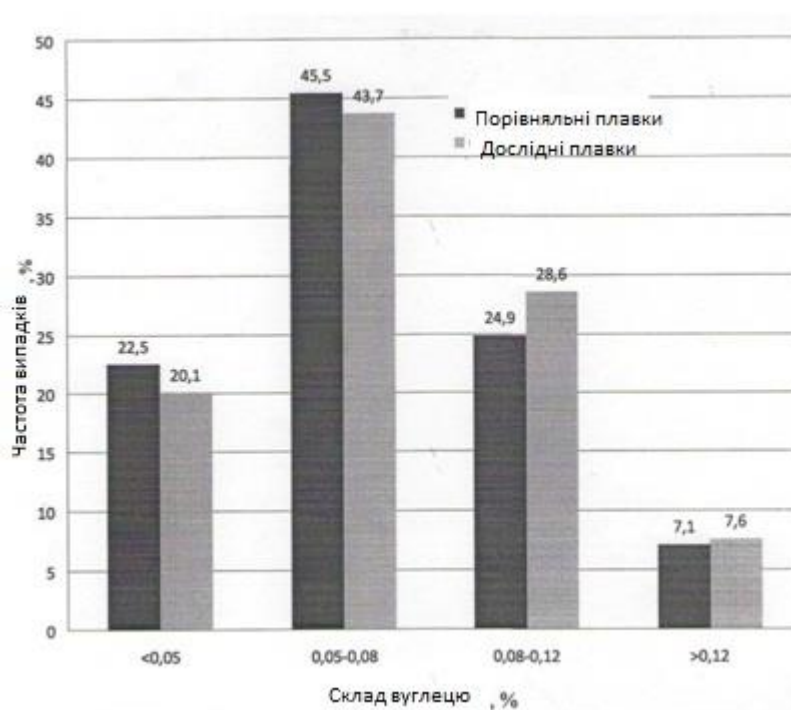


Рис. 5.8. Число плавов за вмістом вуглецю на першій повалці

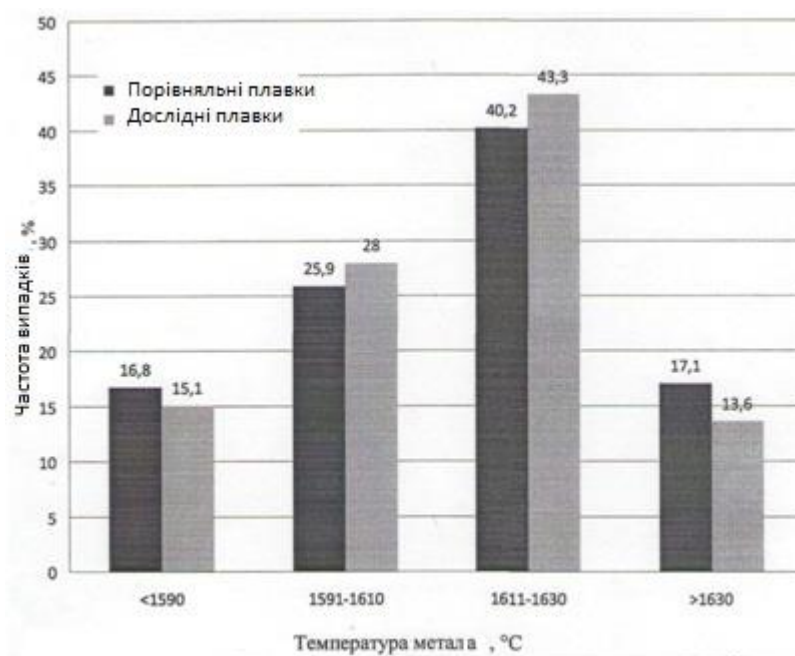


Рис. 5.9. Число плавок за температурою металу на першій повалці

При використанні дослідних наконечників отримані кращі результати по попаданню в задану температуру металу на першій повалці (рис. 5.9).

На дослідних плавках 28% плавок мали температуру на першій повалці 1591 - 1610°C, 43,3% мали температуру 1611 - 1630°C. В той же час, на порівняльних плавках температуру металу на першій повалці 1591 - 1610°C мали 25,9% плавок, 1611 - 1630°C - 40,2%.

Число плавок з температурою металу вище заданої ("гарячих") на плавках продуктів з дослідженням дослідних наконечників склало 13,6%. При роботі з типовим наконечником 17,1%.

На дослідних плавках спостерігали скорочення кількості "холодних" плавок. Всього "холодних" плавок (< 1590°C) при продуванні дослідним наконечником зафіксовано 15,1%, при продуванні типовим наконечником - 16,8%.

Ефективніша робота нового наконечника пов'язана з відсутністю розпалу навколосоплових зон на зовнішній поверхні вінця наконечника і, як наслідок, організацією стабільного дуттьового режиму в ході експлуатації наконечника.

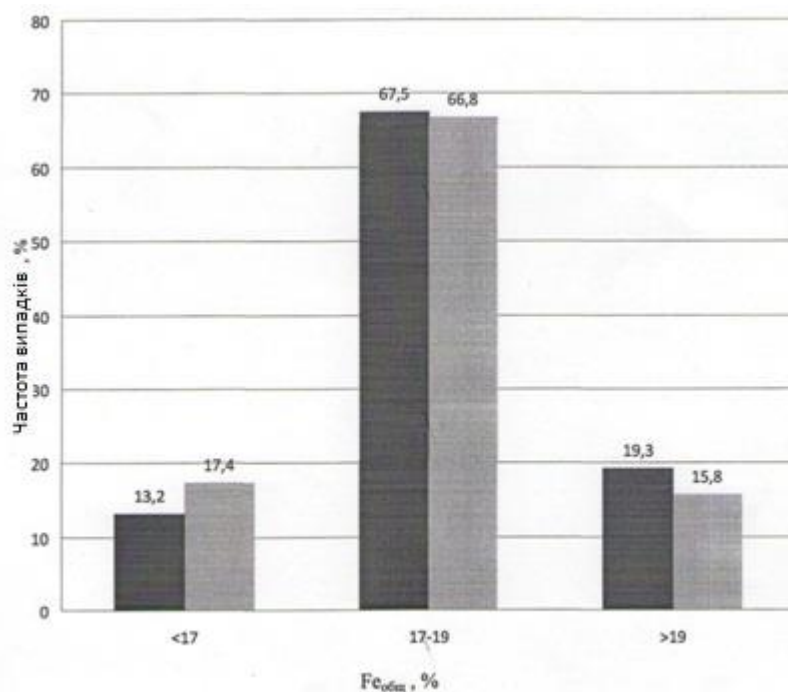


Рис. 5.10. Частота плавок за змістом Fe_{заг} в кінцевому шлаку на дослідних і порівняльних плавках

Стабільний "жорсткий" дуттьовий режим при використанні дослідних наконечників забезпечив менше число "переокиснених" плавок (рис. 5.10).

Число плавок зі змістом Fe_{заг} > 19%, на дослідних плавках склало 15,8%, на порівняльних - 19,3%. Число плавок зі змістом Fe_{заг} < 17% при продуванні з використанням наконечників нової конструкції склало 17,4%, з використанням типового наконечника - 13,2%.

Відмічено зниження витрати металошихти на плавках продуктах з використанням дослідних наконечників (рис. 5.11).

Середня стійкість дослідних наконечників складає 226 плавок. Стійкість типових наконечників 110 плавок.

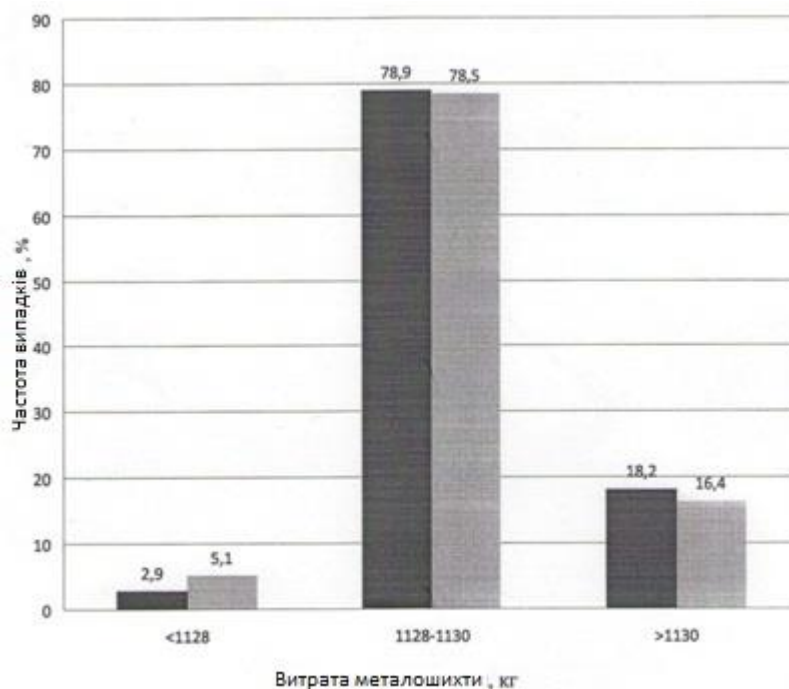


Рис. 5.11. Число плавок по витраті металошихти (чавун, лом, феросплави) на дослідних і порівняльних плавках

5.3 Наконечники кисневих фурм для 60 т конвертерів і досвід їх експлуатації в умовах киснево-конвертерного цеху металургійного заводу

При розробці нових наконечників кисневих фурм для 60 т конвертерів вирішуваними завданнями були:

- поліпшення техніко-економічних показників конвертерної плавки;
- підвищення стійкості наконечників.

Наконечники виготовляли штампованими з направляючою тарілкою (рис. 5.12).

Штатний литий наконечник, який застосовували для продування до освоєння нових, мав 5 сопел з критичним діаметром кожного 23 мм, кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми складав 12°. Усі сопла розташовані по колу в один ряд.

5.3.1. Робота 4-х і 5-ти соплових наконечників фурм

Основні технологічні і конструктивні параметри нових наконечників приведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Основні технологічні і конструктивні параметри нових наконечників

Число сопел	Кут нахилу до вертикальній осі фурми, град.	Критичний діаметр сопла, мм	Витрата кисню на одне сопло м /хв.
4	16	30	40
5	12	23	32

Узагальнені результати плавок, продутих 4-х і 5-ти сопловими наконечниками (Таблиця 5.5).

Більш високі температури металу на першій повалці і витрата металобрухту на плавках, продутих 4-х сопловою фурмою, свідчили про позитивніший тепловий баланс, який пояснювався збільшенням міри допалювання монооксиду вуглецю при більш високому положенні фурми над ванною, чим у разі продування 5-ти сопловим наконечником.

Відомо, що збільшення положення кисневої фурми над конвертерною ванною створює умови для більшого допалювання CO до CO₂ і підвищує теплові можливості плавки.

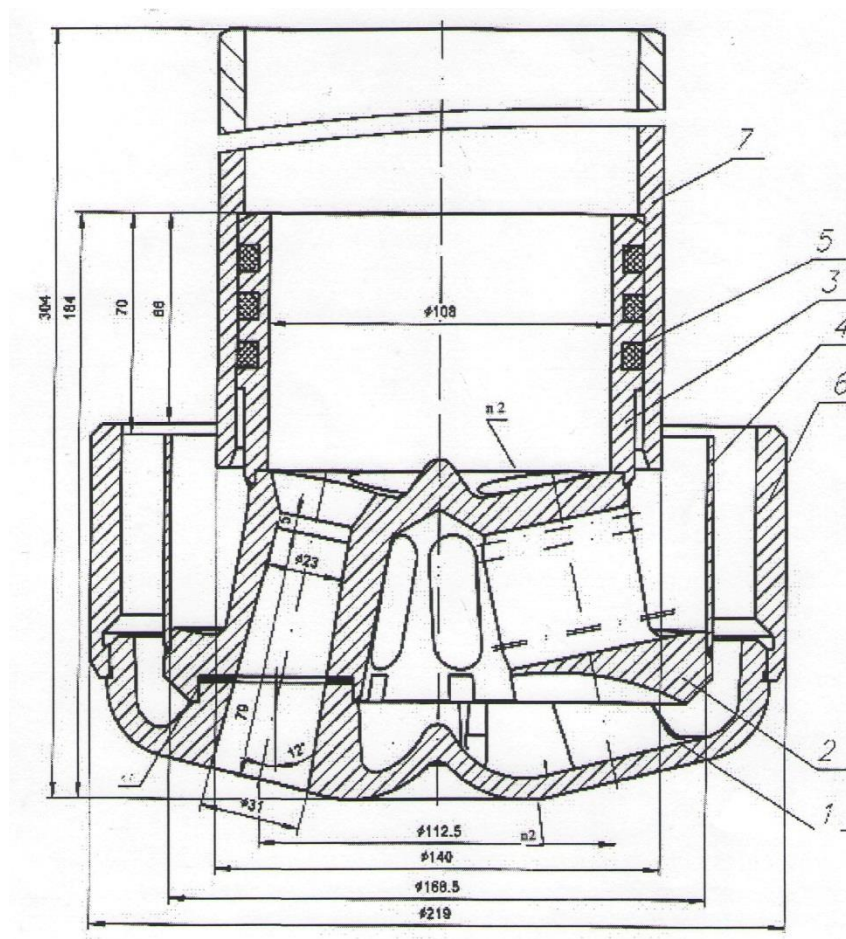


Рис. 5.12. 5-сопловий наконечник кисневої фурми для 60 т конвертера
Дніпровського металургійного заводу : 1 - вінець наконечника; 2 - сталевий
сопловий блок з направляючою тарілкою; 3 - сталевий штуцер; 4 - проміжна труба;
5 - кільця ущільнювачів; 6 - зовнішня труба; 7 - киснева труба

Скорочення тривалості продування при застосуванні 4-х соплового наконечника пов'язане зі скороченням часу "запалення" плавки і інтенсивнішим знеуглецюванням, які забезпечуються при мінімально допустимому положенні наконечника Г-подібної фурми над рівнем ванни. При такому ж положенні 5-ти соплового наконечника над рівнем ванни кисневі струмені впроваджуються в метал на меншу глибину і продування ведеться в менш "жорсткому" режимі.

В той же час, робота 5-ти соплового наконечника забезпечує кращі умови шлакоутворення, більш високу основність шлаку. Отримані кращі результати зі стійкості футерування конвертера при продуванні через 5-ти сопловий наконечник.

Останнє пов'язане з тим, що при більшій кількості сопел і більш високому положенні фурми процес наведення основного шлаку протікає інтенсивніше за рахунок надходження в шлак достатньої кількості оксидів заліза, особливо в перші 30% тривалості продування.

Таблиця 5.5

Основні показники роботи конвертерів при використанні 4-х і 5-ти соплових наконечників фурм нової конструкції

Показники	4-х сопловий наконечник	5-ти сопловий наконечник	Відхилення +,-
Кількість плавов, шт.	2176	3543	+1367
Витрати матеріалів, кг/т стали:	983,0	996,2	+13,2
Рідкого чавуну	131,7	123,3	-8,4
металобрухту			
ЖСБ	11,2	10,3	-0,9
Плавикового шпату	2,09	1,99	-0,1
Металошихти*	1125,9	1129,8	+3,9
Температура металу на першій повалці, °C	1644	1639	-5,0
Час продувки, хв.	17,40	19,35	+1,95
Вміст заліза загального в шлаку, %	16,27	16,46	+0,19
Основність шлаку (CaO + MgO)/SiO ₂ , ед.	2,87	3,09	+0,22

• - без урахування феросплавів

За результатами експлуатації 4-х і 5-ти соплових наконечників виробничники надають перевагу 4-х сопловим. В той же час, відмічено, що 5-ти сопловий

наконечник більш універсальний, особливо при переробці чавунів, які значно відрізняються між собою за хімічним складом, тоді як 4-х сопловий наконечник вимагає жорсткіших обмежень в складі та структурі шихти для якнайповнішої реалізації своїх можливостей.

В умовах роботи 60-ти тонних конвертерів був сформований парк 4-х і 5-ти соплових наконечників, які використали з урахуванням складових металошихти, хімічного складу чавуну і зміни розмірів конвертерної ванни при зношенні футерування конвертера в ході його експлуатації. За можливості здійснювати заміну наконечників фурми без будь-яких ускладнень і впродовж короткого проміжку часу 5-ти соплові наконечники застосовували в першій половині кампанії конвертера по футеруванню, а 4-х соплові в другій половині кампанії.

Показники роботи конвертерів при використанні 5-ти соплового наконечника нової конструкції порівнювали з роботою типового наконечника (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6

Порівняння показників роботи конвертерів при використанні 5-ти соплових наконечників нової конструкції і типових

Показники	5-ти сопловий типовий (порівняно плавки)	5-ти сопловий новою конструкції
Кількість плавок	5278	3543
Витрата чавуну, кг/т сталі	997,4	996,2
Витрата лому, кг/т сталі	124,2	123,3
ЖСБ, кг/т сталі	10,2	10,3
Металошихти, кг/т сталі	1131,8	1129,8
Зміст заліза в шлаку, %	17,94	16,46
Основність шлаку	3,14	3,09
Температура металу на першій повалці, °З	1636	1639
Час продування, хв.	20,18	19,35

Відсутність розпалу вихідних ділянок сопел наконечника нової конструкції стабілізує дуттьовий режим, знижує окиснення шлаку і в цілому характеризується кращими показниками роботи конвертерного агрегату.

Час продування на плавках з використанням 5-ти соплового наконечника нової конструкції склав 19,35хв., на порівняльних 20,18. Окиснення шлаку на дослідних плавках 16,46%, на порівняльних 17,94%, витрата металошихти, відповідно, 1129,8кг/т сталі і 1131,8кг/т сталі.

Середня стійкість 4-х і 5-ти соплових наконечників складала 520 плавок, що більш ніж в 3 рази перевищувало стійкість штатних литих наконечників.

На рис. 5.13 наведено стан вінця запропонованого наконечника після 1082 плавок його експлуатації. Звертає на себе увагу відсутність розпалу кромки сопла, що забезпечує стабільні дуттьовий режим і показники конвертерної плавки. Відсутність розпалу пов'язана з поліпшеним охолодженням наконечника.

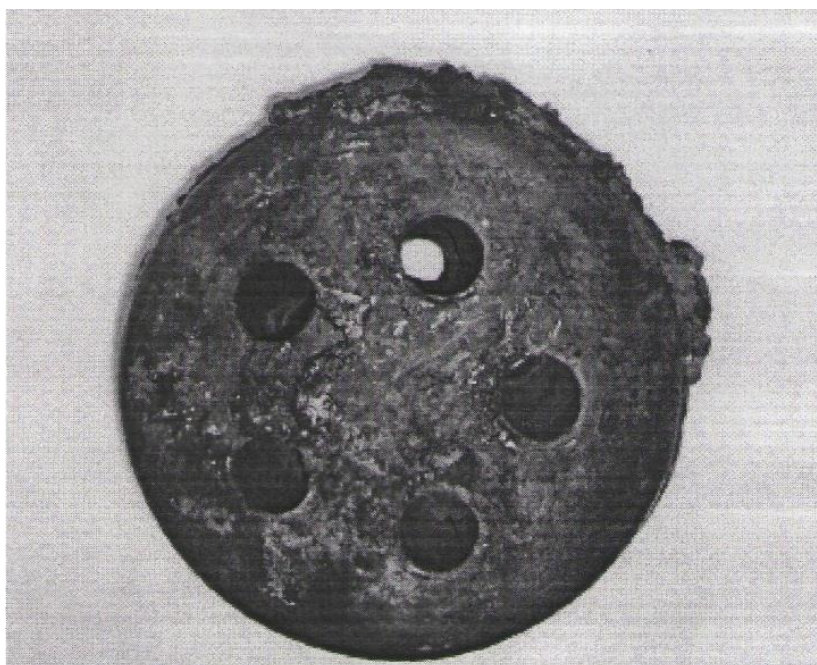


Рис. 5.13. Стан вінця запропонованого наконечника кисневої фурми для 60 т конвертера після 1082 плавки його експлуатації

Для порівняння на рис. 5.14 приведений стан вінця типового наконечника після 98 плавов його експлуатації. Розпал сопел дуже істотний, що призводить до нерозрахункового витікання кисневих струменів, параметри яких змінюються в ході експлуатації наконечника. Такий режим продування веде до зниження глибини проникнення кисневого струменя в метал, збільшенню тривалості продування і підвищеною окиснення шлаку.

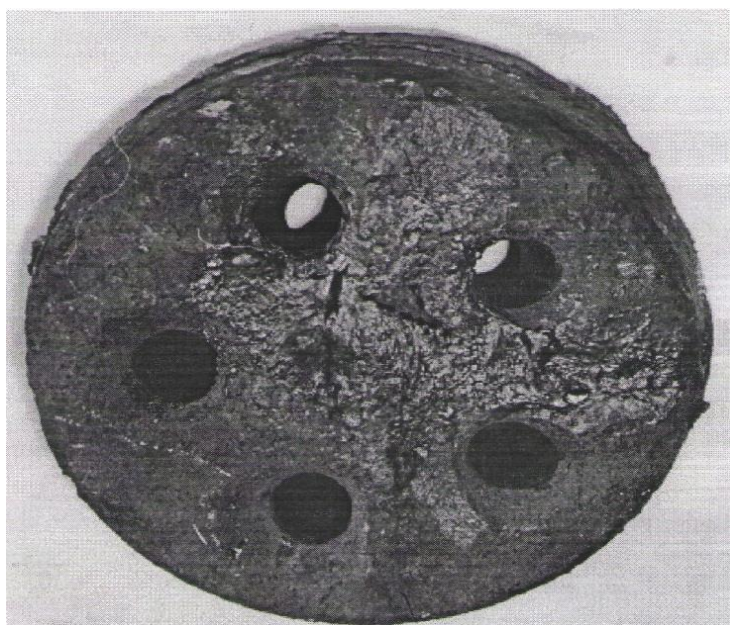


Рис. 5.14. Стан типового наконечника кисневої фурми для 60 т конвертера після 98 плавки його експлуатації

5.3.2. Застосування наконечників з дворядним розташуванням сопел

За участю автора роботи для 60т конвертера запропонований і сконструйований наконечник кисневої фурми з дворядним розташуванням сопел (рис.5.15). Сконструйований наконечник дозволяв подавати кисень на рафінування металу через основні 4 сопла. Кут нахилу основних сопел до вертикалі складав 16° , критичний діаметр 31мм. Витрата кисню через сопло $40\text{м}^3/\text{хв}$. Як видно з рис. 5.15 допоміжні сопла розташовували по зовнішньому контуру. Сопла циліндричні, діаметр сопла 8 мм, їх кількість 8, а кут нахилу сопел до вертикалі складав 30° .

Кисень на рафінування для основних сопел і кисень на допалювання для допоміжних сопел поступав з одного тракту підведення кисню (3 на рис. 5.15). При цьому через додаткові сопла вдували $20-30\text{ м}^3/\text{хв.}$ кисню.

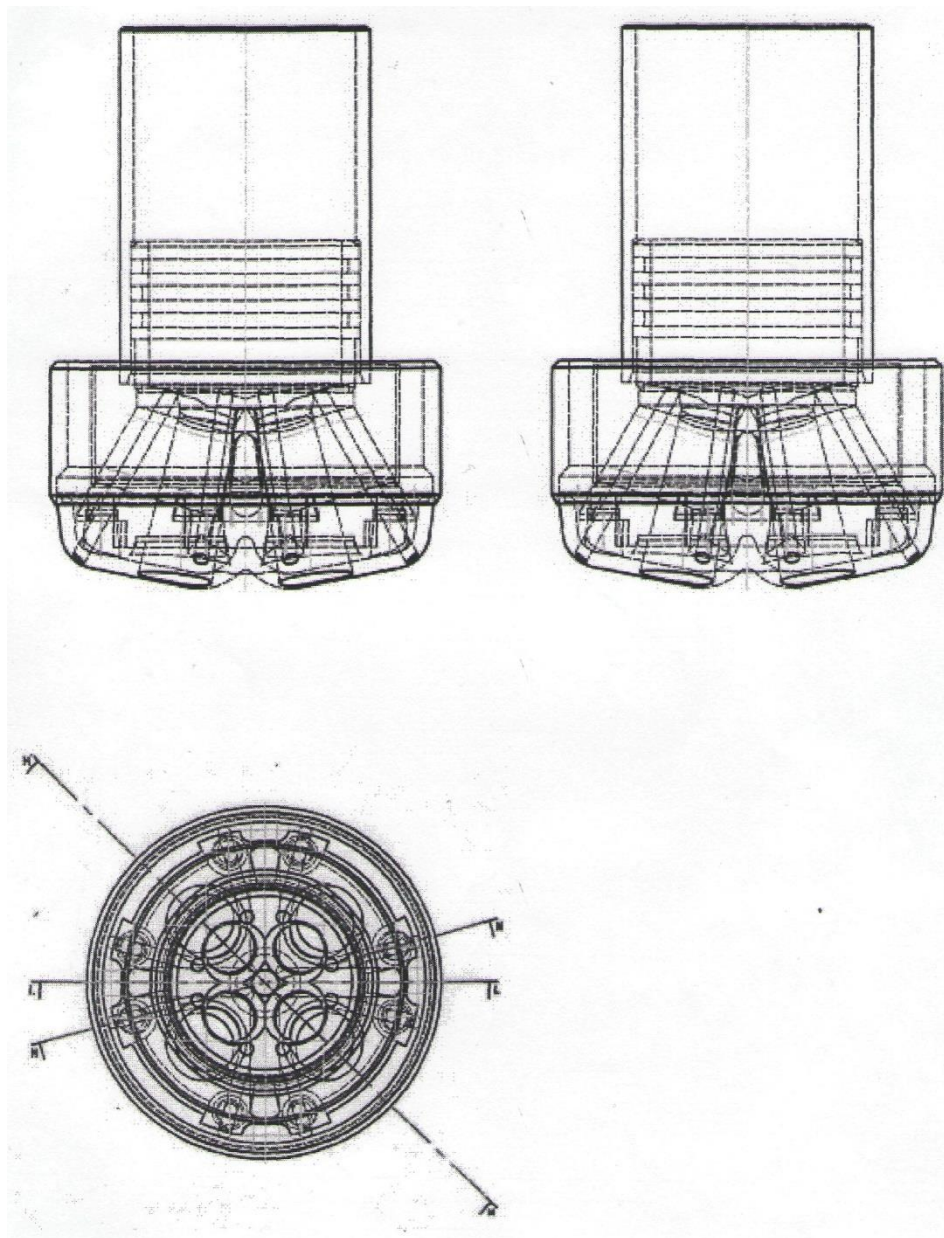


Рис. 5.15. Конструкція наконечника фурми з двоярядним розташуванням сопел для 60 т конвертера (1 - основні сопла; 2 - допоміжні сопла; 3 - тракт підведення кисню)

На початку продування, коли киснева фурма не занурена в шлак, кисень, що витікає з основних сопел, взаємодіє з металевою ванною і переважно витрачається на окиснення заліза, кремнію і марганцю. Кисень, що витікає з додаткових сопел,

практично не використовується для допалювання монооксиду вуглецю. Із запаленням плавки і спінюванням шлаку кисень основних сопел використовується, в основному, на окиснення вуглецю. Газ, що відходить, містить переважно монооксид вуглецю (рис. 5.16). В період окиснення вуглецю кисень, що поступає з додаткових сопел, допалює монооксид вуглецю. Для поліпшення допалювання CO до CO₂ рекомендовано в період окиснення вуглецю підтримувати положення фурми над ванною H₂ дещо вищий, ніж на початку продування Н. Рекомендоване положення фурми H₂/Н повинно складати 1,2 -1,25.

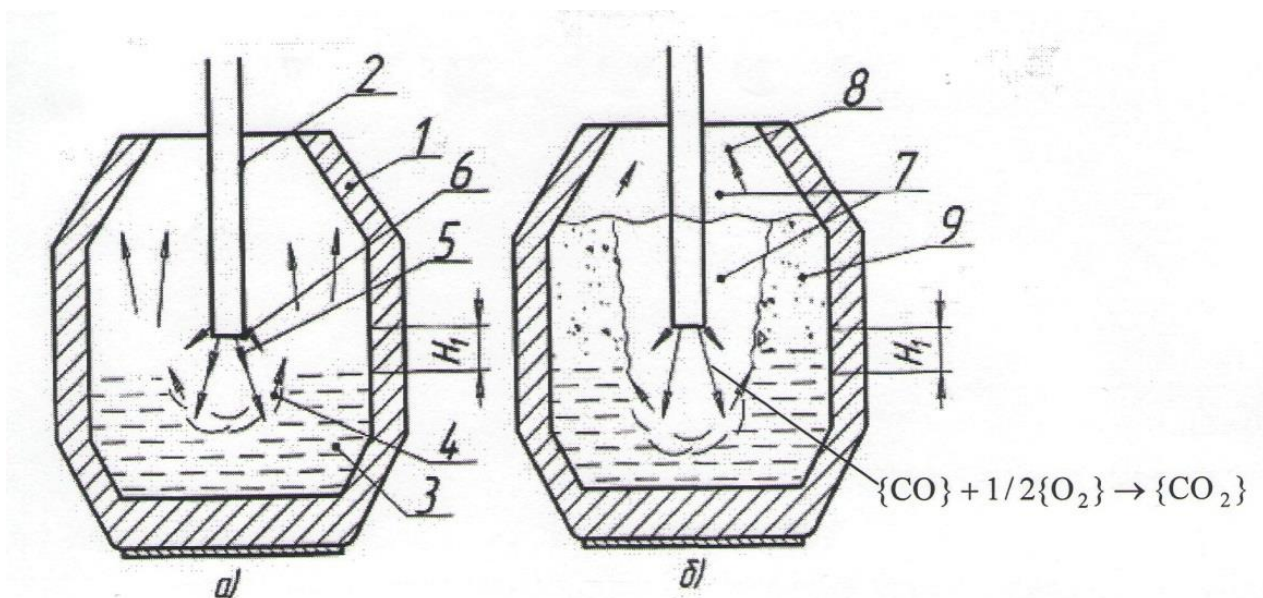


Рис. 5.16. Продування конвертерної ванни з використанням наконечника з дворядним розташуванням сопел (а - продування конвекторної ванни в початковий період плавки; б - продування конвекторної ванни в період знеуглецювання; 1 - кисневий конвертер; 2 - киснева фурма; 3 - металева ванна; 4 - зона взаємодії кисневих струменів з металевим розплавом; 5 - кисневі струмені, що витікають з основних сопел; 6 - кисневі струмені, що витікають з додаткових сопел; 7 - зона допалювання CO до CO₂; 8 - гази, що відходять; 9 - вспечений шлак)

Для аналізу і порівняння результатів експлуатації наконечника з дворядним розташуванням сопел розглядали плавки, продуті типовою 5-ти сопловою фурмою

(кут нахилу сопел 12 до вертикалі, критичний діаметр сопла 23мм, витрата кисню на одне сопло 32м/хв.).

Результати дослідних плавок показали [Ч], що завдяки допалюванню СО до CO_2 , покращується теплова робота конвертера, витрата чавуну на плавку склала 914,67кг/т сталі, що на 7,1кг/т стала менше, ніж на порівняльних плавках. Відмічено скорочення тривалості продування. Інші показники конвертерної плавки залишилися без змін.

Зниження стійкості футерування не спостерігали. Стійкість наконечників з дворядним розташуванням сопел 283 плавки.

5.4. Ефективна технологія при використанні 6-ти соплового наконечника в новій киснево-конвертерній фурмі

На конвертерах малої та середньої ємкості України та КНР, частіше за все, застосовують кисневі фурми з центральним підводом кисню. Останні мають діаметр зовнішньої труби 180, 194, 219 та 245 мм і, в силу цього, в наконечнику розміщують 4 сопла або максимально можливу кількість – 5. В таких фурмах розмістити 6 сопел неможливо, хоча, в певних умовах, виникає необхідність збільшення площі вдування, покращення умов наводки та спінювання шлаку.

На металургійному заводі Chengde Steel (КНР) здійснюють переробку ванадіймісткого чавуна дуплекс процесом. На першому етапі отримують ті відділяють ванадіймісткий шлак для наступної переробки, а рідкий метал цієї переробки рафінують в конвертері для отримання якісної сталі.

Хімічний склад металу, що продувається на сталь після відділення ванадіймісткого шлаку приведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

Хімічний склад напівпродукту, що продувається на сталь

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% V
3,5-4,0	0,007-0,015	0,002-0,004	0,13-0,17	0,03-0,05	0,02-0,04

Температура напівпродукту, що заливається в конвертер $\sim 1371^{\circ}\text{C}$.

Оскільки метал практично не містить кремнію, марганцю та має підвищений вміст фосфору, особливі умови плавки зв'язані з наведенням високоосновного спіненого та рідкорухомого шлаку. Останнє в повній мірі не вдавалося досягти застосовуючи штатну 5-ти соплову фурму з центральним підводом кисню.

В специфічних умовах роботи кисневих конвертерів заводу Chengde Steel проблеми з наведення шлаку серйозно обмежували можливість отримання якісної сталі.

Для вирішення задачі запропоновано замінити штатну 5-ти соплову киснево-конвертерну фурму з центральним підводом кисню на 6-ти соплову з центральним підводом води (приклад на рис. 1.5).

В цьому випадку охолоджуюча вода по центральній трубі подається в наконечник кисневої фурми, омиває поверхню наконечника і по каналах між соплами відводиться в кільцеву щілину, утворену проміжною та зовнішньою трубами.

Кисень подається по кільцю, утвореному центральною та проміжною трубами. В наконечнику фурми по кисневому кільцю можна розмістити 6 сопел (або навіть 7 чи 8).

Для організації кращого шлакоутворення в запропонованій фурмі 3 сопла розміщені під кутом 15° до вертикалі, а 3 сопла під кутом 12° , що було новим технічним рішенням. В таблиці 5.8 приведено параметри нового 6-ти соплового наконечника.

Таблиця 5.8

Параметри 6-ти соплового наконечника з центральним підводом води

Тип сопла	Число сопел	Число Маха	Кут нахилу	Витрата кисню на сопло
Лавалю, більшого діаметру	3	2,1	15°	~90 м ³ /хв
Лавалю, меншого діаметру	3	2,1	12°	~75 м ³ /хв

При застосуванні фурми з центральним охолодженням за рахунок кращого охолодження наконечника, оператор продувки мав можливість знижувати положення фурми над рівнем ванни на 300-500мм. Досягалося краще перемішування конвертерної ванни, покращення шлакоутворення.

В таблиці 5.9 приведено хімічний склад і температуру металу в кінці продувки при застосуванні 6-ти соплової киснево-конвертерної фурми.

Таблиця 5.9

Хімічний склад і температура металу в кінці продувки

C, %	S, %	P, %	T, °C
0,05-0,1	0,017-0,03	0,012-0,02	1650-1680

При цьому хімічний склад кінцевого шлаку характеризувався високою основністю (табл. 5.10). Співвідношення CaO/SiO₂ досягало 4,5-5,5.

Таблиця 5.10

Хімічний склад кінцевого шлаку

CaO, %	SiO ₂ , %	MgO, %	S, %	FeO, %	P, %
35-40	7-8,2	11,5-11,7	0,1-0,14	21-26	1,7-1,73

Порівняння результатів роботи 5-ти и 6-ти соплових киснево-конвертерних фурм узагальнені в роботах [99,100]. В таблиці 5.11 показано, що завдяки більш ранньому наведенню високоосновного спіненого шлаку при застосуванні 6-ти соплової фурми досягнуті кращі результати по видаленню фосфору, значно зменшилося налипання шлаку на фурму швидше «запалювалася» плавка.

Збільшення числа сопел в наконечнику фурми, як правило, супроводжується підвищенням окиснення шлаку. При застосуванні 6-ти соплової фурми склад заліза в шлаку зменшився на 1,36% (таблиця 5.11).

Останнє досягається тим, що центральний підвід води покращував охолодження наконечника та дозволив в основний період продувки знижувати положення фурми над рівнем ванни.

Таблиця 5.11

Порівняння результатів роботи 5-ти и 6-ти соплових киснево-конвертерних фурм

	Споживання кисню, м ³ /т	Температура, °С	Склад Р, %	Склад заліза в шлаку, %
5-ти соплова з центральним підводом кисню	39,03	1638,5	0,021	18,09
6-ти соплова з центральним підводом води	38,16	1638,63	0,017	16,73
Порівняння	-0,87	+0,13	-0,004	-1,36

Склад фосфору в кінцевій сталі знизили на 0,004%, витрати кисню були зменшені на 0,87м³/т.

Подача охолоджуючої води по центральній трубі покращила умови охолодження наконечника фурми, що дозволило істотно збільшити його стійкість, в середньому, до 677 плавок проти 392 плавок на 5-ти сопловій фурмі з центральним підводом кисню. Знижені трудовитрати на очищення фурми та заміну наконечника.

Підвищенню стійкості конвертерної фурми сприяла конусність нижньої частини фурми, яка виконувалася на дільниці довжиною до 6м від наконечника фурми. Наявність конусності призводила до самоочищення поверхні зовнішньої фурми від налиплих капель металу і шлаку.

Висновки до п'ятого розділу

Наконечники нової конструкції випробувані в умовах 4-х киснево-конвертерних цехів.

В киснево-конвертерному цеху металургійного комбінату «Арселор Міттал Кривий Ріг» відпрацювали два типи 5-ти соплових наконечників з різними кутами нахилу.

Важливою перевагою розроблених нових наконечників стало підвищення їх стійкості. Порівняно з типовим їх стійкість збільшилась в 2,2-2,8 рази. При цьому в ході експлуатації нових наконечників практично відсутній знос кромки сопла.

В умовах роботи 160т конвертерів Єнакієвського металургійного заводу застосовувано 5-ти сопловий наконечник, що розроблений за участю автора.

Середня стійкість нових наконечників склала 226 плавки проти 110 плавки у типових наконечників.

Витрата металу шихти на тону сталі дорівнювала 1128,2кг проти 1129,7кг на плавках з типовим наконечником. Знизилась питома витрата кисню, окисленість кінцевого шлаку дослідних плавки (17,11% проти 17,58% на порівняльних).

Для 60т конвертерів Дніпровського металургійного заводу сформований парк 4-х соплових та 5-ти соплових наконечників з кутом нахилу, відповідно 16град і 12град.

Середня стійкість 4-х і 5-ти соплових наконечників складала 520 плавки, що в 3 рази перевищило стійкість штатних литих наконечників. Максимальна стійкість склала 1082 плавки.

Час продування на плавках з використанням 5-ти соплового наконечника нової конструкції дорівнював 19,35хв. на порівняльних 20,18хв. Вміст загального

заліза в шлаці 16,46%, на порівняльних 17,94%, витрати металу шихти 1129,8кг/т проти 1131,8кг/т сталі на порівняльних.

Наконечник кисневої фурми з дворядним розташуванням сопел, що сконструйований для 60т конвертора, на дослідних плавках довів високу ефективність в роботі. Витрата чавуну на плавку склала 914,67кг/т сталі, що на 7кг/т менше ніж на порівняльних плавках.

Експлуатація 6-ти соплового наконечника оригінальної конструкції з центральною подачею охолоджуючої води довела високу ефективність її роботи. Стійкість наконечника склала, в середньому, 677 плавок проти 392, що досягнута типовим 5-ти сопловим наконечником, отримані кращі показники дефосфорації металу, вміст загального заліза в кінцевому шлаці зменшений на 1,36%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача

1. Вдосконалення конструкцій наконечників кисневих фурм, в т.ч. системи охолодження є актуальним завданням і затребуване практикою виробництва сталі в конвертерах.

2. Розроблена нова конструкція наконечника киснево-конвертерної фурми, що складається з штампованого мідного вінця та сталевго блоку з направляючою тарілкою.

3. Вперше в конструкції наконечника запропоновані турбулізатори охолоджувача і роздільники потоків у вигляді спіралей Архімеда.

4. Запропоновані і обґрунтовані паро плазмове нанесення покриття на зовнішню поверхню мідного вінця і технології підготовки поверхні.

5. Виконано математичне моделювання руху потоків охолоджуючої води в наконечнику фурми та біля тепловідводної внутрішньої поверхні вінця.

6. Встановлено, що напрямна тарілка дозволяє радикально змінити напрями потоків охолоджувальної рідини, а за рахунок турбулізаторів охолоджувача у вигляді спіралей Архімеда омивання в за соплових зонах ліквідує «застійні» ділянки.

7. Доведено, що ефективне охолодження досягнуто завдяки конструкції наконечника з прямою тарілкою та вінцем з турбулізаторами у вигляді спіралі Архімеда.

8. Розроблена нова технологія виготовлення мідного вінця і сталевго соплового блоку, що включала розробку штампів збірної конструкції, моделювання процесів штамповки, власно штамповку заготовок та струменево-абразивну обробку внутрішньої поверхні мідного вінця.

9. Вперше в Україні застосований метод паяння для з'єднання внапуск поверхонь мідного вінця з поверхнями сталевго соплового блоку і зовнішньої

труби. Дослідженнями встановлені температури паяння (858-900°C) і час витримки наконечника в печі (40 хвилин).

10. Вивчені макро- і мікро-структура швів біметалічного з'єднання конструкційної сталі та міді, доведена рівномірність структури і фазового складу шва та максимальна міцність паяних з'єднань.

11. Розроблені і запроваджені спосіб і стенд для випробувань наконечників на герметичність і щільність паяних швів.

12. Наконечники нової конструкції пройшли промислову апробацію в киснево-конвертерних цехах України. Важливою перевагою розроблених та виготовлених наконечників стало підвищення їх стійкості в 2-3 рази. При цьому в ході експлуатації нових наконечників відсутній знос кромки сопла.

13. На плавках в 160т конвертерах в порівнянні з експлуатацією типових наконечників зменшилися витрати металошихти, окисленість кінцевого шлаку.

14. Для 60т конвертерів Дніпропетровського металургійного заводу сформований парк 4-х та 5-ти соплових наконечників нової конструкції, їх середня стійкість склала 520 плавки, максимальна 1082 плавки.

15. Час продування на плавках з використанням 5-ти соплового наконечника нової конструкції дорівнював 19,35хв., на порівняльних 20,18хв., вміст загального заліза в шлаці 16,46% проти 17,94% на порівняльних, витрати металошихти 1129,8кг/т проти 1131,8кг/т сталі на порівняльних плавках (60т конвертер).

16. Наконечник кисневої фурми з дворядним розташуванням сопел, що був сконструйований і виготовлений для 60т конвертера довів високу ефективність в роботі. Витрати чавуну на плавку зменшені на 7кг/т і склали 914,67кг/т сталі.

17. На металургійному заводі в м. Ченгдє (КНР) експлуатація 6-ти соплового наконечника оригінальної конструкції з центральною подачею охолоджуючої води довела високу ефективність її роботи. Стійкість наконечника склала, в середньому 677 плавки, проти 392, що досягнута типовим п'яти сопловим наконечником, отримані кращі показники дефосфорації металу, вміст загального заліза в кінцевому шлаці зменшені на 1,36%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конверторного процесса. М.: Металлургия, 1975. 375 с.
2. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конверторные процессы производства стали. К. Донецк: Вища школа, 1984. 343 с.
3. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конверторного процесса. К. Донецк, 1981. 183 с.
4. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов [Текст]: моногр. – М.: Металлургия, 1993. 150 с.
5. Баптизманский В.И., Бойченко Б.М., Черевко В.П. Тепловая работа кислородных конверторов. М.: Металлургия, 1988. 174 с.
6. Величко О.Г., Бойченко Б.М., Харлашин П.С., Нехаев М.С., Штода М.М. Металургія сталі. Конвертерне виробництво: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Підручник, видання друге перероблене і доповнене – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2015. 434 с.
7. Лю Джи Чанг, Лю Тянь чжуан. Фурма (2-й выпуск) Пекин. Издательство «Пресса металлургической промышленности». 2017. январь, 180 с.
8. Баптизманский В.И., Величко А.Г., Шибко А.В. Дутьевые устройства. Бюл. «Черметинформация». Черная металлургия, 1990. № 7. С. 8-15.
9. Баптизманский В.И., Величко А.Г., Шибко А.В. Дутьевые устройства кислородных конвертеров и их работы. Бюл. «Черметинформация». 1987. №1. С. 2-15.
10. Чернятевич И.В., Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г. Современное состояние и совершенствование конструкций кислородных фурм для продувки конверторной ванны. Новости науки Приднепровья. Инженерные дисциплины. 2008. № 1-2. С. 62-65.
11. Величко А.Г., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Стоянов А.Н. Изучение влияния изменений в различные периоды компании конвертера параметров наконечника

кислородной фурмы на показатели процесса. Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. 2008. № 1-2. С. 49-50.

12. Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Пантейков С.П., Ивко В.В. Освоение шестисопловых наконечников фурм и технологии плавки с их использованием. Теория и практика кислородно-конверторных процессов: труды IX Международ. наук.- техн. конф. Днепропетровск, 1998. С. 57-58.

13. Величко А.Г., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Гришин В.С. и др. Вариативные конструкции кислородных фурм для конверторного цеха ОАО «Арселор Миталл Кривой Рог». Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни, 2008. № 1-2. С. 47-48.

14. Коттедж Д.П., Эколс Г.Л., Шун Д., Энлер К. Современные разработки многосопловых фурм для конверторов ЛД и взаимосвязь между конструкцией головки фурмы и металлургическими результатами. АГМЕ: материалы конф., апрель 1992 г. Торонто, 1992. С. 217-225.

15. Величко А.Г., Гришин В.С., Грядунов В.А., Пищида В.И. Усовершенствование конструкции наконечника кислородной фурмы для конверторного производства. Металл и литье Украины, 2002. № 3-4. С. 32-33.

16. Писаренко В.Г., Макаренко В.И., Чернятевич И.В., Чернятевич А.Г. Направления совершенствования продувочного оборудования конверторного цеха ОАО «Арселор Миталл стил Кривой Рог». Металлургическая и горнорудная промышленность, 2006. № 8. С. 98-103.

17. Климанчук В.В., Томаш А.А., Сущенко А.В., Ковура А.Г. Энергоресурсосберегающие разработки Приазовского государственного технического университета и Мариупольского металлургического комбината им. Ильича в металлургическом производстве. Металл и литье Украины, 2005. № 7-8. С.6-12.

18. Колпаков С.В., Старов Р.В., Смоктий В.В., Лебедев В.И. Технология производства стали в современных конвертерных цехах. М.: Машиностроение, 1991. 464 с.

19. Гришин В.С., Грядунов В.Л., Тяньи Лю, Пищида В.И. Опыт эксплуатации наконечников фурм с различным количеством сопел в условиях ККЦ ОАО ДМЗ им. Петровского. Металл и литье Украины, 2006. № 5. С. 6-8.

20. Катенин Б.Н., Винокуров Г.В., Лакунцов А.В., Лебедев В.И. Влияние конструкции дутьевой фурмы на показатели конвертерной плавки. Сталь. 1980. № 9. С. 59-63.

21. Пантейков С.П., Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Протопопов Е.В. Усовершенствование системы охлаждения сварных конструкций фурменных головок для 250-тонных конвертеров. Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. 2008. № 1-2. С. 54-59.

22. Охотский В.Б. Износ наконечников фурм для верхней кислородной продувки. Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни, 2008. № 1-2. С. 46-47.

23. Охотский В.Б., Величко А.Г., Лю Тяньи, Молчанов Л.С. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Плавка. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2016. №5. С. 12-17.

24. Охотский В.Б., Величко А.Г., Лю Тяньи, Молчанов Л.С. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Шихтовка. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2016. № 3. С. 27-30.

25. Явойский А.В., Хисамутдинов Н.Е., Бекетов И.В., Белов В.В. Многорежимная фурма для кислородных конвертеров. Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 1. С.13-17.

26. Чернятевич А.Г., Ганзер Л.А., Айзатулов Р.С., Сигарев Е.Н. Комбинированная продувка конвертерной ванны с использованием двухконтурной фурмы. Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1988. № 7. С. 48-50.

27. Величко А.Г., Бойченко Б.М., Гришин В.С., Шипко А.И. Опыт использования наконечников кислородных фурм с двухрядным размещением сопел в условиях ОАО ДМЗ им. Петровского. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 115-116.

28. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны в условиях комбинированной продувки. Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 17-22.

29. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров. Известия вузов. Черная металлургия. 1995. № 12. С. 13-17.

30. Stone R.P., Neith D., Roester S. et al. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. AIS Tech 2009 Proceedings. 2009. N 1. P. 737-747.

31. Чернятевич А.Г., Коваленко А.Г., Сущенко А.В., Чернятевич И.В. Разработка и совершенствование конструкции двухъярусной фурмы для 160-т. конвертеров ПАО «ЕМЗ». Теория и практика металлургии. 2014. № 3. С. 13-17.

32. Rumarchuk N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations. Steelmaking Conference Proceedings. 1998. P. 445-449.

33. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О., Лаврик Д.А. Питання теорії і практики підвищення ефективності комбінованої продувки конвертерної ванни. Теорія і практика металургії. 2018. № 1-2. С. 83-95.

34. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В., Молчанов Л.С. Разработка конструкции двухъярусной фурмы и режима продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «Арселор Миталл Кривой Рог» с ее использованием. Теория и практика металлургии. 2012. № 5-6. С. 76-85.

35. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. Металл и литье Украины. 2017. № 6-7. С. 17-21.

36. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О., Чубин М.К. Термодинамическое и высокотемпературное моделирование комбинированной продувки с использованием трехъярусной кислородной фурмы. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. трудов. Днепр: ИЧМ, 2017. Выпуск 31. С. 110-122.

37. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Уточнення термодинамічної моделі рафінування конвертерної ванни під час продувки через 3-ярусну кисневу фурму. Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2017. № 5. С. 72-80.

38. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Направления повышения эффективности продувки ванны 160-т. конвертеров ПАО «Арселор Миталл Кривой Рог». Теория и практика металлургии. 2017. № 3-4. С. 66.

39. Чернятевич И.В., Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г. Современное состояние и направления совершенствования конструкций кислородных фурм для продувки конвертерной ванны. Бюл. научно-техн. и эконом. информации. «Черная металлургия». 2008. Вып. 12 (1308). С. 23-27.

40. Сущенко А.В., Курдюмов А.А., Буга И.Д. и др. Повышение стойкости наконечников фурм для 350-т. конвертеров. Сталь. 1996. № 5. С. 14-17.

41. Сущенко А.В., Евченко В.Н., Балаба А.П. К вопросу о теплообмене в системе охлаждения кислородных фурм конвертеров верхнего дутья. Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 1. С. 19-23.

42. Баптизманский В.И., Охотский В.Б., Шибко А.В., Величко А.Г. Повышение стойкости конвертерных фурм. Сталь. 1987. № 5. С. 31-33.

43. Охотский В.Б. Износ наконечников для верхней кислородной продувки. Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. 2008. № 1-2. С. 45-47.

44. Баптизманский В.И., Охотский В.Б., Шибко А.В. Повышение стойкости конвертерных фурм. Сталь. 1987. № 11. С. 47-50.

45. Пантейков С.П., Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Несвет В.В., Мощный В.В. Повышение стойкости верхних конвертерных фурм. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 6. С. 17-18.

46. Жульковский О.А. Математическое моделирование тепловой работы наконечников верхней кислородной фурмы. Изв. вузов. Черная металлургия. 2000. № 4. С. 8-12.

47. Пантейков С.П. Пути совершенствования систем охлаждения наконечников верхних дутьевых фурм для крупнотоннажных конвертеров. Дніпропетровськ: Системні технології, 2000. Т.1. С. 25-32.

48. Пантейков С.П., Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Несвет В.В. Применение в конвертерном цехе ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского» конструкции фурменных головок с симметричным охлаждением засопловых зон отдельными потоками. Труды VII конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2003. С. 235-238.

49. Пантейков С.П., Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Несвет В.В. Использование в конвертерном цехе ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского» конструкции фурменных головок с симметричным охлаждением засопловых зон без изоляции потоков воды.] По материалам X Международной научно.- техн. конф. «Теория и практика кислородно-конвертерных процессов» Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 7. С. 106-108.

50. Сущенко А.В., Балаба А.П. Численное моделирование гидродинамики течения охлаждающей воды в наконечниках кислородно-конвертерных фурм. Новини науки Придніпров'я. Інженерні дисципліни. 2008. № 1-2. С. 54-59.

51. Petrshka R., S. Manley Improvement in Oxygen Lance Life. Steelmaking Conference Proceeding. 1998. P. 245-250.

52. Сущенко А.В., Балаба А.П. Работа кислородных фурм для верхней продувки конвертеров в критических условиях. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 117-120.

53. Ma Xian Giun. Huanan ligong dazue xuebcso. Ziran kexuc ban = j. S China Union. Technol. Natur. Sci. Ed. 2003. Vol. 31, N 5. P. 43-46.

54. Olivares O., Elias A., Sanchez R., Diaz-Cruz M., Morales R.D. Physical and mathematical models of gas-liquid fluid dynamics in LD converters. Steel research int. 2002. Vol. 73, No. 2. P. 44-51.

55. Демидов К.Н., Зорихин С.А., Кузнецов О.А., Батуев С.Б., Шеховцов Е.В. Опыт применения кислородных фурм с литыми пятисопловыми наконечниками. Сталь. 2000. № 5. С. 31-32.

56. Мельников А.П., Садоха М.А. Медные литые фурмы для сталеплавильного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 3. С. 19-20.

57. Караник Ю.А. Новая технология литья медных наконечников кислородно-конвертерных фурм. *Сталь*. 2004. № 6. С. 43-46.

58. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Численное моделирование и промышленная отработка конструкций цельноточеных наконечников кислородно-конверторных фурм. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2005. № 12. С. 16-19.

59. Чернятевич А.Г., Омесь Н.М., Боровиков Г.Ф., Ивко В.В. Точеные наконечники для кислородных фурм конвертеров. *Бюл. НТИ «Черная металлургия»*. 1996. № 1. С. 42-44.

60. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Проблемы разработки и эксплуатации цельноточеных наконечников для кислородных фурм. *Металл и литье Украины*. 2005. № 3-4. С. 67-69.

61. Сущенко А.В., Ларионов А.А., Климанчук В.В., Семенюк П.П. Совершенствование конструкции кислородной фурмы, дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки в 160-т конвертерах ОАО «МНК» им. Ильича». *Металл и литье Украины*. 2005. № 3-4. С.64-66.

62. Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Пантейков С.П., Ивко В.В. Повышение стойкости сварных конструкций наконечников верхних кислородных фурм в конвертерном цехе Днепровского металлургического комбината. *Труды пятого конгресса сталеплавильщиков*. М., 1999. С. 137-139.

63. Буга И.Д., Воробьев А.В., Сущенко А.В., Ларионов А.А. Поиск путей достижения передовых показателей металлургического производства Приазовским государственным техническим университетом и ОАО «МК Азовсталь». *Металл и литье Украины*. 2005. № 7-8. С.12-18.

64. Пантейков С.П. Использование шестисопловых головок повышенной стойкости к верхним фурмам и технологии ведения плавки с их использованием в

конвертерном цехе ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского». Металл 2000: тез.докл. научн. конф. Жлобин, 2000. С. 47-50.

65. Большаков В.И., Ващенко А.П., Величко А.Г., Дышлевич И.И., Ермакратьев В.А. Высоконадежное металлургическое оборудование ресурсосберегающих технология. Днепропетровск: Институт технологии, 2000. 232с.

66. Пантейков С.П. О рациональной конструкции наконечника для головок верхних фурм конвертеров. Сталь. 2001. № 4. С. 79-82.

67. Величко А.Г., Гришин В.С., Антонен В.Д. Технологические особенности производства сварочно-штамповочных работ. «Теория и практика кислородно-конвертерных процессов»: тр. IX Международной науч.-практ. конф. Днепропетровск, 1998. С. 60-61.

68. Величко А.Г., Гришин В.С. К вопросу о предэксплуатационной доводке наконечников кислородных фурм. «Теория и практика кислородно-конвертерных процессов: тр. IX Международной. науч.- практ. конф. Днепропетровск, 1998. С. 58-59.

69. Величко А.Г., Савранский Л.В., Омесь Н.М., Шибко А.В. Обработка наконечника кислородной фурмы для улучшения его эксплуатационных характеристик. Труды 4-го Конгресса сталеплавателей, 7-10 октября 1996 Москва. М., 1997. С. 115-116.

70. Крашенинников М.Г., Филонов М.Р., Тиранов М.Г. СВС – огнеупорные керамические материалы. Мариуполь: ПГТУ, 2004. С. 58-62.

71. Коваленко А.Г., Коцур С.Д., Сорокотягин А.М., Босякова Н.А. Применение бескомпенсаторных наконечников кислородных фурм для продувки конвертерной ванны сверху. Сталь. 2007. № 11. С.33-34.

72. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. Solid Works Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

73. Высококачественные водоохлаждаемые медные изделия. Metallургическое производство и технология металлургических процессов. МРТ. 2018, №2. С. 25.

74. Величко О.Г., Гришин В.С., Морозенко О.П., Лю Тяньи, Грядунов В.А., Попов В.М. Патент на корисну модель №20095 України, МПК (2006)С21 5/48. Багатосопловий наконечник конвертерної фурми. Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № у 2006 07103; заявл. 6.06.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

75. Величко А.Г., Гришин В.С., Лю Тяньи, Грядунов В.Г. Компенсаторы кислородных фурм. Металл и литье Украины, 2008. №2. С. 22-23.

76. Величко О.Г., Гришин В.С., Морозенко О.П., Лю Тяньи, Грядунов В.А., Попов В.М. Патент на корисну модель №19464 України, МПК (2006) С 21С 5/48. Компенсатор фурми. Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № у 200607103; заявл. 26.06.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

77. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.

78. Величко А.Г., Гришин В.С., Лю Тяньи, Грядунов В.А., Попов В.Н. Модульный принцип подготовки производства наконечников кислородных фурм. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. № 7. С. 230-242.

79. Гришин В.С., Лю Тяньи, Грядунов В.А. Конструкции наконечников фурм ККУ ОАО «ДМЗ им. Петровского» на основе модульных технологий. Металл и литье Украины. 2007. № 5 С. 23-25.

80. Соловьев Д.С., Соловьев С.Л. Кризис кипения при движении жидкости в каналах с высокими массовой скоростью и недогревом. Теплоэнергетика. 2007. № 3. С. 33-38.

81. Величко А.Г., Тяньи Лю, Прохоренко Д.А., Циколия А.З., Абрамов С.А., Гришин В.С. Исследование и организация охлаждения в наконечниках кислородно-конвертерных фурм. XII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», Jun 4-7 2016, Varna, Bulgaria Proceedings Vol. 2. P. 61-63.

82. Величко О.Г., Лю Тяньи, Прохоренко Д.А., Ціколія А.З., Абрамов С.О., Морозенко О.П., Гришин В.С. Патент на корисну модель №113238 України, МПК С 21С 5/48 (2006.01). Фурмена головка з турбулізаторами охолоджувача. Заявник і патентовласник Дніпропетровськ НМетАУ № u 201605824; заявл. 30.05.2016; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2.

83. Величко О.Г., Лю Тяньи, Прохоренко Д.А., Ціколія А.З., Абрамов С.О., Морозенко О.П., Гришин В.С. Патент на корисну модель №127163 України, МПК С 21С 5/48 (2006.01). Фурмена головка з елементами пасивного посилення турбулентності охолоджувача. Заявник і патентовласник Дніпропетровськ НМетАУ № u 201712608; заявл. 18.12.2017; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14.

84. Патент на корисну модель №20095 України, МПК (2006)С21 5/48. Багатосопловий наконечник конвертерної фурми. /О.Г. Величко, В.С. Гришин, О.П. Морозенко, Лю Тяньи, В.А. Грядунов, В.М. Попов// Заявник і патентовласник Дніпропетровськ ТОВ НВП «Укрфурмет». № u 2006 07103; заявл. 6.06.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

85. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.

86. Тузлов В.А. Основные направления исследований, основанные на семантическом анализе текстов [Электронный ресурс] Режим доступа: [URL: http://www.armath.spbu.ru/ru/info/tuzov/onapr.html](http://www.armath.spbu.ru/ru/info/tuzov/onapr.html).

87. Абрамов С.О. Обґрунтування абразивного матеріалу для активації поверхні мідної ламелі струменеві-абразивним методом. «Наукові нотатки»: міжвуз. зб. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2019. Вип. 66. С. 10-17.

88. Nikolenko S.V., Kuzmenko A.P., Timakov D.I. Nanostruring a steel surface by electrospak treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Vol. 47. Jsa3. P. 217-224.

89. Сорока О.В. Вибір параметрів дискретно-модифікованих зносостійких поверхонь. Вісник Нац. техн. ун-т України. Приладобудування. К.: НТУУ «КРІ», 2007. Вип. 33. С. 119-126.

90. Негруб С.Л., Володько Е.Г. Комбинированный метод нанесения покрытий посредством электролитно-плазменной технологии. Вісн. НТУ «ХПИ». Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків, 2016. № 7 (1179). С. 13-19.

91. Velychko O.G., Liu T., Abramov S.O., Marchuk I.V., Gryshin V.S. Technological features of applying cluster thermal barrier coatings on copper surfaces of the converter lance tips. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, m. Dnipro, 2020, No. 3, pp. 53-58.

92. Лю Тяньи. Моделирование гидродинамических процессов при охлаждении наконечника кислородной фурмы. XI International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», Jun 4-7 2015, Varna, Bulgaria Proceedings Vol. 2. P. 46-51.

93. Величко О.Г., Лю Тяньи, Абрамов С.О., Гришин В.С. Enhancing the efficiency of water cooling of oxygen blowing lance tip. Теорія і практика металургії. Дніпро, 2018. №1-2. С. 7-13.

94. Величко А.Г., Гришин В.С., Богданчикова С.В., Лю Тяньи. Управление инженерными данными и жизненным циклом наконечников кислородных фурм. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. №7. С. 242-247.

95. Гришин В.С., Лю Тяньи, Богданчикова С.В., Кулаков А.В. Использование патентной информации для прогнозирования развития конструкции наконечников фурм. *Металл и литье Украины*. 2007. С. 26-27.

96. Лю Тяньи. Моделирование процесса штамповки венца и корпуса наконечников кислородных фурм. «Системні технології» Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро: НМетАУ, 2017. Випуск №3(112) С. 146-152.

97. Шибко А.В., Величко А.Г., Лю Тяньи, Грядунов В.Г. Повышение долговечности наконечников кислородных фурм. *Металл и литье Украины*. 2008. №5 С. 35-42.

98. Гришин В.С., Грядунов В.Л., Лю Тяньи, Пищида В.И. Опыт эксплуатации наконечников фурм с различным количеством сопел в условиях ККЦ ОАО ДМЗ им. Петровского. *Металл и литье Украины*. 2006. №5 С. 6-8.

99. Лю Джи Чанг, Лю Тяньи, Величко А.Г. Эффективная технология при использовании новой кислородно-конвертерной фурмы. Системні технології. 2017. №3(110) С. 40-44.

100. Лю Джи Чанг, Лю Тяньи, Величко А.Г. Повышение технологической эффективности продувки при изменении конструкции фурмы. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» 28-30 березня Дніпро, НМетАУ. 2017. С. 138.