**РЕФЕРАТ**

роботи, що висувається на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2018 року на тему

**“Створення та впровадження інноваційних технологій електросталеплавильного виробництва легованих сталей спеціального призначення”**

У роботі, що висувається, викладені наукові передумови і результати створення і розвитку багатостадійних технологій металургійного виробництва марок електросталі підшипникового і корозійностійкого сортаменту з метою забезпечення гарантованих показників якості металу функціонального призначення і підвищення конкурентної спроможності металопродукції на вітчизняному і зарубіжних ринках.

**Розділ 1.** **Створення інноваційної технології виробництва електросталі підшипникового сортаменту з регламентованим вмістом і складом неметалевих включень.**

У структурі електросталеплавильного виробництва ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» значний сегмент за обсягом виплавки і в вартісному вираженні займає підшипникова сталь групи ШХ4 ... ШХ15СГ-В відкритої виплавки в дугових печах з позапічної обробкою.

Показником якості підшипникового металу є низький рівень його забрудненості неметалевими включеннями в поєднанні з вимогами регламентації хіміко-мінералогічного складу і розмірів. Вид, кількість включень, як і неоднорідність розподілу карбідної фази ідентифікуються методом оптичної металографії з оцінкою балами по еталонним шкалам міждержавного стандарту ГОСТ 801-78. Особливістю чинного стандарту ГОСТ 801-78 є градація допустимих балів включень з урахуванням профілерозмірів і груп прокату за трьома базовими видами включень – сульфідами, оксидами і глобулями.

Завдання отримання підшипникової сталі з регламентованими типами і вмістом включень посилюється при контролі якості прокату по закордонним методам випробувань ASTM E-45 (метод А) (США), DIN 50602 (метод К) (Німеччина), JIS G 4805 (Японія).

Стандартом випробувань ASTM Е-45, що використовується у більшості закордонних країн, нормуються два види включень сульфіди (А) і оксиди. Останні підрозділяються на три підвиди: оксиди (корунд) (В); оксиди пластичні (силікати) (С) і оксиди глобулярні (D).

Слід зазначити важкореалізованість виробництва сталі ШХ15СГ-В з контролем якості металу за шкалами ASTM Е-45 (метод А), що складається також і в тому, що по кожному з чотирьох видів включень контролю підлягають найбільш тонкі (тн) і найбільш товсті (тл) включення. Чисельні значення балів при оцінці заготовки і сортового прокату підшипникової сталі по неметалевим включенням по ASTM Е-45 (метод А) узгоджуються протокольно замовником і виробником підшипникової сталі.

Оксидні важкодеформуємі включення, що класифікуються згідно з ГОСТ 801-78 як «оксиди» і «глобулі», надають найбільш негативний вплив на стійкість підшипників.

У сталі ШХ15СГ, що має наскрізну прожарюваність і призначену для виготовлення великогабаритних тіл кочення, особливого значення набувають розмірний фактор і деформованість включень на стадії прокатки металу на великі профілерозмірів (≥ 180 мм). Так, під час прокатки злитка вагою 4 т на профіль ≥ 180 мм (V група ГОСТ 801-78) ступінь обтиску ε (відношення площ вихідного і кінцевого перерізів) становить 4…6, для профілю 40 мм (I група ГОСТ 801-78) показник ε досягає значень 100…125. У великих профілерозмірах включення дефрагментуються в набагато меншому ступені, що знаходить відображення в підвищених значеннях балів здавального контролю за нормами ГОСТ 801-78.

У той же час аналіз якості підшипникового металу за результатами здавального контролю заготовок і сортового прокату свідчить про те, що 10-15% металу, виплавленого за традиційною технологією, призначалося на повторний контроль, причому в 70…80% випадків причиною невідповідності металу вимогам ГОСТ 801-78 є неметалеві включення, ідентифіковані як глобулі і оксиди.

Багаторічний виробничий досвід заводу «Дніпроспецсталь» показує, що виплавка сталі марок ШХ15СГ і ШХ15 зі стабільними і високими показниками виходу придатних партій заготовок і сортового прокату при першому здавальному контролі, являє проблемне, важко здійсненне технологічне завдання.

Діюча на підприємстві наскрізна схема отримання підшипникової сталі включала три технологічних стадії. На першій технологічній стадії в печі ДСП-60 виплавляється високовуглецевий металополупродукт (0,75…0,80% С) з регламентованим вмістом фосфору під високоокисленим шлаком. Під частково розкисленим шлаком металополупродукт випускають з печі в приймальний ківш з відсіченням пічного шлаку. В ході випуску металу в ківш, футерований тиксотропною глиноземистою вогнетривкою масою (стіни ковша) і періклазовуглецевою цеглою (шлаковий пояс), присаджують шлакоутворюючі тверді матеріали (ТШМ) суміш (вапно + плавиковий шпат співвідношенням 3:1). При наповненні однієї третини висоти ковша метал розкислюють алюмінієм.

Сформований у ковші шлак з ТШМ має відносно підвищений вміст FeO і MgO. В ході операцій випуску та формування шлаку метал в ковші розкислюють алюмінієм, а після закінчення випуску і витримки його в ковші під шлаком початкової стадії позапічної обробки, шлак скачують і наводять другий шлак також з ТШМ. Далі ківш транспортується і встановлюється на стенд УПК, де рафінують сталь під струмом протягом 80…100 хв.

Вапняно-фторідкальцієвий шлак на УПК характеризується високою основністю, розкисленністю і десульфуруючою здатністю. В ході обробки сталі на УПК метал продувають аргоном з витратою 100…150 л/хв. Після закінчення обробки металу на УПК ківш з металом подають на вакуумування з метою дегазації і вуглецевого розкислення сталі.

Підшипникова сталь марочного хімічного складу розливається по виливницям з вагою виливка злитків 3,6 т. Злитки прокочують з отриманням трубних заготовок і сортового прокату металу п'яти розмірних груп I - V по ГОСТ 801-78.

До впровадження розробленої технології вихід придатного сортового прокату з першого здавального контролю якості сталі не перевищував 60-70%. Однією з основних причин підвищеного кількості випадів зразків з високими балами по забрудненості сортового прокату неметалевими включеннями (НВ), і перш за все, глобулярними важкодеформованими алюмінатами кальцію, є використання феросиліцію марки ФС65 з не регламентованим стандартом ДСТУ 4127-2002, а також особливостями формування продуктів реакції розкислення сталі при роздільному введенні марганцю (феромарганцю) і кремнію (феросиліцію).

На підставі фізико-хімічного моделювання процесів розкислення сталі виконаний аналіз реакцій відновлення кальцію з шлакового розплаву і формування включень з урахуванням співвідношення активностей розчинених елементів. За результатами виконаних досліджень розроблена і, починаючи з 2009 р, впроваджена інноваційна технологія режимів розкислення і легування металу з використанням в якості комплексного розкислювача і легуючого феросилікомарганцю МнС17 (ДСТУ 3548-97) замість високовуглецевого феромарганцю і феросиліцію.

Встановлено, що при введенні феросилікомарганцю замість феросиліцію ФС65 (з вмістом 0,4-0,6% Са) утворюються продукти реакції розкислення металу у вигляді легкоплавких силікатів марганцю, які найбільш повно асимілюються шлаком при обробці сталі в ковші-печі шлакоутворювальними сумішами. Науково-обґрунтована диверсифікація застосовуваних феросплавів дозволила знизити вміст кальцію в металі, зменшити забрудненість сталі НВ, особливо глобулярними, підвищити вихід придатного при оцінці НВ по ГОСТ 801-78 з 1 контролю до 98%, і, як наслідок, забезпечити економічний ефект за рахунок зниження втрат металу через НВ і економії питомих витрат феросплавів на 5 кг/т.

Висока і стабільна якість металу, атестованого за методами і нормами зарубіжних стандартів ASTM E-45, (метод А); DIN 50602 (метод К), WTm 138 і ін.) забезпечило підприємству довгострокові замовлення зарубіжних споживачів підшипникового металу і значно розширило експортні можливості ПрАТ «Дніпроспецсталь».

**РОЗДІЛ 2. Системний аналіз діючої технології виробництва виплавки корозійностійких сталей з контролем якості металу сучасними методами фізичного матеріалознавства.**

Щорічне виробництво корозійностійких сталей (КСС) на світовому ринку становить 41,6 млн. т (2015 р.). Традиційними сферами застосування КСС є нафтохімія, хімічне та кріогенне машинобудування і оборонні галузі. У структурі виробничої програми ПрАТ «Дніпроспецсталь» частка КСС відповідального призначення досягає 30…40%.

ПрАТ «Дніпроспецсталь» є єдиним на Україні підприємством з виробництва прокату й поковок із високоякісних і спеціальних сталей і сплавів різного призначення, у т. ч. трубної заготовки. Значна частина при формуванні фінансового бюджету ПрАТ «Дніпроспецсталь» залежить від реалізації готової продукції як по об'ємах виплавки, виробництва прокату й поковок, так і у вартіснім вираженні належить сортаменту легованих корозійностійких сталей.

На ПрАТ «Дніпроспецсталь» освоєно понад 200 марок корозійностійкої сталі мартенситного, мартенситно-феритного, феритного, аустенітно-феритного і аустенітного класів, в тому числі низьковуглецевих сталей з вмістом вуглецю ≤0,03%, з нормованим вмістом сірки і легованих азотом, а також сталей типу дуплекс.

Технологічною схемою виробництва сталей марок 03Х18Н10, 03Х17Н13М2 (тобто марок зі вмістом вуглецю до 0,03%) є виплавка напівпродукту у відкритій дуговій печі (ВДП) з наступною обробкою розплаву в агрегаті газокисневого рафінування (ГКР). Виплавка сталі марок типу 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т здійснювалася або прямо в ВДП, або за схемою ВДП+ГКР. Ефективність і переваги розробленої технології виплавки із застосуванням агрегату ГКР наступні:

- виробництво низьковуглецевих (з вмістом С до 0,03%) корозійностійких марок сталей, які широко використовуються у світі;

- більш широке використання менш дорогого високовуглецевого ферохрому (ФХ 800, ФХ 900) для легування сталі;

- збільшення ступеню рафінування розплаву й, відповідно, більш висока чистота сталі від забруднення неметалічними включеннями.

Задля підвищення техніко-економічних показників виробництва і стабілізації характеристик якості КСС виконано фізико-хімічний аудит впливу параметрів багатоскладової наскрізної технології виплавки та позапічної обробки сталей зазначеного сортаменту. Засобами фізичного матеріалознавства, оптичної мікроскопії досліджені макро- і мікроструктура сталі, вміст неметалевих включень різнорідного хіміко-мінералогічного складу. З метою формування включень в двохфазній зоні та утворення макронеоднорідностей розроблена і впроваджена технологія розливки сталей у виливниці з використанням сучасних тепловставок і утеплюючих матеріалів, що забезпечило зниження браку КСС на стадії прокату по показнику «поверхня+УЗК» з 6,0% (2009 р.) до 0,6% (2017 р.)

Одним з найважливіших напрямків зниження собівартості виплавки КСС є зниження питомої витрати дорогих феросплавів і легуючих елементів Ni, Сr, Мо, Мn, Si.

З метою підвищення ефективності виробництва корозійностійких сталей (КСС), зниження собівартості продукції в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь», підвищення конкурентоспроможності металопродукції виконаний наступний комплекс робіт:

Розроблена технологія виробництва економно легованих КСС, що виплавляються за схемою ВДП-ГКР-УПК і ВДП-УПК. Знижені витрати дорогих легуючих елементів і феросплавів Ni, Сr, Мо, Sі, Ті за рахунок роботи на нижніх допустимих значеннях хімічного складу сталі. Методами математичного аналізу і статистики проаналізовані масиви з декількох сотень плавок КСС. Встановлено, що при певних співвідношеннях хімічного складу металу гарантовано забезпечуються нормативні вимоги механічних властивостей сталі, у т.ч. при високих температурах, вимоги по допустимому вмісту альфа-фази в аустенітній корозійностійкій сталі, а також технологічна пластичність при прокаті і число скручувань на гаряче кручення при дослідженні в цеху іспитів. Розроблені звужені межі хімічного складу по таких елементах як С, Ni, Сr, Мn, Sі, Мо сталей, що поставляються за різними технічними умовами (ГОСТ 5632, ТУ 565, 790, 3844, 3845) і іншими нормативними документами.

Розроблена і впроваджена технологія виробництва трубних заготовок з КСС марок 06-08Х18Н10Т-ВД, а також сталей марок 08Х8Н10Т-Ш і 08Х22Н6Т- Ш для виготовлення труб і посудин, що працюють під тиском з підвищеними вимогами до механічних властивостей (в тому числі при високих температурах) і неметалевих включень.

Значна увага науково-технічної спільноти підприємства приділялась проблемним питанням розливки металу та формування зливка сталей функціонального призначення впродовж кристалізації. Запроваджена технологія виготовлення монолітної футеровки ковшів тиксотропними масами зменшила витрати формованих вогнетривів, підвищила тривалість кампанії ковшів з 10 до 60 плавок.

Для розливки підшипникових сталей в зливки 3,6 т розроблена нова конструкція безнадставочних виливниць зі збільшеною придатною частиною зливка без використання керамічних тепловставок. Забезпечені раціональні умови кристалізації сталей підшипникового сортаменту, що дозволило зменшити обрізь з 14,5 до 12,5%.

Використання нових безнадставочних типів виливниць для зливків КСС масою 4,5 та 6,5 т зменшило витрати металу за рахунок зменшення обрізі головної частини зливка з 14,5 до 10,8% і з 16,5 до 12,5% відповідно.

Зазначені технологічні розробки, впроваджені у широкомасштабне виробництво сталей підшипникового та корозійностійкого сортаменту, захищені авторськими свідоцтвами та патентами України.

**РОЗДІЛ 3. Дослідження закономірностей впливу неметалевих включень на технологічні і фізико-механічні властивості сталей спеціального призначення.**

Застосування нових інноваційних технологій електроплавки сталей спеціального призначення дозволило не тільки знизити вміст в них неметалевих включень, але також отримати регламентовані типи включень, які впливають на технологічну пластичність та структуроутворення при деформації злитків та заготовок.

Результати досліджень дозволили науково обґрунтувати впливхіміко-мінералогічного складу неметалевих включеньна утворення дефектів в процесі деформаційної та термічної обробки, а також визначити найбільш небезпечні включення в різних умовах навантаження, що забезпечило підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей сталей спеціального призначення. Встановлена можливість впливу на неметалеві включення шляхом високотемпературного нагріву, який є складовою частиною технологічного процесу отримання виробів зі сталей спеціального призначення. В умовах високих температур відбувається часткове розчинення неметалевих включень, яке сприяє локальному насиченню сталевої матриці, а також формуванню локальних мікрокомпозитних зон шаруватого або дисперсного типу, що призводить до зменшення їх середніх розмірів та об´ємної долі в сталях і дозволяє регулювати їх форму і розподіл в сталевій матриці, а також усунути карбідну неоднорідність підшипникових сталей. Підтверджено негативній вплив сульфідних включень на появу дефектів-флокенів. Досліджені особливості впливу неметалевих включень на структуроутворення в корозійностійких і підшипникових сталях, а також їх структурну, хімічну і фазову неоднорідність при різних температурних і силових умовах гарячої деформації, що дозволило визначити сприятливий характер зеренної та динамічної полігональної субструктури для отримання високого рівня механічних властивостей, який визначається режимом прокатки, а також мінімальнім вмістом і рівномірним розподілом включень. С позицій металофізики показана активна роль включень у розвитку локалізації деформації та формуванні фрагментованої мезоструктури при навантаженні.

Визначені зміни морфології різних типів неметалевих включень, у тому числі гетерофазних, та механізми їх пластичності і руйнування в процесі гарячої прокатки сталей спеціального призначення, а також вплив на утворення дефектів, що призводить до суттєвого зниження технологічної пластичності. Класифіковані найбільш шкідливі типи неметалевих включень, які сприяють зниженню технологічної пластичності сталей спеціального призначення. Обґрунтовані механізми та умови утворення тріщин на міжфазних межах включення-матриця завдяки їх декогезії (корунд Al2O3 , шпінелі МnО·Al2O3, МgО·Al2O3, FeO·Al2O3 ), в самих включеннях (MnO.SiO2, FeO.SiO2,TiN, TiCN, TiO, TiO2, Ti2O3, TiO-TiC, FeO-TiO2), у тому числі на внутрішніх міжфазних межах гетерофазних включень, а також в сталевій матриці поблизу включень в залежності від ступеня їх пластичності, температури, переходу від в'язкого до крихкого руйнування та структури меж включення-матриця. Визначені температури плавлення включень сульфідних, оксисульфідних та силікатних евтектик, які сприяють червоноламкості.

Результати досліджень дозволили науково обґрунтувати нові інноваційні технології електроплавки, а також режими і схеми нагріву, гарячої прокатки і охолодження після деформації і були використані при розробці технологічних інструкцій по проведенню різних стадій виробництва заготовок різного сортаменту із легованих нержавіючих і підшипникових сталей. Це дозволило суттєво підвищити технологічну пластичність, фізико-механічні властивості та якість металопродукції, а також підвищити конкурентну спроможність металопродукції виробництва ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» на вітчизняному та світовому ринках.

**РОЗДІЛ 4. Підвищення фізико-механічних властивостей легованих сталей на основі розробленого інформаційно-математичного прогнозування фізико-хімічних характеристик системи метал-шлак**

У марочному сортаменті корозійностійких сталей вміст і співвідношення ферітоутворюючих (Cr, Mo, Ti, Al, W, V) і аустенітоутворюючих (Ni, C, Mn, N, B) елементів визначає технологічну пластичність на стадії деформаційного переділу, фазовий склад металу в стані поставки, зварюваність вузлів і конструкцій.

Вперше, з метою оптимізації елементного складу корозійностійких сталей і сталей спеціального призначення, методами фізико-хімічного моделювання на основі баз даних шлакових і металевих розплавів в Інституті чорної металургії НАН України створено програму Win Pipe, в якій програмним модулем "Metall" реалізується процедура "згортки" хімічного складу багатокомпонентного розплаву з досягненням визначених механічних властивостей. Встановлені закономірності параметрів міжатомної взаємодії елементів на базі обчислювального експерименту дозволили підвищити ефективність вирішення виробничих завдань за схемою "склад-технологія-структура-властивості".

Значно збільшилися обсяги виплавки конструкційних матеріалів, які мають підвищену корозійну стійкість в особливо агресивних середовищах, достатню конструктивну міцність в широкому інтервалі температур від 4,2 К до 1000 К. Для забезпечення гарної зварюваності і працездатності до більшості цих сталей і сплавів розроблені вимоги, які в загальному вигляді зводяться до наступного: в корозійностійких сталях вміст вуглецю доцільно обмежити до 0,03%; в залізо-нікелевих сталях і сплавах вуглець не повинен перевищувати 0,07%; в залізо-марганцевих – не більше 0,02% при вмісті 0 ... 12% Мn і менш 0,07% при вмісті 25 ... 30% Мn; в більшості сталей вміст сірки і фосфору необхідно обмежити в сумі менше 0,02% виходячи із забезпечення стійкості проти утворення гарячих тріщин, крім того, в феритних сталях для зниження порога холодноламкості необхідно регламентувати вміст кисню, азоту, водню; в феритних сталях, в тому числі в Fе-Мn і Fe-Ni сталях необхідно забезпечувати мінімально можливий розмір зерна (не нижче бали 6 ГОСТ 5639).

В результаті виконаних розробок з урахуванням вимог зварюваності КСС створені нові сталі аустенітного, аустенітно-феритного, феритного і мартенситного класів, а також нікелеві сплави. Слід особливо відзначити, що їх зниження міцності під дією зварювального нагріву практично не відбувається, вони відрізняються простотою термічної обробки, гарною корозійною стійкістю.

До найбільш перспективним слід віднести розроблені склади аустенітних корозійностійких сталей і сплавів ЕП516 і ЕІ35, холодостійких аустенітних сталей і сплавів 03Х20М16АГ6, 03Х13АГ19, 05Х33Г20АН5, ХН60МВЮ, високоміцних мартенситних сталей ЕП810, ЕП767 і ін.

Безперервне розширення сортаменту нових марок сталей, обумовлює все більш складні завдання не тільки в технології виплавки сталей, а й в області зварюваності. При вирішенні цих завдань в даній роботі поряд з традиційними експериментальними методами використовувалися методи математичного моделювання.

Забезпечення заданого комплексу фізико-механічних властивостей, необхідних для конкретних умов експлуатації зварного з'єднання, є основним фактором вивчення зварюваності корозійностійких сталей. При цьому під заданим комплексом фізико-механічних властивостей приймають відповідний структурний стан зони термічного впливу, механічні властивості матеріалу різних зон з'єднання і відсутність несуцільностей типу гарячих і холодних тріщин.

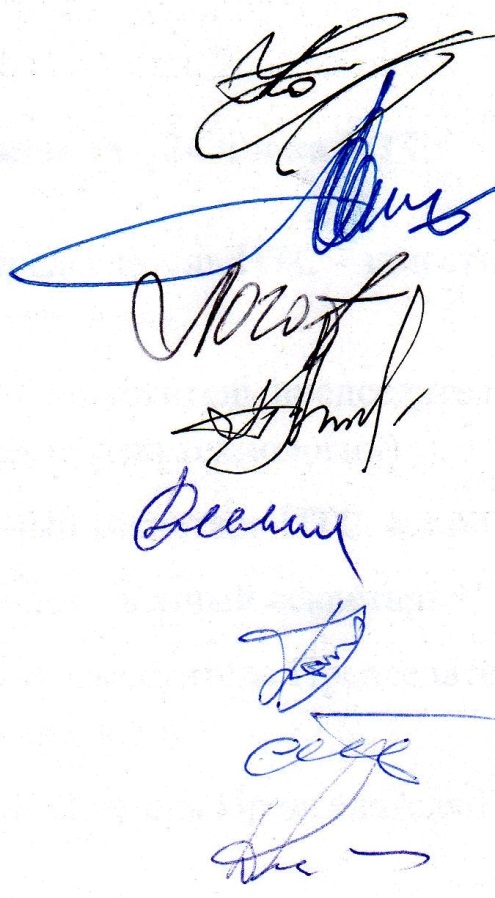
Виконані комплексні дослідження технологічних параметрів виплавки, позапічної обробки і деформаційного переділу стали підставою для встановлення мінімально допустимих звужених меж вмісту дорогих легуючих елементів в складі корозійностійких сталей. Діюча раніше технологія виплавки сталі Х18Н10Т в 2003 р. забезпечувала середній вміст в металі нікелю і хрому 9,745% і 17,51% відповідно. За результатами розробленої та впровадженої технології виробництва зазначеної марки сталі вперше з 2009 по 2016 рр. досягнуто зниження вмісту нікелю і хрому 9,28-9,33 і 17,32-17,38% відповідно. Якість корозійностійких сталей, вироблених ПрАТ «Дніпроспецсталь» атестовано низкою сертифікаційних центрів США і Європи для використання трубної заготовки, металопрокату та поковок для конструкцій відповідального призначення. Основними споживачами трубної заготовки, прокату і поковок є вітчизняні та зарубіжні замовники: ВО «Південний машинобудівний завод», ДП «Антонов», ПрАТ «Турбоатом», Науково-виробничий комплекс «Іскра», «Тіссен Крупп", "Штапперт", "Дамшталь", "Thyssen Shulte", "F.Linster" (Німеччина), "IMS", "S.С.А.М", "Gruрро Inox", "Рrofilinox", "Siderval", (Італія); "С.Т.МеталлЦентр", "Тhe Аalco" (Великобританія); "Магеллан", "ТаСhen", "Еnergy" (США); "АSА" (Канада); "Carpenter" (Мексика).

Сумарний економічний ефект від впровадження інноваційних технологій виробництва підшипникових і корозійностійких сталей за період 2004-2017 рр. складає 254 млн. 235 тис. грн.

По темі висунутою на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2018 р. здобувачами опубліковано 9 монографій і навчальних посібників, 50 наукових публікацій в академічних журналах «Сучасна електрометалургія», «Автоматичне зварювання», в галузевих науково-технічних виданнях «Сталь», «Електрометалургія», «Металургійна і гірничорудна промисловість», нові розробки, матеріали і способи виробництва захищені 9 патентами України.

За результатами досліджень, що виконані у роботі та впроваджені у виробництво, захищена 1 кандидатська дисертація.

Підготовлені до захисту 1 кандидатська, 2 докторські дисертації.



Корнієвський В.М.

Кийко С.Г.

Логозинський І.М.

Шибеко П.А.

Сальніков А.С.

Горобець А.П.

Губенко С.І.

Тогобицька Д.М.