

УДК 669.162.275:546.28:66.048

Є.М. Сігарьов¹, докт. техн. наук, проф., зав. кафедри металургії;
e-mail: siharovyevgen@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

О.М. Смірнов², докт. техн. наук, проф., зав. відділу МГД;
e-mail: stalevoz@i.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>

С.В. Семірягін², канд. техн. наук, доцент, ст. наук. співроб.;
e-mail: td.destal@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

А.А. Похвалітій¹, канд. техн. наук, доцент; e-mail: artemmslp@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-9652-767X>

Д.В. Орлов³, директор; e-mail: orlovdenisl@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0002-4464-3561>

Ю.П. Скоробагатко², канд. техн. наук, ст. досл., ст. наук. співроб.;
e-mail: jskorobagatko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

¹ Дніпровський державний технічний університет (ДДТУ) (Кам'янське, Україна)

² Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

³ ТОВ «ТУРБОГАЗ УЖГОРОД»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВОГО СПЛАВУ ФС15Л ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ СІРЧАНОКИСЛОТНОГО ВИРОБНИЦТВА. Повідомлення 1

У роботі досліджено технологію отримання висококремнистого залізовуглецевого сплаву марки ФС15л, призначеного для виготовлення деталей хімічного обладнання, що працює в умовах дії агресивних кислотних середовищ. Обґрунтовано вибір сплаву із вмістом кремнію 13–15 % як матеріалу для виробництва царг ректифікаційних колон сушіння сірчаної кислоти завдяки його високій корозійній стійкості, здатності до пасивації та тривалому терміну експлуатації. У процесі дослідження здійснено підготовку шихтових матеріалів, виплавку та рафінування вихідного чавуну від сірки методом обробки магнієм в індукційній печі ІСТ-016. На основі рафінованого чавуну одержано залізовуглецевий розплав із вмістом кремнію в межах 13–15 %, відібрано проби для хімічного та структурного аналізу, а також здійснено розливання металу в піщано-глинисті суміші. Для запобігання утворенню пригару використано протипригарні присипки на основі пиловидного кварцу. Було одержано фасонні відливки та пластинчасті зразки для проведення подальших металографічних, механічних і корозійних досліджень. Розглянуто особливості формування структури висококремнистих феросиліцидів, вплив кремнію на корозійну стійкість і технологічні властивості сплаву. Встановлено, що вміст кремнію на рівні 13–15 % забезпечує формування стійкого захисного шару на поверхні металу, який ефективно перешкоджає корозійному руйнуванню в середовищі концентрованої сірчаної кислоти. Показано, що застосування сплавів типу ФС15л дозволяє суттєво підвищити довговічність та надійність хімічного обладнання, знизити витрати на ремонт і технічне обслуговування та збільшити міжремонтний ресурс технологічних установок. Отримані результати підтверджують перспективність використання висококремнистих залізовуглецевих сплавів для виготовлення литих деталей сірчанокислотного виробництва та інших галузей хімічної промисловості.

Вступ

У виробництві сірчаної кислоти одним із найбільш відповідальних елементів технологічного обладнання є ректифікаційні колони сушіння, які працюють в умовах дії концентрованої гарячої сірчаної кислоти. Такі умови характеризуються високою агресивністю середовища, що спричиняє інтенсивні корозійні процеси та швидке руйнування більшості традиційних конструкційних матеріалів. У зв'язку із цим вибір матеріалу для виготовлення царг ректифікаційних колон є важливим фактором забезпечення надійності, довговічності та безпечної експлуатації обладнання.

Використання висококремнистих залізовуглецевих сплавів дозволяє значно підвищити довговічність та експлуатаційну надійність обладнання [1–3]. Основну роль у забезпеченні корозійної стійкості відіграє кремній, який у кількості 13–15 % сприяє формуванню на поверхні металу щільного пасивного шару на основі оксидів кремнію. Така захисна плівка має високу хімічну стійкість і перешкоджає безпосередньому контакту металевої основи з агресивним середовищем. У результаті швидкість електрохімічного руйнування матеріалу суттєво знижується навіть при тривалій експлуатації в концентрованій гарячій сірчаній кислоті.

Оптимальність саме цього діапазону вмісту кремнію пояснюється необхідністю забезпечення балансу між корозійною стійкістю та механічними властивостями сплаву. При вмісті кремнію менше 13 % пасивний шар формується недостатньо ефективно, що призводить до прискорення корозійних процесів і зменшення терміну служби обладнання. Водночас підвищення вмісту кремнію на понад 15 % супроводжується різким зростанням крихкості матеріалу через утворення значної кількості твердих силіцидних фаз. Такі сплави стають більш чутливими до механічних навантажень, ударів і температурних напружень, що ускладнює їх експлуатацію та підвищує ризик утворення тріщин [4–6].

Важливою перевагою висококремнистих сплавів є також їх хороші ливарні характеристики. Незважаючи на високу твердість та крихкість у твердому стані, у рідкому стані вони мають достатню рідкотекучість і добре заповнюють ливарні форми. Це дозволяє виготовляти складні фасонні деталі, зокрема царги ректифікаційних колон, які мають значні габарити, складну геометрію та підвищені вимоги до герметичності й точності форми. Саме тому основним способом виготовлення таких виробів є лиття.

Крім високої корозійної стійкості, залізовуглецеві висококремнисті сплави характеризуються також жаростійкістю, стабільністю структури та здатністю працювати в умовах тривалого термічного навантаження. Це забезпечує значне збільшення міжремонтного ресурсу обладнання та зниження витрат на технічне обслуговування. Використання феросиліцидів у сірчано-кислотному виробництві дозволяє мінімізувати аварійні зупинки технологічних ліній, підвищити безпечність роботи установок і зменшити втрати, пов'язані з корозійним руйнуванням апаратури [2, 7–9].

Мета роботи полягала в одержанні залізовуглецевого розплаву марки ФС15л із вмістом кремнію в межах 13–15 %, придатного для виготовлення корозійностійких литих виробів, призначених для експлуатації в агресивних середовищах сірчано-кислотного виробництва. Для досягнення поставленої мети передбачалося провести виплавку сплаву заданого хімічного складу, забезпечити його металургійну якість, відібрати проби для подальшого визначення хімічного складу та дослідження структури, а також здійснити розливання частини одержаного розплаву в ливарні форми.

Одним із основних завдань роботи було одержання експериментальних фасонних відливок і пластин, які можуть бути використані як для оцінки ливарних властивостей сплаву, так і для проведення комплексу металографічних, механічних та корозійних досліджень. Виготовлення фасонних відливок дозволяло оцінити здатність роз-

плаву заповнювати форми складної конфігурації, схильність сплаву до утворення ливарних дефектів, а також особливості формування структури в реальних умовах кристалізації.

Отримані пластинчасті зразки призначалися для проведення подальших лабораторних випробувань, зокрема визначення фазового складу, дослідження мікроструктури, вимірювання твердості та оцінки корозійної стійкості в середовищах сірчаної кислоти різної концентрації. Крім того, результати дослідження мали підтвердити можливість використання сплаву ФС15л як матеріалу для виготовлення царг ректифікаційних колон та інших елементів обладнання, що працюють в умовах інтенсивного корозійного впливу концентрованої сірчаної кислоти.

Технологія отримання виливків з експериментальних сплавів включала комплекс послідовних технологічних операцій, спрямованих на забезпечення необхідної якості литих виробів, стабільності структури та мінімізації дефектів, характерних для висококремнистих залізовуглецевих сплавів. Особливу увагу приділяли підготовці формувальних матеріалів, режимам формування та дотриманню технологічних параметрів лиття, оскільки сплави типу Fe15Si характеризуються підвищеною крихкістю, високою температурою заливання та чутливістю до порушення умов кристалізації.

Під час підготовчого етапу забезпечували виготовлення піщано-глинистої формувальної суміші, підготовку модельного оснащення, виготовлення моделей відливок та проведення формування. Основною технологією отримання експериментальних відливок було лиття в піщано-глинисті суміші (ПГС), що є одним із найбільш поширених і технологічно доступних способів виготовлення фасонних виливків із висококремнистих чавунів та феросиліцидів.

Формування виконували «в сиру», тобто без попереднього сушіння форм, що дозволяло скоротити тривалість технологічного циклу та зменшити енергетичні витрати на підготовку виробництва. При цьому основні технологічні параметри формування та вимоги до якості форм приймали аналогічно до вимог, що застосовуються для лиття промислових висококремнистих сплавів типу ФС15л. Такий підхід дозволив порівняти результати досліджень із промисловими умовами одержання виливків.

Для виготовлення форм використовували кварцовий пісок із відповідною зернистістю та глинисті зв'язувальні компоненти, які забезпечували необхідну міцність форми, газопроникність і стійкість до термічного впливу розплаву. Склад формувальної суміші підбирали з урахуванням високої температури заливання експериментальних сплавів та необхідності запобігання утворенню пригару, газових дефектів і тріщин у виливках (табл. 1, 2). Особливу увагу приділяли вологості суміші, оскільки її надлишок міг спричинити інтенсивне газоутворення при контакті з розплавом, а недостатня кількість вологи — погіршення формувальних властивостей.

Таблиця 1

Вимоги до суміші ливарної форми

Зерновий склад	Вміст глинистої складової, %	Газопроникність	Міцність на стиснення у сиromу стані, кгс/см².	Вологість, %
016А	8–10	40–60	0,3–0,5	4,0–5,5
02Б	8–10	50–70	0,3–0,5	4,0–5,5

Вихідні технологічні дані для розробки формувальної суміші були такі: маса виливки — до 200 кг, товщина стінки — до 25 мм. Такі параметри визначали підвищені вимоги до рідкотекучості сплаву, рівномірності заповнення форми та стабільності процесу кристалізації. Для забезпечення якісного формування тонкостінних

Таблиця 2

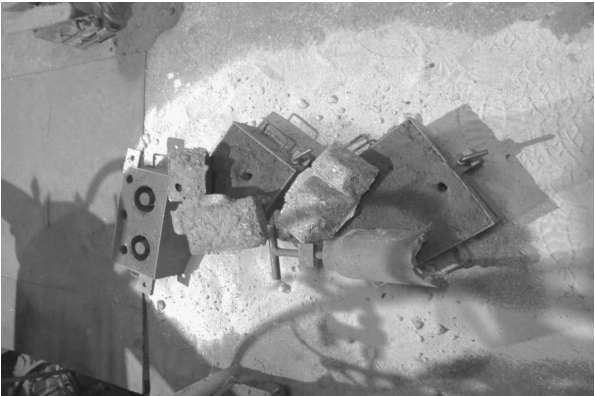
Вимоги до стрижневої суміші

Клас	Тип стрижня	Склад суміші (масова доля, %)				вологість	газопроникність	Вміст в'язучих (більше 100)
		кварц. пісок	глина	оборот. суміш	тирса			
V	Середньої величини нескладної форми	40–70	8–4	48–43	4–3	5,5-6,5	більш 70	ССБ 1,5–2,0 %

елементів конструкції застосовували модельне оснащення з урахуванням ливарних уклонів, припусків на усадку та механічну обробку.

Моделі виливків виготовляли з матеріалів, що забезпечують достатню точність геометричних розмірів і стійкість до багаторазового використання. Конструкція моделей враховувала особливості усадки висококремнистих сплавів та необхідність забезпечення рівномірного охолодження металу у формі (рис. 1). Для зменшення ризику утворення усадкових раковин і внутрішніх дефектів у конструкції ливниково-живильної системи передбачали прибутки та елементи спрямованого тверднення.

Процес формування здійснювали із забезпеченням необхідного ущільнення суміші, що дозволяло підвищити точність відтворення поверхні моделі та забезпечити стабільність геометричних параметрів форми під час заливання. Після виготовлення форми проводили контроль її стану, перевіряли цілісність робочих поверхонь, правильність встановлення стрижнів та елементів ливникової системи.



Застосування технології лиття в піщано-глинисті форми дозволило одержати експериментальні виливки зі стабільною структурою та мінімальною кількістю поверхневих і внутрішніх дефектів. Крім того, така технологія є економічно доцільною та максимально наближеною до умов промислового виробництва деталей із висококремнистих феросиліцидів, що забезпечує практичну цінність отриманих результатів дослідження.

Для попередження пригару під час виготовлення виливків було використано протипригарні присипки на основі пиловидного кварцу. Необхідність застосування таких матеріалів зумовлена високою температурою заливання висококремнистих залізовуглецевих сплавів та їх значною хімічною активністю стосовно формувальної суміші. У процесі контакту рідкого металу з поверхнею піщано-глинистої форми можливе локальне спікання зерен формувального піску з металом, що призводить до утворення пригару, погіршення якості поверхні вилівка та ускладнення очищення готових деталей. Протипригарні присипки з пиловидного кварцу наносили на робочу поверхню форми та стрижнів тонким рівномірним шаром перед заливанням металу. Завдяки високій вогнетривкості кварцу та його хімічній інертності створювався додатковий бар'єр між рідким розплавом і формувальною сумішшю. Це дозволяло значно знизити ймовірність проникнення металу в міжзерновий простір форми та мінімізувати утворення поверхневих дефектів.

Підготовка шихтових матеріалів для отримання сплавів заданого хімічного складу складалася із кількох етапів:

Перший включав проведення плавки, що здійснювалася в індукційній тигельній печі ІСТ-016 (рис. 2), з метою одержання зливків переробного чавуну, рафінованого за вмістом сірки, який у подальшому використовували як один із основних компонентів металошихти для виплавки експериментальних висококремнистих сплавів. Необхідність проведення попереднього рафінування вихідного чавуну зумовлена негативним впливом сірки на структуру, механічні властивості та корозійну стійкість сплавів на основі системи Fe–Si. Підвищений вміст сірки сприяє утворенню неметалевих включень, погіршує процес графітизації, підвищує крихкість матеріалу та може негативно впливати на формування захисного пасивного шару в агресивних середовищах.

Як вихідний матеріал використовували чавунні злитки виробництва ПрАТ «Камет-Сталь» (м. Кам'янське), що характеризувалися підвищеним вмістом сірки. Перед початком плавки проводили підготовку металошихти, очищення поверхні злитків від забруднень та контроль маси компонентів. Завантаження шихтових матеріалів у тигель індукційної печі ІСТ-016 здійснювали порціями з урахуванням рівномірності плавлення та стабільності температурного режиму (рис. 3).

Після аналізу хімічного складу отриманих виливків із чавуну вносили коригувальні правки в модель для розрахунку матеріального балансу виплавки експериментальних сплавів.

На другому етапі було проведено плавку з використанням металошихти зі сталевих заготовок в індукційній печі ІСТ-016 з метою отримання виливків із заданим хімічним складом та структурою. Після доведення металевого розплаву до заданої температури розлив здійснили скачування шлаку та розливання металу в чавунні виливниці для подальшого використання у складі металошихти експериментальних плавок (рис. 4).

Третій етап досліджень включав проведення дослідно-коригуючої плавки в індукційній тигельній печі ІСТ-016 з метою уточнення



Рис. 2. Фотографія індукційної печі ІСТ-016



Рис. 3. Одержані злитки рафінованого за вмістом сірки переробного чавуну для включення до складу металошихти експериментальних плавок

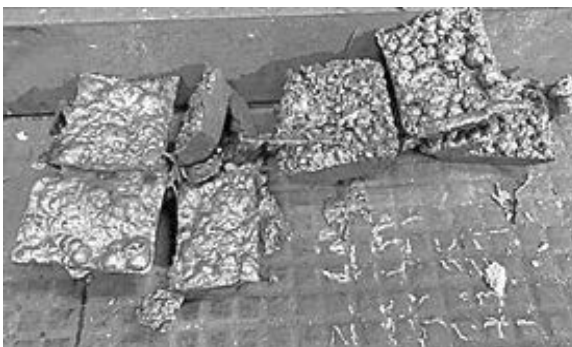


Рис. 4. Сталеві злитки із заданим хімічним складом для включення до складу металошихти експериментальних плавок

технологічних параметрів виплавки висококремнистого залізовуглецевого сплаву та отримання практичних даних щодо поведінки металеві ванни в процесі плавлення. Основним завданням даного етапу досліджень було визначення особливостей формування хімічного складу сплаву, оцінка ефективності засвоєння легувальних і коригувальних добавок, а також відпрацювання оптимальних режимів плавки для подальшого одержання експериментальних сплавів (рис. 5).



Рис. 5. Одержані злитки прототипу сплаву ФС15л для подальшого використання як коригувальних присадок у подальших плавках

Як шихтові матеріали використовували злитки рафінованого по сірці чавуну, отримані на попередніх етапах досліджень, сталевий брутх та кремнієвмісний модифікатор FeSi45. Використання рафінованого чавуну дозволяло мінімізувати негативний вплив сірки на структуру та властивості майбутнього сплаву, а введення сталеві складової забезпечувало коригування вмісту вуглецю та заліза. Феросиліцій FeSi45 застосовували як основне джерело кремнію для досягнення необхідної концентрації цього елемента у сплаві та формування хімічного складу, наближеного до марки ФС15л.

Паралельно здійснювали підготовку легуючих добавок нікелю та молібдену. Для легування використовували високочистий нікель чистотою 99,99 % Ni та молібден чистотою 98,898 % Mo. Використання матеріалів високої чистоти дозволяло виключити вплив сторонніх домішок на результати досліджень та забезпечити високу точність формування хімічного складу експериментальних сплавів.

Перед введенням у металеву ванну нікель та молібден також піддавали подрібненню до оптимального фракційного складу. Основним завданням цієї операції було збільшення питомої поверхні контакту матеріалу з розплавом, що сприяло прискоренню процесів розчинення та покращувало засвоєння легувальних елементів. Особливо важливим це було для молібдену, який характеризується високою температурою плавлення та порівняно повільно розчиняється в залізовуглецевих розплавах. Зменшення розміру частинок дозволяло скоротити час їхнього засвоєння та забезпечити більш рівномірний розподіл молібдену в металі. Після подрібнення легуючі добавки піддавали фракціонуванню з метою вилучення надто великих або надто дрібних частинок. Відібраний гранулометричний склад забезпечував ефективне введення матеріалів у розплав без значних втрат легувальних елементів. Крім того, однорідність розміру частинок дозволяла підвищити точність дозування добавок та забезпечити відтворюваність результатів під час проведення серії експериментальних плавок.

Завантаження шихтових матеріалів у тигель здійснювали відповідно до розрахованого шихтового балансу. Особливу увагу приділяли послідовності введення компонентів, оскільки високий вміст кремнію суттєво впливає на тепловий режим плавки, процеси окиснення та шлакоутворення. У процесі плавлення вели безперервне спостереження за станом металеві ванни, характером перемішування розплаву та зміною температурного режиму.

Під час дослідно-коригуючої плавки були отримані важливі відомості щодо особливостей розплавлення моношихти та поведінки компонентів у рідкому металі. Встановлено, що розчинення феросиліцію супроводжується локальним охолодженням металеві ванни та потребує додаткового часу для повного засвоєння кремнію. Крім того, спостерігалися характерні зміни в'язкості розплаву при збільшенні концентрації кремнію, що впливало на умови перемішування та подальшого розливання металу.

Окрему увагу приділяли процесам шлакоутворення. У результаті взаємодії кремнію з киснем утворювалися значна кількість кремнеземистих сполук, які накопичувалися на поверхні металеві ванни у вигляді шлакового покриву. Аналіз

характеру шлакоутворення дозволив визначити оптимальні умови видалення шлаку та мінімізувати втрати кремнію в процесі плавки. Установлено, що своєчасне скачування шлаку сприяє підвищенню стабільності хімічного складу та покращує умови засвоєння коригувальних добавок.

У процесі виплавки здійснювали контроль температури розплаву та відбирали технологічні проби для оперативного аналізу хімічного складу. Отримані результати використовували для коригування вмісту кремнію та інших компонентів шляхом додаткового введення феросиліцію або сталеві складової. Такий підхід дозволив досягти необхідних концентрацій основних елементів та забезпечити відповідність складу сплаву.

Після завершення плавки та отримання необхідного хімічного складу (табл. 3) виконували витримку розплаву для стабілізації температури та завершення металургійних процесів. Далі проводили скачування шлаку з поверхні металу, що забезпечувало зниження кількості неметалевих включень та покращення якості злитків.

Таблиця 3

Хімічний склад виплавленого висококремнистого чавуну

Марка сплаву	Si	Mn	S	P	Cr	Al	Mo	Ni
ФС15л (ГОСТ 7769-82)	14,5–16,5	≤0,5	≤0,04	≤0,05	—	≤0,2	—	—
ФС15л	14,329	1,633	0,0031	0,103	3,866	0,159	0,045	0,181

Таким чином, комплекс виконаних технологічних операцій забезпечував отримання високоякісного металевого розплаву із заданим хімічним складом, контроль його параметрів перед розливанням та створював необхідні умови для проведення подальших досліджень структури й властивостей висококремнистих залізовуглецевих сплавів.

Розливання очищеного металевого розплаву здійснювали в підготовлені ливарні форми. Обсяг металу, що підлягав розливанню, визначали залежно від програми експерименту та необхідної кількості фасонних відливок (рис. 6) і зразків для досліджень. Заливання форм проводили безперервним потоком із забезпеченням стабільної швидкості подачі металу, що дозволяло мінімізувати утворення газових дефектів та інших ливарних вад.

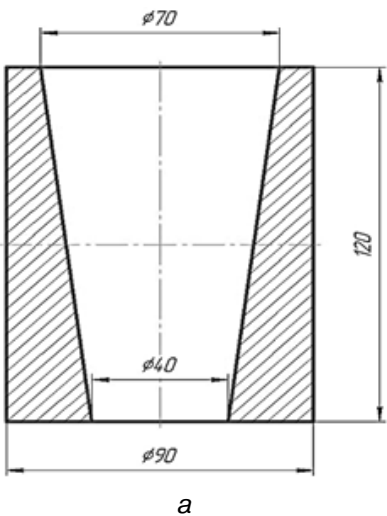


Рис. 6. Ескіз (а) та фасонні виливки (б) з експериментального сплаву ФС15л*

Для визначення ливарних властивостей отриманого експериментального сплаву застосовували стандартизовану ливарну пробу постійного перетину з центральним підведенням металу. Проба являла собою спіраль трапецеїдального перетину (рис. 6). Довжину залитої спіралі для експериментального сплаву визначали за мітками, нанесеними через кожні 50 мм. Відомості стосовно рідкотекучості (рис. 7), лінійної усадки сплавів, об'єму усадочної порожнини, усадочної рихлості (рис. 8) отримували за стандартними методиками та аналізом їх результатів. Показники рідкоплинності одержаного сплаву визначали за допомогою отриманих на спіральній пробі постійного перетину виливків.



Рис. 7. Спіральні проба для визначення рідкоплинності сплаву ФС15л

Твердість експериментального сплаву визначали за методом Бріннеля на класичному вимірювальному приладі ТШ-2М відповідно до ГОСТ 23677-79.

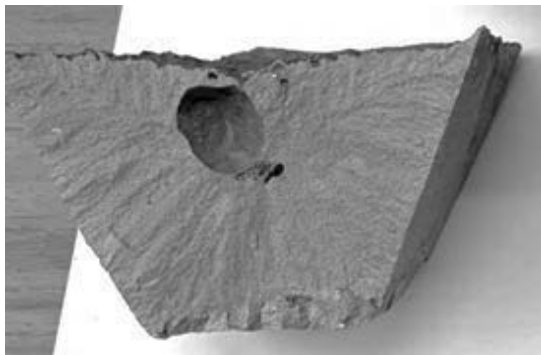


Рис. 8. Макроструктура й усадкова порожнина виливка, отриманого литтям у чавунну виливницю

Результати ливарних властивостей сплаву ФС15л приведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Ливарні та механічні властивості експериментального сплаву ФС15л

Марка сплаву	Рідкоплинність, мм	Усадкова порожнина, %	Твердість за Бріннелем, НВ	Густина сплаву, кг/м ³
ФС15л	1250	0,421	447	6582,7



Рис. 9. Мікроструктура сплаву ФС15л (X200)

Для металографічного аналізу використовувався металографічний мікроскоп ІЕ-200 із цифровою камерою. Мікроструктура сплаву ФС15л має у своєму складі структурно вільний кремній, який частково формує пластини (рис. 9) та нагадує мікроструктуру сірого чавуну.

Висновки

1. Проведено дослідження технології отримання висококремнистого залізоуглецевого сплаву марки ФС15л, призначеного для виготовлення деталей хімічного обладнання, що експлуатується в умовах впливу агресивних кислотних середовищ.

установлено, що використання сплавів із вмістом кремнію 13–15 % є ефективним рішенням для підвищення корозійної стійкості обладнання сірчаноокислотного виробництва.

2. Відпрацьовано технологічну схему підготовки шихтових матеріалів, яка включала десульфуріацію вихідного чавуну шляхом обробки диспергованим магнієм в індукційній печі ІСТ-016, підготовку феросиліцію FeSi45 та легувальних добавок до оптимального фракційного складу, а також коригування хімічного складу розплаву до заданих значень.

3. Встановлено, що використання графітової кришки під час плавлення сприяє зменшенню теплових втрат і мінімізації вигорання кремнію, а застосування протипригарних присипок на основі пиловидного кварцу дозволяє покращити якість поверхні виливків та знизити ймовірність утворення пригару.

4. Одержано залізовуглецевий розплав із вмістом кремнію в межах 13–15 %, здійснено його розливання в піщано-глинисті форми та чавунні виливниці. У результаті виготовлено фасонні відливки, придатні для проведення подальших металографічних, механічних і корозійних досліджень.

5. Досліджено особливості поведінки металевої ванни, процеси шлакоутворення та засвоєння коригуючих добавок під час виплавки високкремнистих сплавів. Отримані результати дозволили уточнити технологічні режими плавлення та забезпечити стабільність хімічного складу експериментального сплаву.

6. Показано, що застосування сплавів типу ФС15л дозволяє збільшити довговічність і надійність обладнання сірчаноокислотного виробництва, зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування, а також підвищити економічну ефективність експлуатації технологічних установок.

7. Отримані результати підтверджують перспективність використання висоокремнистих залізовуглецевих сплавів для виробництва царг ректифікаційних колон сушіння сірчаної кислоти та інших елементів хімічного обладнання, що працює в умовах інтенсивного корозійного впливу агресивних середовищ.

Список літеатури

- 1 Найдек В.Л. (2015) Спеціальні чавуни та сплави для хімічного машинобудування / Найдек В.Л., Шинський О. Й. Київ: Інститут проблем лиття НАН України. 312 с.
- 2 Tretyakov Yu.D. (1988) High-silicon cast irons and their application in chemical engineering / Tretyakov Yu.D., Mikhailov G. G. Moskva: Metallurgy. 240 p. [in Russian].
- 3 Zhuk N. P. (1976) Course in the Theory of Corrosion and Protection of Metals. Moskva: Metallurgy. 472 p. [in Russian].
- 4 Schweitzer P. A. (2010) Corrosion Resistance Tables. 5th ed. Boca Raton: CRC Press. 1344 p. ISBN:13:978-1420067705
- 5 Davis J.R. (1996) Corrosion of Cast Irons. Materials Park, OH: ASM International. 494 p. ISBN:978-0-87170-564-8
- 6 ASM Handbook (2003). Volume 13A: Corrosion – Fundamentals, Testing, and Protection. – ASM International. 1168 p. ISBN:978-0871707055
- 7 Левицький В. Є. (2016) Корозійностійкі матеріали для обладнання хімічної промисловості / Левицький В.Є., Петруша І.А. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 284 с.
- 8 Shreir L.L. (2010) Corrosion / Shreir L.L., Jarman R.A., Burstein G.T. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 3792 p. ISBN:9780444527882
- 9 Revie R. W. (2011) Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 1296 p. ISBN:978-0-470-8285-7

References

- 1 Naydek V. L. (2015) Special cast irons and alloys for chemical engineering / Naydek V. L., Shynskiy O. Y. Kyiv: Institute of Casting Problems of the NAS of Ukraine. 312 p. [in Ukrainian].
- 2 Tretyakov Yu. D. (1988) High-silicon cast irons and their application in chemical engineering / Tretyakov Yu. D., Mikhailov G. G. Moskva: Metallurgy. 240 p. [in Russian].
- 3 Zhuk N. P. (1976) Course in the Theory of Corrosion and Protection of Metals. – Moskva: Metallurgy. 472 p. [in Russian].
- 4 Schweitzer P. A. (2010) Corrosion Resistance Tables. – 5th ed. – Boca Raton: CRC Press. 1344 p. ISBN-13:978-1420067705
- 5 Davis J. R. (1996) Corrosion of Cast Irons. – Materials Park, OH: ASM International. 494 p. ISBN:978-0-87170-564-8
- 6 ASM Handbook (2003). Volume 13A: Corrosion – Fundamentals, Testing, and Protection. – ASM International. 1168 p. ISBN:978-0871707055
- 7 Levytskyi V. E. (2016) Corrosion-resistant materials for chemical industry equipment / Levytskyi V. E., Petrusa I. A. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. 284 p. [in Ukrainian].
- 8 Shreir L. L. (2010) Corrosion / Shreir L. L., Jarman R. A., Burstein G. T. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 3792 p. ISBN:9780444527882
- 9 Revie R. W. (2011) Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 1296 p. ISBN:978-0-470-8285-7

Одержано / Received 12.06.2026

Прийнято / Accepted 03.08.2026

Опубліковано / Published 07.09.2026

E.M. Siharov¹, Dr. Sci (Engin), Prof., Head of the Department;

e-mail:siharovyevgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

O.M. Smirnov², Dr. Sci (Engin), Prof., Head of the Department; e-mail: stalevoz@i.ua;

<https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>

S.V. Semiriagin², PhD(Engin.), Associate Potesser; e-mail: td.destal@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

A.A. Pokhvalitiy¹, Ph.D. (Eng.), Associate Professor,

e-mail: artemmslp@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9652-767X>,

D.V. Orlov³, director; e-mail: orlovdenisl@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0002-4464-3561>

Yu.P. Skorobagatko², PhD(Engin.), Senior Research Scientist;

e-mail: jskorobagatko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

¹ Dnipro State Technical University (DDTU) (Kamianske, Ukraine)

² Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NASciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

³ LLC "TURBOGAZ UZHGOROD"

RESEARCH INTO THE PROCESS OF OBTAINING HIGH-SILICINE FERRO-CARBON ALLOY ФС15л FOR THE MANUFACTURE OF CORROSION-RESISTANT PARTS OF SULFURIC ACID PRODUCTION EQUIPMENT. Message 1

The work investigates the technology of obtaining high-silicon iron-carbon alloy of the ФС15л brand, intended for the manufacture of parts of chemical equipment operating in aggressive acidic environments. The choice of an alloy with a silicon content of 13–15% as a material for the

production of tanks of rectification columns for drying sulfuric acid is justified due to its high corrosion resistance, ability to passivation and long service life. In the process of research, the preparation of charge materials, smelting and refining of the starting pig iron from sulfur by the method of magnesium treatment in an IST-016 induction furnace were carried out. Based on the refined pig iron, an iron-carbon melt with a silicon content within 13–15% was obtained, samples were taken for chemical and structural analysis, and the metal was poured into sand-clay molds. To prevent the formation of burn-in, non-stick powders based on powdered quartz were used. Shaped castings and plate samples were obtained for further metallographic, mechanical and corrosion studies. The features of the formation of the structure of high-silicon ferrosilicides, the influence of silicon on the corrosion resistance and technological properties of the alloy were considered. It was established that the silicon content at the level of 13–15% ensures the formation of a stable protective layer on the metal surface, which effectively prevents corrosion destruction in a concentrated sulfuric acid environment. It is shown that the use of alloys of the ФС15л type allows to significantly increase the durability and reliability of chemical equipment, reduce the costs of repair and maintenance and increase the service life of technological installations. The results obtained confirm the prospects of using high-silicon iron-carbon alloys for the manufacture of cast parts for sulfuric acid production and other branches of the chemical industry.

Keywords: *high-silicon cast iron, FS15l, ferrosilicide, silicon, sand-clay mixture, core mixture, casting mold, fluidity, shrinkage cavity*