Сучасний досвід десульфурзації сталі

О. С. Воденнікова, кандидат технічних наук, доцент, oksana_vodennikova@ukr.net,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4404-3454>

П. В. Головков, студент, golovkov.pasha@gmail.com

Запорізький національний університет, Запоріжжя

*Запорізький державний медичний університет, Запоріжжя

Сучасні технологічні схеми виробництва сталі не дозволяють домогтися безпосередньо на випуску низького ($< 0,01\%$ S) та наднизького ($< 0,005\%$ S) вмісту сірки в металі. З метою видалення сірки часто застосовують позапічну обробку сталі. Процес десульфурзації сталі залежить від хімічного складу шлаку, часу його формування в ковші, окислення металу, умов перемішування сталі в ковші, додаткових технологічних операцій та ковшової обробки металу. Для десульфурзації сталі широко застосовується методи обробки розплаву твердими шлакоутворюючими сумішами, синтетичним шлаком, вапняно-глиноземистим шлаком, силікокальцієм та іншими порошкоподібними матеріалами. У роботі проаналізовано сучасні підходи до процесу десульфурзації сталі в умовах сталеплавильного виробництва. Розглянуто український (на прикладі ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»») та ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського») та закордонний (на прикладі ПАТ «Северсталь» та ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат») досвід десульфурзації при киснево-конвертерному виробництві. Використання технологічних комплексів «Установка десульфурзації чавуну – сталеплавильний агрегат» та «Установка десульфурзації чавуну – сталеплавильний агрегат – установка «під-ківши» забезпечує більш глибоку десульфуріацію сталі, можливість оптимізації витрат на виробництво сталі, розширює сортамент дефіцитних видів продукції та дозволяє усунути ряд обмежувальних умов, що ускладнюють поточне виробництво. Приведено аналіз процесу десульфурзації сталі C80D в умовах ВАТ «Молдавський металургійний завод», при якому часткове видалення сірки відбувається в дуговій сталеплавильній печі, а наднизький вміст досягається за рахунок створення високоосновного рафінуючого шлаку в процесі позапічної обробки сталі. Проаналізовано дослідження кінетики процесу десульфурзації сталі 20ГЛ в умовах АТ «Ташкентський механічний завод» при використанні твердих шлакоутворюючих сумішей та модифікуванні сталі рідкісноземельними металами. Розглянуто питання десульфурзації електросталі в умовах ВАТ «Білоруський металургійний завод» з інжектуванням порошкоподібних матеріалів через установку «Velko» при позапічній обробці сталі.

Ключові слова: десульфуріація сталі, реагент-десульфуратор, ступінь десульфуріації, установка десульфуріації чавуну, позапічна обробка сталі, установка «під-ківши».

Переважаючий у сталеплавильному виробництві киснево-конверторний процес розвивається в напрямку матеріало- та ресурсозбереження з використанням сучасних технологій позаагрегатної обробки чавуну та сталі [1]. Так одним з варіантів зниження енергоємності передільного чавуну, як

основного шихтового матеріалу конвертерної плавки, є технологія виплавки його з нерегламентованим вмістом сірки [2, 3]. Сірка є однією з шкідливих домішок, що знижує міцність та зварюваність сталі, а також погіршує її електротехнічні та антикорозійні властивості. Термодинамічні властивості сірки в значній мірі визначають її поведінку в ході металургійних процесів, тому їх знання дозволяє прогнозувати й контролювати ці процеси. Фізико-хімічні властивості та термодинамічні характеристики розплавів системи Fe-S можуть вплинути на умови видалення сірки з металу, тому їх дослідження є актуальним питанням для виробництва високоякісних марок сталей [4].

Підвищення якості сталі та забезпечення технологічних можливостей для отримання високоякісних марок сталі з низьким вмістом сірки можливо при проведенні процесу десульфурації [5]. Видалення сірки – досить складне металургійне завдання, вирішення якого пов'язане з чималими витратами енергоносіїв та реагентів, що може призвести до подорожчання металопродукції. Все це вимагає розробку та впровадження нових ресурсозберігаючих технологій, зокрема, десульфурації металу [6].

Успішна десульфурація сталі залежить від хімічного складу шлаку, часу його формування в ковші, окислення металу, умов перемішування сталі в ковші, додаткових технологічних операцій [7].

На показники цього процесу в кисневих конвертерах великий вплив мають шлаковий, дутьєвий та температурний режими плавки [8]. В конвертері можна видалити не більше 40 % сірки, що потрапляє в метал з шихтових матеріалів. Визначальним фактором у процесі десульфурації є ефективна основність шлаку, при чому із збільшенням основності збільшується і ступінь десульфурації [9].

Завдання роботи – проаналізувати сучасний досвід десульфурації з використанням технологічних комплексів «УДЧ – сталеплавильний агрегат» та «УДЧ – сталеплавильний агрегат –УПК».

В сучасних умовах виробництва для десульфурації сталі широко застосовується метод обробки розплаву твердими шлакоутворюючими сумішами (ТШС), який дозволяє підвищити якість металу та відмовитися від дорогої обробки синтетичним шлаком (СШ) [10]. Так при необхідності зниження масової частки сірки до 60 % від початкового виконують комплексну десульфурацію розплаву ТШС на основі вапна та плавикового шпату. При позапічній десульфурації сталі твердими шлакоутворюючими сумішами вапна та плавкого шпату або флюориту в масовому співвідношенні від 3:1 до 4:1 досягається ступінь десульфурації від 30 до 50 % при відносно невеликій витраті реагенту 0,7–1,7 % від маси металу. З метою зниження теплових втрат при десульфурації сталі ТШС можна використовувати комплексну технологію обробки конвертерної сталі ТШС і рідким розкисленим конвертерним шлаком. Максимальний досягнута ступінь десульфурації вуглецевої сталі при її комплексному рафінуванні складає 64 % [11].

Найбільш технологічно та економічно обґрунтованим способом рафінування сталі також є застосування рідких вапняно-глиноземистих

Плавлення і кристалізація

шлаків $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$ [12]. При позапічній обробці сталі з метою видалення сірки часто застосовують і силікокальцій, однак при обробці сталей з низьким вмістом кремнію його використання не доцільно [10].

Одним із шляхів інтенсифікації десульфурації сталі на установці «під-ківш» (УПК) є збільшення кратності шлаку. Однак при збільшенні кількості рафінувального шлаку зростають витрати матеріалів на його формування, а також витрати електроенергії на нагрів та розплавлення шлакоутворюючих матеріалів. Підібравши оптимальний хімічний склад рафінувального шлаку та глибоко розкисливши метал, можна значною мірою підвищити коефіцієнт розподілу сірки між металом і шлаком, тобто провести більш глибоку десульфурацію. Так в умовах ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь» стабільну десульфурацію металу забезпечують в УПК за допомогою високоосновного розкисленого шлаку (табл. 1) [13].

Таблиця 1

Хімічний склад ковшових шлаків в умовах ПрАТ «МК «Азовсталь»» [13]

Момент відбору проби	Вміст у шлаку, %					Основ-ність
	CaO	SiO ₂	FeO+MnO	Al ₂ O ₃	MgO	
До обробки на УПК	47	14	3,6	23	5	3,9
Після обробки на УПК	47	12	0,7	27	6	4,4

Авторами роботи [7] проведено промислові дослідження кінетики процесу десульфурації в киснево-конвертерному цеху ПрАТ «МК «Азовсталь»» при виплавці сталі 17Г1СУ в 350-тонних конвертерах за різними варіантами обробки металу в сталерозливних ковшах. Всього було проведено 1456 плавок: 460 – при обробці СШ, 271 – при обробці твердою ТШС, 630 – при використанні спільно СШ та ТШС, а також 94 – без обробки СШ та ТШС. При обробці сталі в ковші використовували синтетичний шлак складу: 47-52 % CaO; 32-39 % Al₂O₃, 3-7 % SiO₂, 10-14 % MgO, до 1,5 % MnO+FeO, 4-6 % TiO₂, до 0,035 % S та тверду шлакоутворюючу суміш (фракції до 5 мм), що складається з 76-78 % вапна (до 0,05 % S) та 22-24 % плавикового шпату (до 0,1 % S). Порівняльний аналіз ефективності десульфурації різних варіантів в зіставленні з варіантом, коли метал нічим не оброблявся, показав, що кількість вилученої з металу сірки при обробці його твердою шлакоутворюючою сумішшю, синтетичним шлаком, спільно шлаком і сумішшю зростає в 1,36; 2,1 і 2,46 рази відповідно. Методом кореляційного аналізу виявлено, що питома кількість вилученої сірки при роздільному застосуванні ТШС в 14 разів вище, ніж при застосуванні СШ.

Значний інтерес представляють дослідження десульфурації металу в комплексі «Установка десульфурації чавуну (УДЧ) – конвертер» [14]. Аналіз виконано з використанням даних 145 плавок поточного виробництва, проведеним в цехах з конвертерами ємністю 130 та 140 т, що працюють за технологією з комбінованою продувкою киснем зверху і подачею

Плавлення і кристалізація

нейтрального газу через донні дутьєві пристрої. Основні технологічні показники плавки наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Технологічні показники комплексу «УДЧ – конвертер» [14]

	Технологічний показник	Значення	
		min	max
1	Маса рідкого чавуну, кг	71550	83350
2	Маса металевго брехту, кг	20200	28940
3	Маса твердого чавуну, кг	10000	17000
4	Маса окотишів, кг	211	1900
5	Витрата руди, кг	–	3068
6	Витрата вапна, кг	3604	15865
7	Витрата O_2 , m^3 /плавку	4552	5655
8	Температура чавуну, $^{\circ}C$	1250	1370
9	Температура металу на одній повалці, $^{\circ}C$	1570	1746
10	Температура металу на випуску, $^{\circ}C$	1582	1680
11	Маса рідкої сталі, кг	87099	94901

Показано, що за умов роботи з використанням знесірченого чавуну в металі на випуску з конвертера вміст сірки може виявитися вищим, ніж в вихідному чавуні, що пов'язано з надходженням сірки в конвертерну ванну з іншими шихтовими матеріалами. Тому в умовах комплексу «УДЧ – конвертер» при виробництві низькосірчистих сталей головним завданням є збереження досягнутого на УДЧ вмісту сірки шляхом видалення шлаку після позапічної обробки, спеціального відбору та скорочення кількості металевго брехту.

Практична оцінка можливостей десульфурзації металу в комплексі «УДЧ – конвертер – «під-ківш»» для забезпечення до 0,01 % сірки в сталі представлена в роботі [15] на основі аналізу 41-ї плавки кисневого конвертера ємністю 100 т з комбінованою продувкою. Показано, що виплавка сталі з вмістом сірки $\leq 0,01$ % може бути здійснена з використанням глибоко знесірченого чавуну ($< 0,005$ % сірки) без ковшового шлаку і низькосірчистого металевго брехту, або знесірченого до рівня 0,01 % сірки чавуну та подальшої обробки сталі на УПК.

Для умов киснево-конвертерного цеху металургійного комбінату «Азовсталь» розроблена технологія отримання сталі з масовою часткою сірки 0,003-0,005 %, із застосуванням порошкових дротів з різними наповнювачами [16]. Дана технологія включає наступні операції:

- десульфурация чавуну в заливальних ковшах магнійвмісними порошковими проволочками;
- витримка чавуну в ковші не менше 15 хв і повне скачування шлаку;
- повне відсічення конвертерного шлаку;

- наведення в ковші шлаку з ТШС на основі CaO , CaF_2 та Al_2O_3 ;
- обробка металу на установці доведення сталі в ковші силікокальцієвим порошковим дротом з витратою 1,3-1,5 кг/т силікокальцію (зокрема, марок СК-25, СК-30) і продування сталі аргоном не менше 15 хв;
- остаточне модифікування сталі в проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) порошковим дротом по ходу розливки з витратою 0,2-0,5 кг/т силікокальцію.

Для умов ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського» розроблено методику вибору оптимального складу шлаку-десульфуратора для обробки напівпродукту трубних марок сталі (09Г2С, 20ТР, 45ТР та ОС, LF2) на УКП [17]. Визначено граничні умови параметрів шлаку, а також співвідношення $\text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ та $\text{FeO} + \text{MnO}$, що визначають його сіркопоглинальну здатність і забезпечують виплавку якісного за вмістом сірки металу.

Оцінка процесу десульфурації металу на 60-ти та 100-ти тонних УПК в умовах ВАТ «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» та ТОВ «Електросталь» приведена у роботі [18]. Розроблена технологія десульфурації металу на УПК з спільним використанням ТШС (56,5-59,73 % CaO , 4,93-25,81 % SiO_2 , 8,1-9,38 % MgO , 3,89-5,99 % Al_2O_3 , 0,32-0,5 % MnO , 1,87-2,01 % Fe_{ar} , 0,17-0,20 % Cr_2O_3 , 0,12-0,15 % P_2O_5 та 0,22-0,29 % S) і силікокальцієвого дроту марки СК30 (вводили у кількості 0,10-0,13 % від маси металу) дозволяє отримувати вміст сірки в сталі до 0,01 %. Дані промислово-дослідних плавок підтверджують гіпотезу адитивного впливу «дифузного» та «осадового» механізмів на процес десульфурації. При цьому частка «дифузійного» механізму становить 70 –80 %, а «осадового» – 20-30 %.

Закордонний досвід виплавки киснево-конвертерної сталі з низьким вмістом сірки розглядався на прикладі порівняння плавок з використанням звичайного чавуну та чавуну після обробки на УДЧ. Зокрема автори роботи [19] стверджують, що в умовах киснево-конвертерного цеху ПАТ «Северсталь» можливо отримувати заданий вміст сірки (до 0,001 %) при вихідному її вмісті до 0,1 % (табл. 3).

Аналіз 82-х плавок з обробкою чавуну на УДЧ показав, що вміст сірки в сталі на повалці в середньому нижче на 0,003 %, а у готовій сталі – на 0,001 %. При цьому для різних марок сталей витрата ТШС для десульфурації на УДЧ була на нижче в 1,25–1,74 рази ніж для плавок на звичайному чавуні. Для всіх плавок з використанням установки десульфурації чавуну вміст сірки в готовій сталі не перевищував кількість регламентованої технічною документацією, а у дослідженнях без використання УДЧ на 5 % плавках вміст сірки був вище заданого на 0,001-0,003 %.

Значний інтерес представляє також технологія виплавки трубної низькосірчатої сталі марки DNV SAWL 485 FD в умовах киснево-конвертерного цеху ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» [20]. Десульфурація металу проводиться в кілька етапів:

- перший – ковшова обробка чавуну на УДЧ вдуванням суміші з флюїдизованого вапна і магнію в потоці азоту;

Плавлення і кристалізація

Таблиця 3

Порівняння показників плавки з використанням звичайного чавуну та чавуну після обробки на УДЧ в умовах ПАТ «Северсталь» [19]

Марка сталі	Вид плавки	Кількість плавки, шт.	Вміст сірки у чавуні, %	Вміст сірки на повалці, %	Витрата ТШС, кг/т	Вміст сірки в сталі, %
Х65	На звичайному чавуні	41	0,015	0,010	2830	0,005
	З чавуном після УДЧ	20	0,004	0,008	2940	0,004
22ГЮ	На звичайному чавуні	39	0,018	0,013	2500	0,007
	З чавуном після УДЧ	9	0,004	0,011	2000	0,007
08Ю	На звичайному чавуні	96	0,018	0,017	730	0,017
	З чавуном після УДЧ	31	0,005	0,011	494	0,011
ІФ	На звичайному чавуні	18	0,018	0,010	550	0,009
	З чавуном після УДЧ	22	0,005	0,006	316	0,007

– другий – ковшова обробка напівпродукту в процесі його випуску з конвертера твердою шлакоутворюючою сумішшю;

– третій – ковшова обробка сталі на УПК у дві стадії: обробка під «білим» шлаком та вдування флюїдизованого вапна в потоці аргону.

При середньому відношенні маси флюїдизованого вапна до маси магнію 4,4 вдалося отримати кінцевий вміст сірки на рівні 0,003 % та ступінь десульфурації чавуну – 85 %. Ступінь десульфурації металу на другому етапі дуже нестабільна через недостатньо надійне відсічення конвертерного шлаку і в середньому становить 24 %. Виявлено залежність між ступенем десульфурації металу та відношенням маси кускового вапна до маси плавикового шпату на першій стадії обробки сталі на УПК. При цьому для більш ефективного видалення сірки рекомендується мати дане відношення в інтервалі 1,9-2,4. Також визначена залежність ступеня десульфурації металу від інтенсивності вдування флюїдизованого вапна в потоці аргону для другої стадії обробки сталі на УПК. При цьому для інтенсифікації видалення сірки рекомендується вдувати флюїдизоване вапно з інтенсивністю 14-15 кг/ (м³·хв).

Встановлена зростаюча залежність коефіцієнта розподілу сірки від питомої витрати флюїдизованого вапна на УПК, згідно з якою

Плавлення і кристалізація

за рекомендованої витрати флюїдизованого вапна від 2,2 до 2,8 кг/т підсумковий коефіцієнт розподілу сірки збільшується від 220 до 275. Загальний ступінь ковшової десульфурації металу 539 плавов при виплавці сталі марки DNV SAWL 485 FD склав 83 %.

Авторами роботи [21] розроблено спосіб десульфурації сталі (зокрема сталі марки C80D (ISO 16120:2017)) в умовах БАТ «Молдавський металургійний завод», що дозволяє забезпечити зниження вмісту сірки в готовому прокаті до 0,002-0,003 %. Часткове видалення сірки відбувається в дуговій сталеплавильній печі (ДСП), а наднизький вміст досягається за рахунок створення високоосновного рафінуючого шлаку в процесі позапічної обробки сталі на УПК (табл. 4).

Таблиця 4

Норми витрат плавикового шпату та вапна для десульфурації високовуглецевої сталі в умовах БАТ «Молдавський металургійний завод» [21]

Норми витрат реагентів для десульфурації сталі	Технологічний етап		Всього
	на випуску з ДСП	при обробці на УПК	
CaF ₂ , кг/т	1,18	3,55	4,73
CaO, кг/т	3,47	6,64	10,11
Відношення CaF ₂ /CaO, %	0,34	0,53	0,47

Запропонований спосіб підвищує якісні показники металу за рахунок регламентованого введення відповідних реагентів (плавикового шпату та вапна). Додаткове введення в сталь силікокальцієвого дроту в кінці позапічної обробки дозволяє знизити вміст сірки до 0,002 %. Запропонований спосіб глибокої десульфурації сталі дозволяє підвищити якісні показники бунтового прокату: наднизький вміст сірки виключає розвиток тріщин в процесі гарячої деформації литої заготовки, знижує загальний вміст в сталі неметалевих включень оксидного типу і, як наслідок, підвищує технологічну пластичність бунтового прокату при подальшій холодній пластичній деформації волочінням.

У дослідженнях [22] процес десульфурації сталі марки 20ГЛ при використанні ТШС (табл. 5) проводили в умовах АТ «Ташкентський механічний завод» в індукційній тигельній печі місткістю 6 т зі зменшенням висоти меніска дзеркала ванни за рахунок підвищення рівня металу. Для підвищення експлуатаційної надійності і поліпшення механічних властивостей сталь в ковші обробляли алюмінієм, силікокальцієм та рідкоземельними металами (РЗМ). РЗМ додавали у вигляді лігатури (50 % Се, 25 % La, 15 % Nd, 5 % Pr, 3 % Fe, 2 % інші РЗМ) в кількості 0,1 % від маси металу.

Дослідно-промислові опробування процесу десульфурації сталі 20ГЛ в індукційній тигельній печі показали:

– при обробці ТШС та модифікуванні сталі РЗМ ступінь десульфурації складала 50-90 % з досягненням вмісту сірки 0,004-0,015 %;

Плавлення і кристалізація

Таблиця 5

Хімічний склад ТШС для обробки сталі 20ГЛ в умовах АТ «Ташкентський механічний завод» [22]

№ шлаку	Вміст у шлаку, % (мас.)				
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaF ₂
1	50	50	-	-	-
2	60	23	9	8	-
3	62	25	-	8	5

– при обробці ТШС ступінь десульфурації складала 45-60 % з досягненням вмісту сірки 0,014-0,017 %.

У роботі [23] для умовах ВАТ «Білоруський металургійний завод» для десульфурації арматурної сталі з вмістом сірки <0,025 %, попередньо виплавлених в дуговій сталеплавильній печі, запропоновано інжектування порошкоподібних матеріалів через установку «Velko» при позапічній обробці сталі. Авторами показано, що питома витрата порошкоподібного матеріалу («TURBO-KALK» (≈ 90 % CaO) та IPC-2 (30-80 % CaO, 1-2 % SiO₂, 10-40 % Al₂O₃, 1-2 % MgO, 6-30 % CaF₂, ≤ 3 % C, ≤ 1 % S, ≤ 1,5 % P₂O₅, ≤ 3 % FeO, ≤ 2 % MnO, ≤ 10 % K₂O+Na₂O)) в кількості 1,95 кг/т підвищує ступінь десульфурації на 32,2 % (табл. 6).

Таблиця 6

Параметри десульфурації сталі на УПК в умовах ВАТ «Білоруський металургійний завод» [23]

Режим продування	Середній вміст сірки у пробі, % мас.					Ступінь десульфурації, %			
	11	51	31	32	92	11-51	51-32	32-92	11-92*
Поверхнєве продування сумішшю «Turbo- kalk»	0,053	0,047	0,045	0,026	0,016	6,4	21,1	29,1	59,3
Поверхнєве продування сумішшю IPC-2	0,052	0,050	0,046	0,039	0,025	5,5	21,8	19,6	51,9
Поглиблене продування сумішшю IPC-2	0,053	0,047	0,043	0,034	0,024	10,6	28,0	30,1	55,0
Порівняльний режим (без продування)*	0,049	0,045	0,042	0,036	0,030	8,4	18,6	19,2	40,2

Примітка: * використано масив даних 500 плавів

Застосування інжекційної технології рекомендується після наведення високоосновного шлаку (В=3,0-3,5 од.) з кінцевим введенням силікокальцієвого дроту. При більшій середній тривалості обробки (на 6,3-6,7 % більше, ніж порівняльних) досягнута швидкість десульфурації сталі при поверхневому вдуванні суміші «TURBO-KALK» – 4,2 ррт/хв, при поверхневому вдуванні суміші IPC-2 – 4,5 ррт/хв, при поглибленому вдуванні суміші IPC-2 – 5,5 ррт/хв.

Таким чином, глибока десульфуріяція сталі (вміст сірки $<0,005\%$) можлива шляхом використання технологічних комплексів «УДЧ – сталеплавильний агрегат» та «УДЧ – сталеплавильний агрегат – УПК». Це забезпечує можливість оптимізації витрат на виробництво сталі, розширює асортимент дефіцитних видів металопродукції та дозволяє усунути ряд обмежувальних умов, що ускладнюють поточне виробництво сталі. Огляд сучасного досвіду десульфуріяції металу в умовах українських та закордонних металургійних підприємств показав, що кінетика десульфуріяції сталі залежить від виду хімічного складу реагенту-десульфуратора, температурних умов, умов переміщення сталі в ковші, додаткових технологічних операцій ковшевої обробки металу, тощо.

Література

1. Лискин В.Ю., Ковалев Г.М. Ресурсосберегающая конвертерная технология. – Донецьк : Металургія: наукові праці. – 2005. – С. 42-45.
2. Чумаков С.Н., Югов П.И. Технологические аспекты производства чистых сталей листового сортамента из маломарганцовистого чугуна // Сталь. – 1999. – №10. – С. 18-22.
3. Курунов И.Ф. Исследование эффективности десиликонизации чугуна при вдувании железорудных материалов в доменную печь // Металлург. – 2003. №16. – С. 40-44.
4. Харлашин П.С., Коломийцева Ю.С., Виноградова А.А. Влияние серы на поверхностные свойства железо-сернистых расплавов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. – 2014. – Вип. 28. – С. 61-67.
5. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием / Н. А. Воронова. – М. : Металлургия, 1980. – 240 с.
6. Лубяной Д.А., Фомкин С.А., Кухаренко А.В., Лубяной Д.Д., Маркидонов А.В., Соина-Кутищева Ю.Н. О технологии удаления серы в кислых индукционных печах // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75. – № 6. – С. 689-694. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-6-689-694>.
7. Плохих П.А., Хавалиц Ю.В., Плохих П.А., Плохих А.А. Эффективность десульфурации при применении различных вариантов внепечной обработки стали // Метал та лиття України. – 2020. – №1(28). – С. 42-47. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.042>.
8. Борнацкий И. И. Десульфурация металла. – М. : Металлургия, 1970. – 320 с.
9. Бигеев А. М. Металлургия стали: учеб. для вузов. – М. : Металлургия, 1988. – 480 с.
10. Богушевский В.С., Каленчук В.А. Оптимизация процесса десульфурации металла в конвертерном цехе с использованием различных реагентов // Литьё и металлургия. – 2017. – №3(88). – С. 5-10. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-3-5-10>.
11. Шипельников А.А., Бобылева Н.А. Исследование десульфурации стали в условиях конверторного производства. – Режим доступа: <https://doi.org/10.18411/sr-10-06-2019-24>.

12. Воинов С.Г., Шалимов А.Г., Косой Л.Ф. и др. Рафинирование стали синтетическими шлаками, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1970. – 463 с.
13. Тарасюк Л.И., Костыря И.Н. К вопросу десульфурации низкокремнистых марок стали на агрегате «ковш-печь» // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Мариуполь, 9-11 сентября 2015 г.). – Мариуполь : ПГТУ, 2015. Т 1. – С. 100-110.
14. Вергун А.С. и др. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ-конвертер» // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – 2007. – Вип. 14. – С. 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.traccli.2007.03.011>.
15. Вергун А.С. и др. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ-конвертер-КП» // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – 2007. – Вип. 15. – С. 99-110.
16. Харлашин П. С., Бакланский В.М., Рассказова Е.Г. Внедоменная десульфурация чугуна // Университетская наука. – 2012 : в 3 т.: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Мариуполь, 24-27 апреля 2012 г.). – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – Т. 1. – С. 97-100.
17. Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Кондрашкин В.А., Греков С.В., Ходотова Н.Е., Аносова А.А. К вопросу выбора оптимального состава шлака-десульфуратора трубных марок стали // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – 2014. – Вип. 28. – С. 170-178. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/139279>.
18. Журавлёва С.В., Паниотов Ю.С., Мамешин В.С. Оценка процесса десульфурации металла на АКП по бивариантному механизму // Металл и литьё Украины. – 2015. – №2(261). – С. 8-11.
19. Чумаков С.М., Зинченко С.Д. Комплексная технология получения низкосернистой стали в ККЦ ОАО «Северсталь» // Труды 5-го Конгресса сталеплавыльщиков (г. Москва, 7–10 октября 1996 г.). – Москва, 1999.
20. Ушаков С.Н. Разработка технологии производства трубной ультранизкосернистой стали в современном кислородно-конвертерном цехе: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук 05.16.02 / Ушаков Сергей Николаевич; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». –Магнитогорск, 2020. – 17 с.
21. Парусов Э.В. и др. Обеспечение сверхнизкого содержания серы при внепечной обработке стали // Наукові праці ВНТУ. – 2017. – № 1. – С. 1-6.
22. Турсунов Н. К., Семин А. Е., Саноклов Э. А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи с дальнейшей обработкой в ковше с использованием редкоземельных металлов // Чёрные металлы. – 2017. – №1. – С. 33-40.
23. Пивцаев В.Е., Дьяченко В.И., Проскурин В.А. Десульфурация стали с использованием инжекционной установки «Velko» // Литьё и металлургия. – 2008. – №1(45). – С. 15-22.

References

1. Liskin V. Yu., Kovalev G. M., *Metalurgiya : naukovi praci*, 2005, pp. 42-45 [in Russian].
2. Chumakov S. N., Yugov P. I., *Stal'*, 1999, No.10, pp. 18-22 [in Russian].

3. Kurunov I. F., *Metallurg*, 2003, No.16, pp. 40-44 [in Russian].
4. Kharlashin P. S., Kolomiitseva Y. S., Vinogradova G. A., *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2014, Vol. 28, pp. 61-67 [in Russian].
5. Voronova N.A., *Desulfuracija chuguna magniem* (Desulfurization of cast iron with magnesium). Moscow: Metallurgija, 1980, 240 p. [in Russian].
6. Lubyanoi D.A., Fomkin S.A., Kukharensko A.V., Lubyanoi D.D., Markidonov A.V., Soina-Kutishcheva Yu.N., *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, Issue. 75, No. 6, pp. 689-694 [in Russian]. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-6-689-694>.
7. Plokhikh P. A., Khavalits Yu. V., Plokhikh P. A., Plokhikh A. A., *Metal and Casting of Ukraine*, 2020, No. 1(28), pp. 42-47 [in Russian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.042>.
8. Bornatskii I.I., *Desul'furatsiya metala* (Desulfurization of metal). Moskva: Metallurgiya, 1970, 320 p. [in Russian].
9. Bigeev A.M., *Metallurgiya stali: uchebnik dlya vuzov* (Steel metallurgy: textbook for universities). Moscow: Metallurgiya, 1988, 480 p. [in Russian].
10. Bogushevsky V.S., Kalenchuk M.V., *Litiyo i Metallurgiya*, 2017, No. 3(88), pp. 5-10 [in Russian]. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-3-5-10>.
11. Shipelnikov A.A., Bobyleva N.A., *Issledovanie desul'furatsii stali v usloviyah konvertornogo proizvodstva*. Retrieved from <https://doi.org/10.18411/sr-10-06-2019-24> [in Russian].
12. Voinov S.G., Shalimov A.G., Kosoi L.F., Kalinnikov E.S., *Rafinirovanie stali sinteticheskimi shlakami* (Steel refining with synthetic slags). Moscow: Metallurgiya, 1970, 463 p. [in Russian].
13. Tarasyuk L.I., Kostyrya I.N., *Teplo- i massoobmennye protsessy v metallurgicheskikh sistemakh : materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* (Heat and mass transfer processes in metallurgical systems: materials of the IX International scientific and technical conference). Mariupol : PGUTU, 2015, Issue 1. pp. 100-110 [in Russian].
14. Vergun A.S., Kislyakov V.G., Polyakov V.F., Korchenko V.P., Tubol'tsev L.G., Shevchenko A.F., Padun N.I., Semykina T.S., *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii : sbornik nauchnykh trudov*, 2007, Vol. 14, pp. 112-119 [in Russian]. <https://doi.org/10.1016/j.tracli.2007.03.011>.
15. Vergun A.S., Kislyakov V.G., Polyakov V.F., Korchenko V.P., Tubol'tsev L.G., Shevchenko A.F., Padun N.I., *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii : sbornik nauchnykh trudov*, 2007, Vol. 15, pp. 99-110 [in Russian].
16. Harlashin P. S., Baklanskij V. M., Rasskazova E. G., *Universitetskaja nauka-2012, vol. 3: tezis dokladov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferentsii* (University Science-2012: in 3 volumes : abstracts of the international scientific and technical conference). Mariupol : PGUTU, 2012, Issue 1, pp. 97-100 [in Russian].
17. Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P., Kondrashkin V.A., Grekov S.V., Khodotova N.E., Anosova A. A., *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii : sbornik nauchnykh trudov*, 2014, Vol. 28, pp. 170-178 [in Russian].
18. Zhuravleva S., Paniotov U., Mameshin V., *Metal and Casting of Ukraine*, 2015, No. 2(261), pp. 8-11 [in Russian].
19. Chumakov S.M., Zinchenko S.D., *Kompleksnaja tehnologija poluchenija nizkosernistoj stali v KKC OAO «Severstal»* (Proceedings of the 5th Steelworks Congress). Moskva, 1999 [in Russian].

20. Ushakov S.N., *Razrabotka tehnologii proizvodstva trubnoj ul'tranizkosernistoj stali v sovremennom kislorodno-konverternom cehe* (Development of technology for the production of ultra-low-sulfur pipe steel in a modern oxygen-converter shop), Kand. tekhn. nauk. Magnitogorska : FGBOU VO «Magnitogorskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. G.I. Nosova», 2020, 17 p. [in Russian].
21. Parusov E.V., Sichkov A.B., Sagura L.V., Chuiko I.N., *Scientific works of Vinnytsia National Technical University*, 2017, No. 1, pp. 1-6 [in Russian].
22. Tursunov N. K., Semin A. E., Sanokulov E. A., *Chjornye metally*, 2017, No. 1, pp. 33-40 [in Russian].
23. Pivczayev V.V., Dyachenko V.I., Proskurin E.A., *Litiyo i Metallurgiya*, 2008, No. 1(45), pp. 15-22 [in Russian].

Одержано 20.09.21

O. S. Vodennikova, P. V. Holovkov

Modern view on steel desulfurization

Summary

Modern technological schemes of steel production do not allow to achieve low ($< 0.01\%$ S) and ultra-low ($< 0.005\%$ S) sulfur content on the production of in the metal directly. That is why out-of-furnace steel treatment is often used to remove sulfur. Desulfurization process of steel depends on the chemical composition of the slag, the time of its formation in the ladle, metal oxidation, conditions of mixing of steel in a ladle, additional technological operations and ladle metal processing. Methods are widely used for desulfurization of steel treatment of steel with solid slag-forming mixtures, synthetic slag, lime-aluminous slag, silico-calcium and other powdered materials. Modern approaches to the process of steel desulfurization in conditions steel production are analyzed in the Study. In particular, the Ukrainian (on the example of PJSC 'Azovstal Iron & Steel Works' and PJSC 'Dneprovsky Integrated Iron & Steel Works named after Dzershinsky') and foreign (on the example of PJSC 'Severstal' and PJSC 'Magnitogorsk Iron & Steel Works') experience of desulfurization under oxygen converter production. The use of technological complexes 'Installation of pig iron desulfurization steel making unit' and 'Cast iron desulfurization installation steel making unit is 'oven-bucket' installation' provides a deeper desulfurization of steel, the possibility of optimizing the cost of steel production, expands range of scarce products and eliminates a number of restrictive conditions that complicate current production. The analysis of steel C80D desulfurization process is given in the conditions of JSC 'Moldova Steel Works', in which partial sulfur removal occurs in an arc steel making furnace, and the ultra-low content is achieved by creating a highly basic refining slag in the process out-of-furnace processing of steel. The study of the kinetics of the desulfurization process of 20GL steel in the conditions of JSC 'Tashkent Mechanical Plant' with the use of solid slag-forming mixtures and modification of steel with rare-earth metals is analyzed. The issue of desulfurization of electric steel in the conditions of OJSC 'Byelorussian Steel Works' with injection of powdered materials through the installation 'Velko' during out-of-furnace processing of steel is considered.

Keywords: steel desulfurization, desulfurizer reagent, degree of desulfurization, cast iron desulfurization installation, out-of-furnace processing of steel, "oven-bucket" installation.