

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ



**Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України)
Український державний університет науки і технологій МОН України
Дніпровський державний технічний університет МОН України**

Збірник тез

ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»



DOI: 10.52150/2522-9117-2025-conferens

**19-20 листопада 2025
м. Дніпро**

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE OF UKRAINE



**Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technology of the MES of Ukraine
Dniprovsky State Technical University MES of Ukraine**

Conference Proceedings

**All-Ukrainian scientific and technical conference
« SCIENCE AND METALLURGY »**



DOI: 10.52150/2522-9117-2025-conferens

19-20 November 2025

Dnipro

Організаційний комітет конференції:

Бабаченко О. І. (голова) – чл.-кор. НАН України, д.т.н., с.н.с., директор ІЧМ НАН України;
Парусов Е. В. (заступник голови) – д.т.н., с.н.с., заступник директора ІЧМ НАН України;
Гармаш Л. І. (секретар) – к.т.н., учений секретар ІЧМ НАН України;
Подольський Р. В. (заступник секретаря) – докт. філ., голова Ради молодих вчених, наук. співроб. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей ІЧМ НАН України;
Голубенко Т. М. (заступник секретаря) – к.т.н., старш. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України.

Науковий комітет конференції:

Камкіна Л. В. – д.т.н., проф., декан факультету Металургійних процесів та хімічних технологій ННІ «Інституту промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій МОН України;
Чернятевич А. Г. – д.т.н., проф., пров. наук. співроб. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАН України;
Тогобицька Д. М. – д.т.н., проф., пров. наук. співроб. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів ІЧМ НАН України;
Муравйова І. Г. – д.т.н., с.н.с., пров. наук. співроб. відділу металургії чавуну ІЧМ НАН України;
Луценко В. А. – д.т.н., с.н.с., пров. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України;
Дейнеко Л. М. – д.т.н., проф., зав. кафедрою «Матеріалознавства та термічної обробки металів» ННІ «Інституту промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій МОН України;
Сігарьов Є. М. – д.т.н., проф., зав. кафедрою «Металургії чорних металів та обробки металів тиском» Дніпровського державного технічного університету МОН України;
Самохвалов С. Є. – д.т.н., проф., старш. наук. співроб. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАН України;
Грішин О. М. – д.т.н., доц., заступник декана Металургійного факультету, доцент кафедри «Теоретичних основ металургійних процесів» ННІ «Інституту промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій МОН України;
Приходько І. Ю. – д.т.н., с.н.с., зав. відділу процесів і машин обробки металів тиском ІЧМ НАН України;
Кононенко Г. А. – д.т.н., ст. досл., зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей ІЧМ НАН України;
Меркулов О. Є. – д.т.н., с.н.с., старш. наук. співроб. відділу металургії чавуну ІЧМ НАН України;
Борисенко А. Ю. – д.т.н., с.н.с., старш. наук. співроб. відділу термічної обробки металу для машинобудування ІЧМ НАН України;
Баюл К. В. – д.т.н., ст. досл., старш. наук. співроб. відділу технологічного обладнання та систем управління ІЧМ НАН України

Conference organizing committee:

Babachenko O. I. (Chairman of the committee) – Cor.-Mem. of National Academy of Science of Ukraine, Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., Director of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine.

Parusov E. V. (Deputy Chairman) – Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., Deputy Director of Iron and steel institute of National Academy of Science of Ukraine.

Garmash L. I. (Secretary of the committee) – Cand. Sc. (Engin.), Academic secretary of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine.

Podolsky R. V. (Deputy secretary) – Ph.D., Chairman of the Council of Young Scientists, scientific associate of the Department of Problems of Deformation and Heat Treatment of Construction steels of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine.

Golubenko T. M. (Deputy secretary) – Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res. of Department of Heat treatment of metal for mechanical engineering of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine.

Scientific committee of the conference:

Kamkina L. V., Dr. Sc. (Engin.), Prof., Dean of Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Head of Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes of Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology;

Chernyatevich A. G., Dr. Sc. (Engin.), Prof., Lead researcher of department of Physical and technical problems of steel metallurgy of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Togobytska D. M., Dr. Sc. (Engin.), Prof., Lead researcher of department of Physico-Chemical Problems of Metallurgical Processes of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Muravyova I. G., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., Lead researcher of Department of Iron Metallurgy of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Lutsenko V. A., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., Lead researcher of Department of Heat treatment of metal for mechanical engineering of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Deineko L. M., Dr. Sc. (Engin.), Prof., Head of Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals of Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology;

Sigaryov Ye. M., Dr. Sc. (Engin.), Prof., Head of Department Metallurgy of ferrous metals and metal pressure processing of Dnipro State Technical University;

Samokhvalov S. E., Dr. Sc. (Engin.), Prof., senior researcher of department of Physical and technical problems of steel metallurgy of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Grishin O. M., Dr. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., Deputy Dean of Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Associate Professor of Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes of Institute of Industrial and Business Technologies of the Ukrainian State University of Science and Technology;

Prykhodko I. Yu., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., Head of Department of Processes and Pressure Metal Processing Machines of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Kononenko G. A., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., Head of Department senior researcher, of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Merkulov O. E., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., senior researcher of Department of Iron Metallurgy of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Borysenko A. Yu., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., senior researcher of department of Heat treatment of metal for mechanical engineering of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine;

Bayul K.V., Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., senior researcher of department of technological equipment and systems management of Iron and steel institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine.

Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість

Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Лопатенко К. П., Болденко М. Г., Чайка О. Л., Щербачов В. Р. Вплив водню на процеси розм'якшення та плавлення окатишів в доменній печі.....	9
Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Лопатенко К. П., Болденко М. Г., Корнілов Б. В., Вішняков В. І. Збагачення відновного газу воднем та його вплив на процеси розм'якшення-плавлення агломерату в доменній печі.....	10
Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О., Муравйова І. Г., Гармаш Л. І., Іванча М. Г., Ізюмський М. М. Перспективи використання водню в умовах роботи ДП №3 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»...	11
Голуб Т. С., Молчанов Л. С. Фізико-хімічний аналіз можливості та доцільності термічного розкладання оксидів заліза.....	13
Голуб Т. С., Молчанов Л. С., Мінай О. М. Фізичне та чисельне дослідження газодинамічних властивостей струменів, що формуються складеними соплами під час верхньої продувки.....	14
Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г. Розробка та дослідження заходів щодо підвищення енергоефективності конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	15
Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г., Голуб Т. С., Какушкін Є. С. Співставлення результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання верхньої продувки двофазної рідкої системи з використанням однакової продувочної фурми.....	16
Семикін С. І., Голуб Т. С., С. О. Дудченко, Вакульчук В. В. Стендові дослідження активованого електричним розрядом кисневого газового струменя, що витікає з верхньої продувочної фурми.....	17
Чернятевич А. Г., Похвалітий А. А., Кондрашенков Д. С. Дослідження процесу попереднього підігріву металевих брухт пиловугільним паливом у кисневому конвертері.....	18
Семенов Ю. С. Дослідження впливу стабільності теплового стану доменної печі на техніко-економічні показники плавки.....	19
Лебідь В. В. Удосконалення способів оцінки розподілу шихти при її завантаженні у піч лотковим безконусним пристроєм.....	20
Похвалітий А. А., Сігарьов Є. М., Круть А. В., Герасименко П. Л. Результати експлуатації модернізованих наконечників кисневих фурм.....	21
Похвалітий А. А., Чубіна О. А., Вовк А. О. Аналіз формування газорідного потоку у випускному каналі кисневого конвертера.....	22
Губарева А. І., Кошляк І. М., Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р. Удосконалення процесу запалювання агломераційної шихти шляхом розробки блокового пальника з роздільною подачею повітря.	23
Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Холодний С. А. Вплив інтенсивності доменної плавки на формування структури і радіальний газорозподіл стовпа шихти.....	24
Мізіна І. В., Абдулкін Р. С., Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р. Аналіз впливу схеми укладання на рівномірність хімічного складу залізородного штабеля.....	25
Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Кашеев М. А., Чубіна О. А. Моделювання процесу усереднення хімічного складу залізородної шихти при формуванні штабеля.....	26
Сігарьов Є. М., Семірягін С. В., Похвалітий А. А., Кондрашенков Д. С. Обґрунтування умов отримання феронікелю з вторинної сировини.....	27
Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Іванніков С. В. Використання штучного інтелекту в металургійній галузі.....	28
Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Борсук С. А. Використання штучного інтелекту в освітньому процесі за спеціальністю G10 «Металургія»	29
Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Карамзіна А. С. Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійній промисловості України.....	30
Воденнікова О. С., Воденніков С. А. Промислове випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь»	31
Григор'єв С. М., Яковлєв Д. В. Методологія розрахунку економічної доцільності інноваційного розвитку виробництва губчастого феровольфраму у вітчизняній металургії.....	32

ЕлектрOMETALURGIЯ

Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Дубасов Ю. О. Шляхи підвищення стійкості електродів.....	33
--	----

Технології позапічної обробки чавуну та сталі

Кисляков В. Г., Тогобицька Д. М., Петруша В. П., Ліхачов Ю. М., Ходотова Н. Є. Розвиток і наповнення інформаційно-пошукової системи "Позапічна обробка чавуну".....	34
Маначин І. О., Кисляков В. Г., Рибальченко М. О., Петруша В. П., Почитаєв С. О. Дослідження ефективності засвоєння магнію у процесах позапічної десульфурзації чавуну.....	35
Єськов Д. В., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Павлюк Р. Д. Чисельне моделювання газодинаміки потоків у наконечнику заглибної фурми.....	36

Металознавство та термічна обробка сталі

Бабаченко О. І., Подольський Р. В., Кононенко Г. А., Сафронова О. А., Сафронов О. Л., Дементьєва Ж. А. Особливості формування шарів wel та bel у сталі залізничних коліс різного способу виготовлення в умовах екстремального гальмування.....	37
Гузенко Д. І., Ротт Н. О., Кононенко Г. А. Оцінка напружено-деформованого стану сталі 16Г2АФ у конструкції цистерни для транспортування зріджених вуглеводневих газів.....	38
Олійник Е. В., Парусов Е. В., Чуйко І. М. Експериментально-теоретичні дослідження процесів структуроутворення в сталі CrMoV1Si за умов безперервного повітряного охолодження з різними швидкостями...	39
Голубенко Т. М., Луценко В. А., Луценко О. В., Сівак Г. І. Вплив деформації на розмір неметалевих включень в тонкому дроті.....	40
Ниркова Л. І., Рибаків А. О., Гончаренко Л. В., Осадчук С. О. Корозійно-механічна тривкість труб тривало експлуатованого магістрального газопроводу.....	41
Вишневецький В. В., Кононенко Г. А. Фізико-хімічні аспекти забезпечення міжфазної адгезії у термопластичних композитах, армованих вуглецевим волокном.....	42
Аджамський С. В., Балаханова Т. В., Барановська О. Є., Подольський Р. В. Комплексний аналіз впливу параметрів сканування та положення на платформі побудови на геометрію та стабільність ванни розплаву під час процесу LPBF.....	43
Губенко С. І., Парусов Е. В., Чуйко І. М., Парусов О. В. Поведінка гетерофазних неметалевих включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч» за гарячої та холодної прокатки сталей..	44
Губенко С. І. Вплив обробки сталей на зростання тріщин поблизу неметалевих включень.....	45
Воденнікова О. С., Воденніков С. А. Наноарт та металознавство: використання штучного інтелекту для обробки структур металів і сплавів.....	46
Воденнікова О. С., Воденніков С. А. Поглинання інертних газів та утворення пор в гранулах жароміцного сплаву ЭП975МП.....	47

Прогресивні технології обробки металу тиском

Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Фурлет К. І. Використання штучного інтелекту при обробці металів тиском.....	48
--	----

Моделювання та оптимізація технологічних процесів

Греков С. В., Піптюк В. П., Самохвалов С. Є. Підготовка холодного моделювання процесів легування металевого розплаву.....	49
Амбражей М. Ю., Парусов Е. В. Методика апроксимації діаграм деформації при випробуванні на розтяг сталевих арматур для залізобетонних конструкцій.....	50
Степаненко Д. О., Белькова А. І., Тогобицька Д. М., Ходотова Н. Є. Оцінка властивостей хромовмісних шлаків з позиції міжатомної взаємодії в розплавах.....	51
Степаненко Д. О., Тогобицька Д. М., Поворотня І. Р., Греков С. В. Термодинамічний аналіз поведінки фосфору у металевих системах на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку.....	52
Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. Вплив питомої густини добавок на гідродинамічні та масопереносні процеси в ковші при їх колективному введенні.....	53
Клемешов Є. С., Приходько І. Ю. Критерії та методи оцінки умов з'єднання та роз'єднання шарів металу в багатошаровому прокаті.....	54
Канівець Д. Ю., Несвіт О. М. Автоматичні лінії з обробки металів як стратегічний ресурс оборонної промисловості України у воєнний час.....	55
Пантейков С. П., Романенко А. А., Бондаренко Я. І. Дослідження можливості перебігу процесу науглецювання заліза газом со при відновленні з вюститу.....	56
Пантейков С. П., Бондаренко Я. І., Романенко А. А. Дослідження можливості перебігу процесу науглецювання марганцю газом со при відновленні з манган монооксиду.....	57

CONTENT

English version

P.

Iron and steel metallurgy: technologies, innovations, quality

Nesterov O. S., Garmash L. I., Lopatenko K. P., Boldenko M. G., Chaika O. L., Shcherbachov V. R.	
Influence of hydrogen on the processes of softening and melting of pellets in a blast furnace.....	58
Nesterov O. S., Garmash L. I., Lopatenko K. P., Boldenko M. G., Cornilov B. V., Vishnyakov V. I.	
Hydrogen enrichment of reducing gas and its effect on the softening–melting behavior of sinter in the blast furnace.....	59
Chaika O. L., Kornilov B. V., Moskalyna A. O., Muravyova I. G., Garmash L. I., Iziumskyi M. M.	
Prospects for the use of hydrogen in the operating conditions of BF №3 PJSC "ZAPORIZHSTAL".....	60
Golub T. S., Molchanov L. S. Physico-chemical analysis of the possibility and feasibility of thermal decomposition of iron oxides.....	62
Golub T. S., Molchanov L. S., Minai O. M. Physical and numerical study of gasdynamic properties of jets formed by composite nozzles during top blowing.....	63
Molchanov L. S., Cherniatevych A. H. Development and research of measures to increase the energy efficiency of converter smelting in the conditions of PJSC "KAMET-STEEL"	64
Molchanov L. S., Cherniatevych A. H., Golub T. S., Kakushkin Ye. S. Comparison of the results of low-temperature and high-temperature modeling of top blowing of a two-phase liquid system using the same nozzle..	65
Semykin S. I., Golub T. S., Dudchenko S. O., Vakulchuk V. V. Bench research on electrical discharge activated oxygen gas jet flowing from the top blowing nozzle.....	66
Chernyatevych A. G., Pokhvalityi A. A., Kondrashenkov D. S. Research on the preheating process of metal scrap using pulverized coal fuel in an oxygen converter.....	67
Semenov Yu. S. Study of the influence of the thermal stability of a blast furnace on the technical and economic indicators of smelting.....	68
Lebid V. V. Improvement of methods for estimating the burden distribution when charging into the furnace by chute-type bell-less device.....	69
Pokhvalityi A. A., Sigarev Ye. M., Krut A. V., Gerasymenko P. L. Operating results of modernized oxygen lance tips.....	70
Pokhvalityi A. A., Chubina O. A., Vovk A. O. Analysis of gas–liquid flow formation in the tap channel of an oxygen converter.....	71
Gubarieva A. I., Koshlyak I. M., Rudenko R. M., Siharov Ye. M., Rudenko M. R. Improvement of the ignition process of sintering mixture through the development of a block burner with separate air supply.....	72
Kryachko H. Yu., Siharyov Ye. M., Rudenko M. R., Kholodnyi S. A. Influence of blast furnace intensity on formation of charge column structure and radial gas distribution.....	73
Mizina I. V., Abdulkyn R. S., Rudenko R. M., Siharov Ye. M., Rudenko M. R. Analysis effect of stacking pattern on the uniformity chemical composition of an iron ore stockpile.....	74
Rudenko R. M., Siharov Ye. M., Rudenko M. R., Kashcheev M. A., Chubina O. A. Modeling of the process of averaging the chemical composition of iron ore charge during stack formation.....	75
Siharov Ye. M., Semiryahin S. V., Pokhvalityi A. A., Kondrashenkov D. S. Rationale for obtaining ferronickel from secondary raw materials.....	76
Vodennikova O., Vodennikov S., Ivannikov S. Use of artificial intelligence in the metallurgy industry.....	77
Vodennikova O., Vodennikov S., Borsuk S. Use of artificial intelligence in the educational process in the specialty G10 «Metallurgy».....	78
Vodennikova O., Vodennikov S., Karamzin A. Modern aspects of the use of fluted lime in the metallurgical industry of Ukraine.....	79
Vodennikova O., Vodennikov S. Industrial testing of TSH with fluted lime in the open-heated steel workshop of PJSC «Zaporizhstal».....	80
Grigoriev S.M., Yakovlev D.V. Methodology for calculating the economic feasibility of innovative development of sponge ferrotungsten production in domestic metallurgy.....	81

Electrometallurgy

Vodennikova O., Vodennikov S., Dubasov Yu. Ways to increase electrode stability.....	82
---	----

Technologies for step by step processing of cast iron and steel

Kysliakov V. G., Togobytska D. M., Petrusha V. P., Likhachov Y. M., Khodotova N. E. Development and content of the information retrieval system "Out-Of-Furnace Cast Iron Processing".....	83
Manachyn I. O., Kysliakov V.G., Rybalchenko M. O., Petrusha V. P., Pochytaiev S. O. Simulation of the interaction processes of components of the two-phase flow introduced into cast iron during injection desulfuration.....	84
Yeskov D. V., Siharov Ye. M., Rudenko M. R., Pavliuk R. D. Numerical simulation of gas dynamics of flows in a submerged lance nozzle.....	85

Metal Science and Heat Treatment of Steel

Babachenko O. I., Podolskyi R. V., Kononenko G. A., Safronova O. A., Safronov O. L., Dementeva Zh. A. Features of the formation of wel and bel layers in railway wheel steel of various manufacturing methods under extreme braking conditions.....	86
Huzenko D. I., Rott N. O., Kononenko G.A. Assessment of the stress-strain state of 16G2AF steel in the design of a tank for transporting liquefied hydrocarbon gases.....	87
Oliinyk E. V., Parusov E. V., Chuiko I. M. Experimental and theoretical studies of structure formation processes in CrMoV1Si steel under continuous air cooling with different speeds.....	88
Golubenko T. M., Lutsenko V. A., Lutsenko O. V., Sivak G. I. Effect of the deformation on the size of the non-metallic inclusions in the thin wire.....	89
Nyrkova L. I., Rybakov A. O., Goncharenko L. V., Osadchuk S. O. Corrosion-mechanical resistance of pipes of long-operated main gas pipeline.....	90
Vyshnevetskyi V. V., Kononenko G. A. Physico-chemical aspects of ensuring interfacial adhesion in thermoplastic composites reinforced with carbon fiber.....	91
Adzhamskyi S. V., Balakhanova T. V., Baranovska O. E., Podolskyi R. V. Comprehensive analysis of scanning parameters and build platform location effects on melt pool geometry and stability during the LPBF process.....	92
Gubenko S. I., Parusov E. V., Chuiko I. M., Parusov O. V. Behavior of the transformation of heterophase non-metallic inclusions «refractory phase surrounded by low-melting shell» and «phases are beside» during hot and cold rolling of the steels.....	93
Gubenko S. I. Influence of steel treatment on the crack growth near non-metallic inclusions.....	94
Vodennikova O., Vodennikov S. Nanoart and materials science: using artificial intelligence for processing structures of metals and alloys.....	95
Vodennikova O., Vodennikov S. Absorption of inert gases and formation of pores in EP975MP heat-resistant alloy granules.....	96

Progressive Metal Processing Technologies

Vodennikova O., Vodennikov S., Furlet K. Use of artificial intelligence in pressure processing of metals.....	97
--	----

Modeling and optimization of technological processes

Grekov S. V., Piptyuk V. P., Samokhvalov S. E. Preparation of cold modeling of metal molten alloying processes.....	98
Ambrazhey M. Yu., Parusov E. V. A methodology for approximating stress-strain diagrams from tensile testing of steel reinforcement for reinforced concrete structures.....	99
Stepanenko D., Bielkova A., Togobitskaya D., Hodotova N. Evaluation of properties of chromium-containing slags from the standpoint of interatomic interaction in melts.....	100
Stepanenko D. O., Togobitska D. M., Povorotnia I. R., Grekov S. V. Thermodynamic analysis of phosphorus behavior in metal systems based on the concept of directed chemical bond.....	101
Samokhvalov S. Ye., Piptyuk V. P., Grekov S. V. The influence of additive density on hydrodynamic and mass transfer processes in a ladle during their collective injection.....	102
Klemeshov Ye. S., Prykhodko I. Yu. Criteria and methods for assessing the conditions of layer bonding and delamination in multilayer rolled metal.....	103
Kanivets D. Yu., Nesvit O. M. Automatic metal processing lines as a strategic resource of ukraine's defense industry in wartime.....	104
Panteikov S. P., Romanenko A. A., Bondarenko Ya. I. Investigation of the possibility of iron carburization by co gas during reduction from wüstite.....	105
Panteikov S. P., Bondarenko Ya. I., Romanenko A. A. Investigation of the possibility of manganese carburization by co gas during reduction from manganese monoxide.....	106

Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість

УДК 622.78 : 669.162.21

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ПРОЦЕСИ РОЗМ'ЯКШЕННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ОКАТИШІВ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

О. С. Нестеров к.т.н., с.н.с., Л. І. Гармаш к.т.н., К. П. Лопатенко, М. Г. Болденко,
О. Л. Чайка к.т.н., с.н.с., В. Р. Щербачов

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Вплив водню на процеси розм'якшення-плавлення різних типів залізородної сировини в доменній печі є складною та багатогранною темою і одностайної думки з цього приводу немає і до сих пір. Літературні джерела демонструють значні відмінності у своїх висновках, хоча ні в кого не викликає сумніву, що додавання водню суттєво впливає на характеристики когезійної зони в доменній печі – області, де матеріали розм'якшуються та плавляться, чим обмежують потік газу і газопроникність залізородної сировини. Деякі дослідники доказують, що при збільшенні вмісту водню від 0% до 10% початкова і кінцева температури розм'якшення окатишів зростають, а діапазон розм'якшення розширюється за рахунок того, що водень прискорює швидкість відновлення шихти [1]. Інші ж, навпаки, стверджують, що при збільшенні концентрації водню від 0% до 12% початкова температура розм'якшення знижується [2].

В лабораторних умовах Інституту чорної металургії були проведені дослідження високотемпературних властивостей окатишів українського виробництва двох типів: офлюсованих ($\text{Fe}_{\text{заг}}=67.0$, $\text{FeO}=1.0$, $\text{SiO}_2=2.7$, $\text{CaO}=2.75$) і неофлюсованих ($\text{Fe}_{\text{заг}}=65.4$, $\text{FeO}=0.79$, $\text{SiO}_2=3.5$, $\text{CaO}=0.35$) в залежності від кількості водню у відновному газі в діапазоні від 0% до 20%. Виявлено, що кращі характеристики розм'якшення-плавлення демонструють високоосновні офлюсовані окатиші – товщина когезійної зони для них менша ніж для кислих. Зі зростанням вмісту водню в газовій суміші підвищуються усі температури: для неофлюсованих окатишів температура втрати газопроникності $T_{\text{вг}}$ зростає на $\sim 90^\circ\text{C}$, початку фільтрації $T_{\text{пф}}$ на $\sim 30^\circ\text{C}$, максимальної фільтрації $T_{\text{мф}}$ на $\sim 80^\circ\text{C}$; для офлюсованих температури також підвищуються, але тільки до 10%-ного вмісту H_2 в газовій суміші: $T_{\text{вг}}$ і $T_{\text{пф}}$ на $\sim 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{мф}}$ на $\sim 115^\circ\text{C}$. Діапазони розм'якшення, плавлення та злипання при цьому звужуються, що покращує проникність шихти. Пояснити це можна декількома причинами. Менший розмір молекул H_2 та вищий коефіцієнт дифузії (порівнянно с CO) прискорює швидкість відновлення та підвищує температуру розм'якшення, а висока дифузійна здатність водню не дозволяє утворювати щільної залізної оболонки на поверхні окатишів, яка послаблює стійкість до деформації [3].

Збагачення воднем у доменній печі є важливим кроком до зниження споживання вуглецю та викидів CO_2 , а також до покращення технологічних показників роботи печі головним чином за рахунок оптимізації поведінки розм'якшення-плавлення та динаміки зони когезії. Результати досліджень показують, що додавання водню в суміші відновних газів в цілому позитивно впливає на високотемпературну поведінку окатишів українського виробництва.

Літературні джерела

1. Qiang Li, Jing Song Wang, Guang Wang. Softening and melting behavior of ferrous burden in hydrogen-rich blast furnace blowing break and re-blowing. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65(6). P. 825-832. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-247>
2. Lan C., Hao Y., Shao J. Effect of H_2 on Blast Furnace Ironmaking: A Review. *Metals*. 2022, Vol. 12. P. 1864. <https://doi.org/10.3390/met12111864>
3. Guilin Wang, Gele Qing, Meng Xu, Zhixing Zhao, Rongsheng Li and Yang Li. Softening-melting mechanism of basic pellets under hydrogenenriched reduction. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65(6). P. 803-810. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-366>

ЗБАГАЧЕННЯ ВІДНОВНОГО ГАЗУ ВОДНЕМ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ПРОЦЕСИ РОЗМ'ЯКШЕННЯ-ПЛАВЛЕННЯ АГЛОМЕРАТУ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

**О. С. Нестеров к.т.н., с.н.с., Л. І. Гармаш к.т.н., К. П. Лопатенко, М. Г. Болденко,
Б. В. Корнілов к.т.н., В. І. Вішняков**

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Збагачення відновного газу воднем у доменному процесі має комплексний вплив на поведінку розм'якшення-плавлення залізрудних матеріалів та на динаміку когезійної зони – ключової області, що визначає газопроникність та загальну ефективність плавки. Вплив водню на процеси розм'якшення і плавлення агломерату є предметом численних досліджень, оскільки H_2 може спричиняти як позитивні, так і негативні ефекти. З огляду на гетерогенну структуру агломерату та наявність таких фаз, як силікоферити кальцію і алюмінію, їхнє відновлення у середовищі, збагаченому H_2 , може призводити до інтенсивної деградації матеріалу, погіршення газопроникності шару та утворення рідких фаз. Деякі дослідження показують, що зі збільшенням вмісту водню у відновному газі початкова температура розм'якшення агломерату знижується, що пояснюється інтенсивним утворенням FeO на поверхні і всередині часток та призводить до формування низькоплавкого шлаку з пустою породою [1]. Інші роботи, навпаки, демонструють поступове підвищення температури початку розм'якшення, що пов'язують з вищим ступенем відновлення, зменшенням вмісту FeO та утворенням металевого заліза [2]. Тобто, дотепер результати експериментів залишаються суперечливими і наукова спільнота поки що не дійшла єдиної думки з цього питання, визнаючи, що багато що залежить від умов проведення плавки та властивостей залізрудної сировини [3].

В лабораторних умовах ІЧМ за допомогою власної методики, яка визначає ключові характеристики процесів розм'якшення-плавлення, були проведені дослідження високотемпературних властивостей агломерату українського виробництва ($Fe_{\text{зар}}=58.9$, $FeO=6.95$, $SiO_2=5.29$, $CaO=8.34$), які показали, що в цілому додавання водню позитивно впливає як на процеси відновлення, так і на процеси розм'якшення-плавлення. Підвищуються температури втрати газопроникності та фільтрації розплаву через коксову насадку. При збільшенні вмісту водню у відновному газі до 10% температура формування газонепроникної структури в агломераті підвищується 1390 °C до приблизно 1500 °C. Температури розм'якшення та плавлення зростають на 50-70 °C. Збільшення температур початку плавлення та максимальної фільтрації зі зростанням концентрації водню призводить до звуження інтервалу плавлення, що покращує проникність шихти та підвищує ефективність плавки. Тобто збагачення відновних газів воднем оптимізує металургійні властивості агломерату у високотемпературній зоні доменної печі, що є одним з ключових чинників підвищення стабільності та ефективності доменного процесу. Цей ефект пояснюється як меншими розмірами молекул H_2 та їхнім вищим коефіцієнтом дифузії порівняно з CO , що підвищує відновну здатність газу, прискорює швидкість відновлення шихти та підвищує температуру втрати газопроникності, так і морфологічними особливостями агломерату – відсутністю фаяліту, його заміщенням дикальційсилікатом Ca_2SiO_4 та розчиненням MgO у фазі вюститу.

Літературні джерела

1. Hoque M. M., Mitra S., Barrett N., O'Dea D. and Honeyands T. Effect of hydrogen on voidage and permeability of ferrous burden in softening and melting process. *Conference Paper*. September 2023. <https://www.researchgate.net/publication/375695812>
2. Qiang Li, Jing Song Wang, Guang Wang. Softening and Melting Behavior of Ferrous Burden in Hydrogen-rich Blast Furnace Blowing Break and Re-blowing. *ISIJ International*. 2024. Vol. 65(6). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-247>
3. Guilin Wang, Gele Qing, Meng Xu, Zhixing Zhao, Rongsheng Li and Yang Li. Softening-melting Mechanism of Basic Pellets under Hydrogen-enriched Reduction. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65(6). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-366>

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В УМОВАХ РОБОТИ ДП №3 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

**О. Л. Чайка, к.т.н., с.н.с., Б. В. Корнілов, к.т.н., А. О. Москалина, к.т.н.,
І. Г. Муравйова, д.т.н., с.н.с., Л. І. Гармаш, к.т.н., с.н.с., М. Г. Іванча, М. М. Ізюмський**

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

В останні роки, у зв'язку зі всесвітньою тенденцією скорочення викидів CO_2 , збільшився інтерес та кількість публікацій, присвячених дослідженню та розробці технології застосування водню в різних галузях науки і техніки, у тому числі і в галузі виробництва чавуну як альтернативи та заміни вуглецевмісного палива, що, як наслідок, сприяє зменшенню викидів CO_2 . У світі, на рівні державної політики, все більша увага приділяється розвитку водневого спрямування, і воднева енергетика набуває все більшої підтримки не лише на корпоративному, а й на державному рівні. Воднева енергія з її різноманітними джерелами, низькими викидами вуглецю, високою ефективністю та широким спектром застосування вважається найбільш багатообіцяючою та екологічно чистою енергією у 21 столітті та включена до національної стратегії розвитку енергетики багатьма країнами.

Однак за переваг застосування водню в напрямку декарбонізації промисловості в цілому і металургії зокрема мають місце і певні проблеми використання водню, які можуть вимагати вирішення: висока вартість виробництва екологічно чистого водню; зберігання та транспортування водню; особливості горіння водню, що може вимагати внесення змін до способу підведення водню у фурмене вогнище та конструкції фурмених приладів.

Питання високої вартості водню та його транспортування, за нашим переконанням, можна вирішити за рахунок встановлення та використання на металургійних підприємствах маломодульних високотемпературних ядерних реакторів для виробництва водню та енергозабезпечення комбінату.

Незважаючи на перелічені вище проблеми, питання застосування водню в металургії в цілому та доменної печі зокрема, як найбільш енергоємного агрегату у циклі виробництва металу, є актуальним з погляду зменшення емісії діоксиду вуглецю.

Враховуючи те, що на сьогодні найпоширенішим додатковим паливом, що застосовується у доменній печі, є пиловугільне паливо (ПВП) раціональним підходом може бути спільне застосування ПВП та водню у доменній печі. Такий підхід дозволить вирішити кілька задач – забезпечити низьку собівартість металу та зменшити викиди CO_2 із доменної печі.

Аналіз впливу спільного вдування в фурмене вогнище водню та ПВП на викиди CO_2 та показники доменної плавки ДП №3 та визначення обмежень щодо використання H_2 в печі виконано з використанням моделі повного енергетичного балансу доменної плавки, що включає спільний розрахунок теплового, матеріального та ексергетичного балансів.

Спільне вдування ПВП та водню накладає обмеження за теоретичною температурою горіння у фурменому вогнищі (Ттеор). За дослідженнями та власним досвідом встановлено, що за великих витрат ПВП Ттеор. має становити не менше 2050-2100°C. Тому розгляд зниження Ттеор. до 1800°C може бути доцільним лише в умовах застосування водню. В аналізі спільного застосування ПВП та водню Ттеор. була прийнята постійною на рівні базового періоду роботи ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» ~2080°C.

При використанні додаткового палива, що вдується до фурменого вогнища, для підтримки Ттеор. на заданому рівні здійснюється збільшення витрати технічного кисню в дуття. Збільшення вмісту кисню в дутті призводить до інтенсифікації доменної плавки накладає технічні та технологічні обмеження на роботу печі. З одного боку, інтенсифікація плавки призводить до швидкості опускання шихти, що збільшує навантаження на систему шихтоподачі і завантаження доменної печі. З іншого – збільшення частки кисню в шихті може призводити до збільшення навантажень на систему охолодження печі, стан футерування і агрегатів, що обслуговують її. Щодо умов роботи ДП №3 визначено обмеження вмісту кисню в дутті на рівні 31%, що за підтримки Ттеор. ~2080°C еквівалентно вдуванню 175 м³/т разом із ПВП витратою 160 кг/т.

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень встановлено, що застосування водню в доменній печі призводить до перерозподілу газового потоку в об'ємі печі, що, зрештою, позначається на зменшенні температури колошникового газу. На підставі виконаного аналізу встановлено, що застосування водню витратою 175 м³/т призводить до зменшення температури колошникового газу на 60°C (3,4°C на

кожні 10 м³/т Н₂). Це може бути обмежуючим фактором збільшення витрати водню для доменних печей, що працюють з холодним агломератом. Для умов ПАТ «Запоріжсталь» температура колошникового газу не є обмежуючим фактором, оскільки всі доменні печі працюють з агломератом температурою 250-400°C.

В результаті дослідження встановлено, що спільне вдування ПВП та водню на ДП №3 дозволить:

- зменшити викиди CO₂ не менше ніж на 11%, при цьому коефіцієнт заміни коксу воднем становить 0,27 кг/м³;
- зменшити частку прямого відновлення заліза на 0,9% на кожні 10 м³/т водню. Це сприяє зменшенню напруженості доменного процесу та питомої витрати енергії на виробництво кожної тонни чавуну;
- збільшити вихід вторинних енергоресурсів з доменної печі на 2,7% на кожні 10 м³/т Н₂, які доцільно використовувати для роботи ТЕЦ;
- покращити ексергетичні показники: збільшення ККД доменної печі на ~2% та екологічності роботи доменної печі на 2,8%.

На основі вище наведеного встановлено, що використання водню спільно з ПВП в доменній печі є перспективним напрямом зменшення викидів CO₂ та зменшення витрати коксу в доменній печі.

ФІЗИКО-ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ТА ДОЦІЛЬНОСТІ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА

Т. С. Голуб, к.т.н., ст.досл., Л. С. Молчанов, к.т.н., ст.досл.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Залізовуглецеві сплави все ще зберігають за собою лідерство серед конструкційних матеріалів завдяки технологічній та економічній доступності. Однак, основний шлях їх виробництва – ланцюг «доменна піч – кисневий конвертер», чинить значний екологічний вплив на навколишнє середовище, зокрема виділяючи тонни парникових газів. Це вже не одне десятиліття змушує дослідників та практиків шукати нових способів отримання залізовуглецевих сплавів, серед яких найбільшу частку складають способи прямого відновлення. Проте, всі існуючі способи прямого відновлення потребують участі відновника, яким найчастіше є вуглець чи його оксиди, або водень. Відповідно, за умов використання вуглецевмісних матеріалів, новий процес не далеко відходить від його попередника за впливом на навколишнє середовище. Використання водню є найбільш прийнятним варіантом з формуванням в результаті екологічно безпечних продуктів. Проте досі не розроблено екологічного способу його утворення у необхідних для відновлення у промислових умовах кількостях без значних енергетичних вкладень. Альтернативним варіантом прямого відновленню заліза може стати процес прямого розкладання його оксидів – термоліз. Цей відомий давно процес не набув розповсюдження через наявні для оксидів заліза обмеження за високими температурами (так, наприклад, для FeO потрібна температура 3500 °C). Однак, відомо, що на процеси розкладання можливо чинити вплив не тільки з точки зору температури, але й з точки зору парціального тиску кисню в навколишньому середовищі. В роботі проведено термодинамічне дослідження процесу розкладання оксидів заліза системи Fe₂O₃-Fe₃O₄-FeO за умов підвищених температур та впливу зниженого тиску (у тому числі парційного тиску кисню). Авторами встановлено, що для проаналізованої системи оксидів заліза за умов створення розрядження до $1 \cdot 10^{-5}$ атм можна досягти зниження температури початку розкладання оксидів у 1,35 – 1,68 раз.

ФІЗИЧНЕ ТА ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУМЕНІВ, ЩО ФОРМУЮТЬСЯ СКЛАДЕНИМИ СОПЛАМИ ПІД ЧАС ВЕРХНЬОЇ ПРОДУВКИ

Т. С. Голуб, к.т.н., ст.досл., Л. С. Молчанов, к.т.н., ст.досл., О. М. Мінай, докт. філ.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Киснево-конверторний процес, як найбільш вигідний на даний час спосіб виплавки конструкційної сталі у світі, знаходиться у динамічному стані постійного вдосконалення. Найчастіше вдосконалення торкаються конструкції та режимів експлуатації верхньої продувної фурми. Це зумовлене її ключовим впливом на процес кисневого конвертування: формуванням високошвидкісного (надзвукового) струменя кисню, який витікає з сопел фурми, для ефективної взаємодії з рідкою ванною – залізобуглецевим розплавом. Характеристики струменів визначають гідродинамічні, фізико-хімічні, тепло- та масообмінні процеси, які відбуваються у конвертерній ванні [1]. Для забезпечення цих умов газовому струменю необхідно надати достатню кінетичну енергію на виході з продувального сопла з досягненням надзвукових показників швидкості. Відповідно для вирішення поставленої задачі ще з середини ХХ століття на заміну циліндричним соплом, які забезпечують лише дозвукові характеристики течії газового струменя, почали використовувати конвергентно-дивергентні сопла типу Лавалю. З того часу дослідники неодноразово намагалися вдосконалити наведену конструкцію: скорочене сопло – для зменшення втрати енергії, видовжене «горло» та ідеально-розрахункове для зменшення ударних хвиль, з циліндричним виходом для подовження струменя [2-3]. Серед різноманітних конструкцій продувних сопел особливе місце займають складені сопла, які складаються з декількох частин та формують одночасно різні взаємодіючі між собою потоки. В роботі проведено фізичне з використанням водної моделі з продувкою стисненим повітрям та чисельне в середовищі ANSYS дослідження продувки крізь складені сопла, сформовані двома концентрично розташованими циліндрами за різного співвідношення периферійної та центральної частин (25 %, 50 % та 75 % від загальної площі сопла) у порівнянні з продувкою крізь сопла Лавалю з однаковими еквівалентними радіусами та за рівних дуттьових умов. Було виявлено ряд важливих особливостей газових струменів, що витікають з сопел складеного типу:

1) частка периферійної частини складеного сопла відповідає у більшій мірі за гідрогазодинамічні характеристики формування газових струменів:

- за умов малої периферійної частки (25 %) струмені, що витікають зі складених сопел за будовою та характером взаємодії з рідкою ванною подібні до таких, що формуються при продувці крізь сопла Лавалю (струмінь має «бочкоподібну» одно ланцюгову структуру, кратер занурення за формою та глибиною наближається відповідного від струменя з сопла Лавалю). Збільшення периферичної фракції до 50 % й подальше до 75% відбивається на зміні як у структурі струменя, так і у особливостях взаємодії з рідкою ванною (струмінь набуває складної переплетеної структури в середині кожної великої «бочки», кратер взаємодії стає більш пологим, округлої форми та глибина значно зменшується).

- чим більша периферійна частина складеного сопла, тим менше сплесків утворюється під час продувки рідини з переходом на дрібний «туман». Це, вірогідно, можна пояснити формуванням більшої кількості дрібних хвиль на поверхні ванни під дією складених сопел та скороченням відстані між ними до 50 % у порівнянні з продувкою крізь сопло Лавалю.

2) струмені, що витікають зі складених сопел, характеризуються значними показниками енергії (на рівні чи вище ніж у струменів сформованих соплами Лавалю) при меншій ніж у струменів з сопла Лавалю довжині ядра на 15 – 33 % відповідно при збільшенні периферійної частки з 25 % до 75 %.

Літературні джерела

1. Li M.M., Li Q., Li L., He Y.B., Zou Z.S. Effect of operation parameters on supersonic jet behaviour of BOF six-nozzle oxygen lance. *Ironmaking & Steelmaking*. 2014. Vol. 41(9). P. 699–709. <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.00000000154>
2. Ali M.H., Mashud M., Bari A.A., Islam M.M. Numerical solution for the design of minimum length supersonic nozzle. *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7(5). P. 605–612.
3. Thirugnanasambantham K.T., Elangovan B., SreeRangaiah S., Kannan R., Palani S., Nachiappan M.N. Optimization of the convergent-divergent nozzle tip and reducing the acoustic energy. *Turkish Journal of Engineering*. 2015. Vol. 9(3). P. 417–424. <https://doi.org/10.31127/tuje.1561759>

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ В УМОВАХ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Л. С. Молчанов, к.т.н., ст.досл., А. Г. Чернятевич, д.т.н., проф.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Розробка технічних рішень і технологій, що направлені на зниження викидів CO_2 та економію сировинних і енергетичних ресурсів дозволяє підвищити конкурентоздатність металургійних підприємств при нестабільному постачанні їх вихідними матеріалами. Вибір напрямків декарбонізації на металургійних підприємствах України пов'язаний з інвестиційними можливостями і вирішенням проблеми випуску якісної конкурентоспроможної металопродукції із забезпеченням вимог ресурсо- та ефективності технологічного процесу по маршруту «доменна піч – кисневий конвертер». В умовах найбільш поширеної у світовій практиці технології киснево-конвертерної плавки з комбінованою продувкою ванни киснем зверху через звичайну багатосоплову фурму та нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище максимальна кількість переробленого металобрухту в шихті (металобрухт + рідкий чавун) складає 25 % [1]. Незалежно від ціни металобрухту і рідкого чавуну сучасні екологічні норми промислово розвинутих держав вимушують виробників чавуну скорочувати виробництво останнього як основного джерела викидів CO_2 в навколишнє середовище з підвищенням частки брухту у завалку. В роботі проведено фізичне та математичне дослідження способів підвищення частки металевго брухту за рахунок його попереднього нагріву у 250-т конвертері для умов конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» за рахунок використання нових конструкцій паливно-кисневих фурм, а також подальшої продувки розплаву з використанням багатоцільової двоконтурної кисневої фурми, яка забезпечує функції енергоефективної комбінованої продувки конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів при подаванні зверху надзвукових і звукових кисневих і азотних струменів з одночасним вдуванням через днище агрегату нейтральних перемішуючих газів (азот, аргон). Важливим завершальним кроком циклу виплавки сталі є нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера з метою подовження робочої кампанії конвертера. До впровадження у повоєнний період відновлення країни у роботі запропоновані наступні нові енергоефективні фурмені пристрої та способи ведення конвертерної плавки, які можуть забезпечити підвищення частки металевго брухту в металошихті: паливно-киснева фурма для нагріву брухту в конвертері при вертикальному положенні з використанням пилувугільного палива або природного газу (обладнана головкою з 6-ма кисневими соплами Лавалю з розміщенням в кожному із них циліндричних паливних сопел та технологія нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці); конструкція обертової паливно-кисневої фурми для нагріву брухту при горизонтальному положенні конвертера (обладнана головкою з 10-ма циліндричними соплами типу «труба в трубі», розміщеними в 5 рядів по довжині стовбура фурми та технологія нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці); енергоефективна технологія комбінованої продувки конвертерної ванни киснем зверху і нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище з використанням нової конструкції двоконтурної фурми (містить дворядну 15-ти соплову головку: 5 сопел Лавалю і 10 циліндричних).

Літературні джерела

1. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. *Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія*. Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. 454 с.

СПІВСТАВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРХНЬОЇ ПРОДУВКИ ДВОФАЗНОЇ РІДКОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНАКОВОЇ ПРОДУВНОЇ ФУРМИ

Л. С. Молчанов, к.т.н., ст.досл., А. Г. Чернятевич, д.т.н., проф., Т. С. Голуб, к.т.н., ст.досл., Є. С. Какушкін

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Найбільш розповсюдженим способом вдосконалення техніко-економічних показників процесу виплавки сталі у кисневих конвертерах є розробка нових та поліпшення вже існуючих конструкцій продувних пристроїв. Особливо це стосується верхньої продувної фурми, яка має провідну роль у процесі конвертування. Обов'язковим етапом при вдосконаленні конструкції кисневих фурм та розробці режимів їх експлуатації є перевірка її ефективності за умов продувки рідкої ванни. Таку перевірку можна зробити або на реальному промисловому об'єкті (вкрай ризикований спосіб через можливість аварії чи втрати продуктивності агрегату), або на фізичній моделі чи шляхом математичного моделювання (з валідацією результатів на фізичній моделі). Найбільш показовим є фізичне моделювання, яке може проводитися як на реальному металевому розплаві з продувкою киснем (складний та вартісний метод) або з використанням у якості модельних середовищ води та олії, що імітують металевий та шлаковий розплав, із продувкою повітрям (доступний, простий метод). Під час моделювання обов'язковим є використання коефіцієнтів подоби, які враховують відмінність геометричних розмірів та фізичних властивостей модельних середовищ від реальних. Однак, все одно низькотемпературне моделювання може надати більш якісні результати. Для переходу до кількісних показників, які б відповідали реальному процесу, необхідно розуміти глибше відповідність процесів, що відбуваються під час продувки водної моделі та реального металевого розплаву. Це можливо зробити за умов використання однакових продувних пристроїв та близьких технологічних режимів (відмінність тоді складається тільки у особливостях взаємодії однакових газових струменів із модельним середовищем). Тому вельми актуальним є проведення досліджень щодо порівняльного аналізу результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання процесів продувки рідкої ванни за умов застосування однакових продувних пристроїв та максимальної подоби технологічних умов продувки. Аналіз проведено за результатами фізичного низькотемпературного (на 6 кг водній моделі з додаванням 600 г поліметилсиліконової олії) та високотемпературного (на 60 кг моделі кисневого конвертера з продувкою рідкого чавуну з додаванням 2 кг вапна для шлакоутворення) моделювання за умов продувки верхньою три сопловою продувною фурмою (критичний діаметр сопла $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, кут нахилу до вісі фурми 14 град.). Тиск продувального газу до 300 кПа.

За результатами досліджень встановлено: 1) при використанні поліметилсиліконової олії є можливість змодельовати взаємодію рідини з газовим струменем, яка у реальному процесі відбувається у заключний період продувки, коли шлакова ванна дещо «осідає» та спостерігається «оголення» металу за рахунок відступу шлаку від центру ванни під дією газового струменя. 2) відповідно до вказаного періоду висота спінювання другої фази за умов низькотемпературного моделювання відрізняється на 13 – 20 % від реальної висоти спінювання шлаку. Це дозволяє оцінити та розділити вплив верхніх газових струменів на спінювання шлаку та вплив підйомної сили газових пухирців CO, що утворюються у реальній ванні через реакцію зневуглюцювання.

СТЕНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВОВАНОГО ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ КИСНЕВОГО ГАЗОВОГО СТРУМЕНЯ, ЩО ВИТІКАЄ З ВЕРХНЬОЇ ПРОДУВНОЇ ФУРМИ

С. І. Семикін, к.т.н., с.н.с., Т. С. Голуб, к.т.н., ст.досл., С. О. Дудченко, к.т.н.,
В. В. Вакульчук, к.т.н.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

На сьогоднішній день, частка сталі, що виплавляється у кисневих конвертерах, залишається на значному рівні, не дивлячись на активний розвиток новітніх процесів виробництва сталі. Така висока конкурентна здатність зумовлена постійним активним розвитком процесу конвертування у напрямку підвищення як технологічних показників так і екологічності процесу. Основні джерела забруднення природного середовища, які формують діяльність киснево-конвертерного процесу - це виділення газу з великою часткою СО та СО₂ й запиленістю. Вони утворюються як результат взаємодії ключових факторів процесу: високошвидкісного газового кисневого струменя, який витікає з верхньої фурми, та шлако-металевої рідкої ванни, за умов достатньо високих температур й внаслідок перебігу хімічних реакцій окислення, в першу чергу, вуглецю, як основного компоненту залізовуглецевого розплаву. Найбільш розповсюдженим напрямком підвищення технологічних та екологічних показників конвертування наразі є напрямок підвищення частки металевого брухту, який переробляється, зі зниженням витрат чавуну та вапна, виробництво яких пов'язане з формуванням викидів оксидів вуглецю [1]. Це можливо за умов підвищення теплого стану ванни та інтенсивного протікання обмінних процесів. Одним зі шляхів інтенсифікації процесу кисневого конвертування може бути використання озону, який є значно активнішим за кисень, однак нестійким за температур киснево-конвертерної плавки [2]. В роботі проведено дослідження способу утворення озону безпосередньо на виході з верхньої продувної фурми завдяки використанню іскрового електричного розряду. Основною метою дослідження було визначення можливості використання лабораторного зразку продувної фурми для продувки залізовуглецевого розплаву шляхом оцінки розповсюдження озону за довжиною газового струменя. Дослідження були проведені на лабораторному стенді з визначення концентрації озону з використанням озономіру Циклон 5.21 та моделі верхньої продувної кисневої фурми, яку обладнано пристроєм створення озону шляхом іскрового електричного розряду на виході з продувного сопла. За результатами досліджень відмічено, що озон завдяки іскровому розряду створюється перед продувним пристроєм на відстані 5-7 калібрів (сплеск концентрації) й далі змішується з газовим потоком та рухається вздовж струменя. Це зумовлює зменшення концентрації озону вздовж струменя в залежності від продувного тиску. При тиску продувного газу 50 – 100 кПа на відстані від 10 до 40 калібрів відмічено зниження концентрації озону на 15 – 20 % на кожні 10 калібрів. При тиску газу 200 кПа зниження концентрації складає 30 – 35 % на кожні 10 калібрів. При цьому на відстані 40 калібрів, що відповідає робочому положенню продувної фурми у кисневому конвертері у спокійному стані ванни, кількість озону складає при тиску продувного газу 50 – 100 кПа на рівні 2,5 мг/м³, а при тиску 200 кПа – 1,5 – 2 мг/м³. Однак слід враховувати те, що під час реальної продувки сталеплавильна ванна знаходиться в постійному русі, і протягом більшого проміжку часу продувки наконечник фурми занурений в шлаковий розплав в результаті підйому ванни. Тому слід брати до уваги концентрацію озону на відстані 5 – 10 калібрів, рівень якої достатньо високий: при тиску газу 50 – 100 кПа на рівні 12 – 20 мг/м³, а при 200 кПа досягає 32 – 35 мг/м³. Отже, можна очікувати, що озон, який продукується в підфурменій зоні, зможе брати участь в процесах рафінування металу. За отриманими результатами було розроблено емпіричний коефіцієнт розширення кисневого струменя для оцінки продуктивності озону.

Літературні джерела

1. Madhavan N., Brooks G., Rhamdhani M.A., Bordignon A. Contribution of CO₂ emissions from Basic Oxygen Steelmaking process. *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 797-815. <https://doi.org/10.3390/met12050797>
2. Vosmaer F. *Ozone: its manufacture, properties and uses*. Leopold Classic Library, 2015. 232 p.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДГРІВУ МЕТАЛЕВОГО БРУХТУ ПИЛОВУГІЛЬНИМ ПАЛИВОМ У КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ

А. Г. Чернятевич д.т.н., проф., А. А. Похвалітий к.т.н., доц.,
Д. С. Кондрашенко

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Пилоугільне паливо (ПВП) є однією з найперспективніших альтернатив традиційним теплоносіям у металургії завдяки високій теплотворній здатності та економічній доцільності. У конвертерному виробництві сталі застосування ПВП обмежується ризиком локального перегріву шихти, труднощами контролю процесу горіння та неповного допалювання відхідних газів. Нерівномірний розподіл температури в порожнині конвертера може спричиняти прискорений знос футерівки та створювати ризик викидів при заливанні чавуну.

Розробка спеціальних паливно-кисневих фурм зі спільною подачею ПВП у потоці кисню дозволяє поєднати переваги пиловугільного палива з особливостями конвертерного процесу, підвищити енергоефективність та знизити залежність від традиційних видів палива. Актуальним залишається питання забезпечення рівномірного згоряння ПВП і стабілізації температурного режиму, що є критично важливим для запобігання локальних перегрівів і утворення рідкої фази.

Для виявлення закономірностей впливу основних факторів на процес попереднього підігріву металевго брухту з використанням ПВП розроблено конструкцію паливно-кисневої фурми та лабораторний стенд, які дають змогу досліджувати характер спалювання палива й ефективність нагріву брухту в порожнині кисневого конвертера [1].

Вуглецеві частинки ПВП запалюються після випаровування вологи та піролізу, створюючи високотемпературні (до 2000 °C) яскраві факели, які ефективно нагрівають поверхню металевго брухту. Використання ПВП забезпечує вищий коефіцієнт згоряння та ефективніше використання кисню порівняно з кусковим вугіллем завдяки більшій сумарній поверхні частинок і інтенсивнішому теплообміну. Час підвищення температури поверхні брухту до 850–870 °C скоротився приблизно вдвічі, при цьому утворення рідкої фази не спостерігалось. Встановлено емпіричну залежність температури факела від питомої витрати кисню ($\text{м}^3/\text{кг}$ ПВП). Найбільш рівномірний прогрів без локального оплавлення досягається при 1,0–1,35 $\text{м}^3/\text{кг}$ ПВП [2].

Запропоноване конструктивне рішення паливно-кисневої фурми дозволяє ефективно регулювати процес підігріву металевго брухту, зменшити теплові втрати, мінімізувати шкідливий вплив шлакоутворення та підвищити енергоефективність конвертерного процесу. Використання ПВП у такому форматі дає змогу скоротити час попереднього підігріву та знизити ризик локального перегріву і пошкодження футерівки.

Літературні джерела

1. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Молчанов Л. С., Похвалітий А. А., Кондрашенко Д. С. Установка високотемпературного моделювання нагріву металевго брухту в конвертері: тези доповідей // *Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2024»*, (28–30 травня 2024 р.), м. Харків–Київ. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 505–507.

2. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Молчанов Л. С., Похвалітий А. А., Кондрашенко Д. С., Чубіна О. А. Відеофіксація фізико-хімічних процесів у порожнині конвертера під час нагріву металевго брухту: тези доповідей // *Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2024»*, (28–30 травня 2024 р.), м. Харків–Київ. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 507–511.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАБІЛЬНОСТІ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ НА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПЛАВКИ

Ю. С. Семенов, к.т.н., с.н.с.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

Цільовою функцією управління тепловим станом доменної плавки є підтримання теплового режиму на рівні, що забезпечує отримання чавуну заданої якості з мінімальними відхиленнями компонентів його хімічного складу. Як основний показник теплового стану найчастіше використовується вміст кремнію в чавуні [Si]. Більшість методів прогнозування [Si], що набули поширення останніми роками, мають невисокий ступінь точності через багатофакторність впливу технологічних параметрів на тепловий стан доменної плавки. Крім цього точність цих способів прогнозування визначається двома головними умовами: оперативним отриманням повного обсягу достовірної інформації про параметри технології та сталістю паливно-сировинних та дуттєвих параметрів. Дотримання першої умови важко здійснити, а при дотриманні другої умови – забезпечується стабільність теплового стану, що виключає доцільність прогнозування як такого. Тому актуальною є задача ведення стабільного процесу, чіткого розуміння ступеня впливу тих чи інших факторів та оперативності реагування на зміни [1].

Для найбільш точної оцінки стабільності теплового стану доменної плавки в останні роки прийнято використовувати середньоквадратичне відхилення (СКВ) $[Si] - \sigma[Si]$, яке визначають зазвичай в рамках однієї доби роботи доменної печі (ДП) за кількістю випусків, що припадають на добу. Оцінка $\sigma[Si]$ на більш тривалій часовій ділянці ускладнює аналіз виявлення чинників, які впливають на $\sigma[Si]$, оскільки порівняння відбувається щодо середньої величини [Si], на яку можуть впливати різні фактори в кожній добі.

Для умов роботи ДП-1М ПрАТ “Камет-сталь” у березні–червні 2025 р. методом статистичної згортки та сортування добових даних були отримані зв’язки $\sigma[Si]$ від питомої витрати коксу (К) та коксового еквіваленту (КЕ), з використанням прийнятих коефіцієнтів заміни коксу коксовим горіхом (КГ) – 0.72 та пиловугільним паливом (ПВП) – 0.80. Аналізований період роботи ДП-1М характеризувався наступними деякими показниками плавки: К–438 кг/т; КЕ–522 кг/т; $[Si]$ –0,59%; $\sigma[Si]$ –0,058%; ПВП–83 кг/т; КГ–25 кг/т; добове виробництво–2862 т/добу. Слід зазначити, що аналіз виконувався для умов роботи ДП-1М в період коли інша ДП-9 цеху була зупинена на капітальний ремонт, що дозволило уникнути певних особливостей усереднення окремих параметрів між двома ДП цеху.

Отримані залежності: $K=109,68 \cdot \sigma[Si]+431,16$ ($R_{x,y}=0,77$) та $KE=148,04 \cdot \sigma[Si]+513,13$ ($R_{x,y}=0,88$) свідчать про вплив стабільності теплового стану на економічність плавки та необхідність дотримання величини $\sigma[Si]$ не більше 0,060% для отримання високих показників плавки. Для досягнення цієї величини $\sigma[Si]$ необхідно, насамперед, у нестабільних паливно-сировинних умовах: дотримання графіка випусків; проведення цільових промивок горна важковідновними матеріалами при його захаращенні; проведення профілактичних м'яких промивок від флюсових залишків та коксового сміття у проміжній зоні ДП сумішшю залізородних матеріалів основністю 0,65–0,85 од.; забезпечення рівномірного розподілу теоретичних температур горіння по окружності ДП шляхом спрямованого регулювання витратами ПВП по повітряних фурмах; використання в доменній шихті матеріалів, що містять марганець, для забезпечення зміни вмісту марганцю в чавуні не нижче 0,20 % [1].

Літературні джерела

1. Semenov Yu.S., Podkorytov A.L., Shumelchik E.I. et al. (2021). Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel in Translation*. Vol. 51(4). P. 261–266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>

УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ОЦІНКИ РОЗПОДІЛУ ШИХТИ ПРИ ЇЇ ЗАВАНТАЖЕННІ У ПІЧ ЛОТКОВИМ БЕЗКОНУСНИМ ПРИСТРОЄМ

В. В. Лебідь к.т.н.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Встановлення лоткових безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП) на доменні печі різного об'єму (у світовій практиці від 600 до 6000 м³), збільшення варіантів конструктивних виконань завантажувального апарату та його розподільчого лотка, вимагають врахування в алгоритмах моделей параметрів потоку матеріалів, що сходять з розподільвача. Розроблено розрахунковий спосіб оцінки розподілу щільності потоку шихтових матеріалів, що сходять з лотка БЗП, при їх завантаженні в піч. Удосконалено експериментальний спосіб із застосуванням сенсорного вимірювального зонда оригінальної конструкції, що дозволило підтвердити достовірність результатів розрахунків у промислових умовах. На доменній печі об'ємом 1513 м³ експериментально встановлено, що ширина потоку матеріалів вивантажуваних при використанні кутів нахилу лотка в діапазоні 30°-48° відрізняється незначно і на рівні засипу шихти 1,0 м становить ~0,8 м, а розподіл щільності потоку по його ширині нерівномірний – інтенсивна частина зміщена до осі печі. Отримані розрахунково-експериментальні дані про закономірності розподілу щільності потоку шихтових матеріалів, що завантажуються, дозволили вдосконалити метод вибору раціональних кутів нахилу лотка в робочих кутових положеннях і отримати залежність раціональної кількості рівновеликих кільцевих зон від величини радіуса колошника доменної печі. Удосконалені розрахункові методи оцінки розподілу матеріалів використано при розробці математичної моделі завантаження БЗП, яка реалізована ІЧМ у 2019-2020 роках на доменній печі обсягом 2000 м³.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОДЕРНІЗОВАНИХ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ

А. А. Похвалітий, к.т.н, доц., Є. М. Сігарьов, д.т.н, проф., А. В. Круть, П. Л. Герасименко

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

У роботі розглядаються ключові фактори, що впливають на стійкість зварних наконечників кисневих фурм, які працюють в екстремальних умовах конвертерного виробництва сталі. Зокрема, наконечники зазнають впливу високих температур, які значно перевищують температуру плавлення міді (1085 °C), а також дії кисневого дуття, теплового випромінювання від зони реакції та механічного зносу від крапель розплавленого металу. На відміну від литих, ковано-паяних наконечників тощо, для підвищення стійкості зварних наконечників, крім роботи у режимах, наближених до розрахункового, значення має якість виконання зварювальних робіт та отриманих зварних швів [1]. Основним чинником, що обмежує строк служби зварних наконечників, є руйнування зварних швів, зокрема між соплом Лавалю та зовнішньою обоймою (таріллю).

Під час першого етапу випробувань дослідних наконечників, виготовлених із застосуванням зварного дроту МНЖКТ (ГОСТ 16130-90), було виявлено схильність зварних швів до утворення тріщин у поздовжньому і поперечному напрямках. Аналіз хімічного складу показав значну розбіжність у вмісті міді між зварювальним дротом (92,81 %) та матеріалом сопел (99,99 %), що створює умови для формування крихких евтектичних сполук, вразливих до утворення тріщин. Мідь, особливо з домішками свинцю, вісмуту, сірки, кисню тощо, має високу схильність до гарячих тріщин під час зварювання [3]. З метою зменшення легування і підвищення теплопровідності було здійснено перехід на зварювальний дріт CuSn1 (ISO 24373:2018), який має близький до міді М1 хімічний склад (відхилення 0,39 %). Це дозволило підвищити ресурс зварних наконечників із 16–56 до 49–245 плавов. Проте навіть за використання CuSn1 залишаються випадки витoku води через тріщини в швах.

Металографічні дослідження за допомогою мікроскопа «Olympus» підтвердили: причинами тріщиноутворення є як порушення технології зварювання (недостатній або надмірний нагрів), так і забруднення поверхонь оксидами. Аналіз швів наконечника зі стійкістю >200 плавов показав наявність непровару та крихких структур на межах зерен, що є осередками тріщин.

Рекомендації для підвищення стійкості зварних наконечників: - використання зварювального дроту, максимально близького за складом до основного металу; - проведення попереднього і супутнього підігріву металу, особливо при товщині понад 10–15 мм; - проковування зварних ділянок після зварювання; - ретельне очищення зварних поверхонь від оксидів перед зварюванням.

Таким чином, досягнення високої стійкості зварних наконечників потребує комплексного підходу до вибору матеріалів, технології зварювання та конструкторських рішень. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію температурного режиму, легування швів і структури металічних з'єднань.

Літературні джерела

1. Похвалітий А. А., Сігарьов Є. М., Чубін К. І., Лобанов Ю. С., Якунін П. А. Особливості визначення конструкції наконечників кисневих фурм в нестаціонарних умовах конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2021. № 39. С. 9–14. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.3>
2. Сігарьов Є.М., Похвалітий А.А., Руденко М.Р., Кондрашенков Д.С., Круть А.В. Визначення факторів впливу на стійкість зварних наконечників кисневих фурм. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки). Тематичний. До 95 річчя кафедри металургії ДДТУ*. 2024. С. 111–122. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.10>

АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ У ВИПУСКНОМУ КАНАЛІ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА

А. А. Похвалітий к.т.н., доц., О. А. Чубіна к.т.н, доц., А. О. Вовк

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

В умовах підвищення вимог до якості сталі та зростання ролі позаагрегатної обробки особливу актуальність набуває удосконалення процесів випуску розплаву з конвертера. Зокрема, оптимізація умов формування газорідинного потоку у випускному каналі розглядається як один із перспективних напрямів для забезпечення стабільного та ефективного технологічного процесу.

Розробка нових технічних рішень спрямована на досягнення декількох цілей: покращення процесу відсічки шлаку, зменшення впливу атмосферного кисню на розплав, а також створення умов для реалізації розкислення розплаву безпосередньо під час випуску плавки. Одним із резервів інтенсифікації цих процесів є використання потенційної енергії розплаву, який надходить до ковша з висоти 5–8 м, сприяючи перемішуванню та диспергуванню компонентів [1].

Для дослідження умов формування газорідинного потоку було створено модель у вигляді плоскої льотки — аналога циліндричного випускного каналу з розташованими співвісно соплами. Ключовими змінними параметрами дослідження виступали витрата газу (q) та рівень рідини (H) у конвертері. Основним критерієм аналізу обрано відносну глибину вирви (K_v), що визначається як відношення глибини вирви (Δi) до діаметра випускного каналу [2].

Дослідження показали, що при високій витраті газу ($q \geq 0,1 \text{ м}^3/\text{хв}$) K_v стабілізується в межах 0,03–0,09, а вплив рівня рідини є незначним. Потік характеризується стабільною, помірно розвиненою міжфазною поверхнею. Зі зниженням витрати газу до $q \leq 0,05 \text{ м}^3/\text{хв}$ і зменшенням H до 0,25–0,60 м, K_v зростає до 0,22–0,65. Це свідчить про дестабілізацію потоку, зростання глибини вирви та зменшення ступеню організації потоку.

На базі отриманих даних розроблено класифікацію режимів формування потоку, яка враховує динамічні зміни рівня рідини — на відміну від попередніх підходів, що базувалися на сталих геометричних параметрах сопел.

Класифікація режимів за критерієм відносної глибини вирви (K_v) [2]:

- **режим І:** при $K_v > 0,5$ інтенсивного перемішування газу з рідиною не відбувається.
- **режим ІІ:** при $0,5 > K_v > 0$ збільшення витрати газу або зниження рівня рідини сприяє зменшенню глибини вирви, що сприяє інтенсивному перемішуванню газу з рідиною. У цьому режимі формується газорідинний потік із розвиненою міжфазною поверхнею та високим ступенем організації.
- **режим ІІІ:** при $K_v < 0$ подальше збільшення витрати газу або зменшення рівня рідини спричиняє центральний пробій газу та перехід газорідинного потоку до дисперсно-кільцевого режиму («режим пробою»). Цей режим характеризується збільшенням кута розкриття відкритої частини потоку.

Літературні джерела

1. Похвалітий А. А., Сігарьов Є. М., Чубін К. І., Полетаєв В. П., Похваліта О. В. Формування газометалевого потоку в умовах «хімічного» вакууму у сталевипускному каналі. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2019. № 34. С. 3–8. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.34.2019.1>
2. Вовк А. О., Похвалітий А. А. Дослідження умов формування газорідинного потоку при випуску плавки з конвертера. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 49. С. 200–207. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.45.2024.1>

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ БЛОКОВОГО ПАЛЬНИКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ПОВІТРЯ

А. І. Губарєва, І. М. Кошляк, Р. М. Руденко, Є. М. Сігарьов, д.т.н., М. Р. Руденко, к.т.н.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Ефективність процесу запалювання агломераційної шихти суттєво впливає на якість готового агломерату, рівномірність структури спека, продуктивність агломераційної машини та енергетичні витрати. Традиційні конструкції пальників запалювальних горнів забезпечують лише часткове регулювання теплового потоку, що призводить до локальних перегрівів і зон неповного прогріву. Унаслідок цього спостерігається нерівномірне горіння, нестабільність фронту запалювання, коливання температури шару та збільшення викидів оксидів азоту.

Проблема ускладнюється тим, що шар агломераційної шихти є неоднорідним за гранулометричним складом, вологістю та газопроникністю, а отже, потребує диференційованого теплопідведення. Це обґрунтовує необхідність створення нового типу пальника з незалежним керуванням потоками повітря і палива по ширині запалювального горна.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу запалювання агломераційної шихти шляхом удосконалення конструкції газового пальника з роздільною подачею первинного та вторинного повітря, що дозволяє регулювати співвідношення конвективної й променистої складових теплопередачі та стабілізувати теплове поле в зоні запалювання.

Запропонований пальник має модульну будову: він складається з декількох вузьких секцій, об'єднаних у загальний блок. Кожен модуль оснащено окремими каналами подачі газу, первинного й вторинного повітря, а також регулювальними заслінками, що дозволяють змінювати співвідношення потоків. Первинне повітря подається у зону стабілізації факела для підтримання стійкого горіння, а вторинне — у кінцеву частину факела для ступінчастого догорання газів, регулювання температури полум'я та формування необхідного окислювального потенціалу димових газів над шаром агломераційної шихти.

Розрахункове моделювання показало, що при роздільній подачі повітря можна досягти більш повного згоряння палива та підвищення температури у зоні запалювання на 60–80 °С при тій самій витраті газу. Експериментальні дослідження підтвердили вирівнювання температурного профілю по ширині горна до $\pm 10\%$, скорочення часу запалювання на 10 %, зниження питомих витрат газу на 6–10 % і зменшення викидів NO_x до 30 %.

Розроблена конструкція пальника сумісна зі стандартними запалювальними горнами типу АКМ-75 без потреби модифікації корпусу. Модульність забезпечує просте масштабування для агрегатів іншої ширини, а роздільна подача повітря дозволяє адаптувати режими нагріву під поточний склад і стан шихти. У перспективі передбачається впровадження автоматизованої системи керування подачею повітря за температурними сигналами, що дасть змогу підтримувати стабільний профіль факела в реальному часі.

ВПЛИВ ІНТЕНСИВНОСТІ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І РАДІАЛЬНИЙ ГАЗОРОЗПОДІЛ СТОВПА ШИХТИ

Г. Ю. Крячко, к.т.н., Є. М. Сігарьов, д.т.н., М. Р. Руденко, к.т.н., С. А. Холодний

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Наведено результати дослідження впливу інтенсивності плавки на формування структури стовпа шихти. В ході роботи співставили результати досліджень структури стовпа шихти заморожених на ходу японських доменних печей №1 заводу Амагасакі [1] і №1 Хірохата [2]. Для вивчення зв'язку інтенсивності плавки з газорозподілом і газопроникністю стовпа шихти в перетині доменних печей використали показники роботи ДП №8 Дніпровського металургійного комбінату (ДМК) об'ємом 1754 м³, яка в 1979 р. працювала з номінальною підвищеною інтенсивністю, а в 1997 р. відповідно до надходження замовлень – зі зниженою.

На основі аналізу стану стовпа шихти заморожених на ходу доменних печей [1, 2], що працювали з різним рівнем інтенсивності плавки, показано зміни в структурі стовпа, викликані зростанням інтенсифікації процесу. Це зростання призводить до збільшення висоти надфурменної частини коксової насадки і її загального об'єму. При цьому збільшується кількість коксових вікон в пластичній зоні і відповідно зростає газопроникність зони. Крім того, інтенсифікація зменшує або усуває окружну нерівномірність у формуванні зон когезії і коксової насадки.

Газорозподіл оцінювали двома показниками – нерівномірністю розподілу концентрацій CO₂ в газі по радіусу печі V_p і ступенем периферійності розподілу CO_{2п}/CO_{2ц}. Стійкість радіального газорозподілу оцінювали за величиною розмаху коливань концентрацій CO₂ в газі в окремих точках радіусу шахти за весь період розгляду.

Порівняння характерних періодів роботи печі об'ємом 1754 м³ дозволило встановити, що перевищення рівня інтенсивності плавки з 0,650 до 1,009 т/м³·доб викликало наступні зміни в радіальному газорозподілі: нерівномірність його за показником коефіцієнта варіації концентрацій CO₂ зросла в середньому з 21 до 30%, а ступінь підвантаження периферії за критерієм CO_{2п}/CO_{2ц} зменшилась з 0,89 до 0,65. Показано, що інтенсифікація процесу дуттям на досліджуваній печі супроводжувалась не тільки збільшенням нерівномірності радіального газорозподілу, але і зростанням його нестійкості, обумовленої коливанням газопроникності окремих зон доменної печі. Найбільший розмах концентрацій CO₂ в радіальному газі мав місце на периферії при витратах дуття 1,37-1,48 м³/м³·хв, найменший - в гребені при 1,48-1,60 м³/м³·хв дуття.

На відміну від існуючого уявлення про те, що підвищення інтенсивності плавки сприяє вирівнюванню радіального газорозподілу, показана залежність форсування ходу від розкриття периферійно-осьових зон на череповецькій печі об'ємом 2000 м³ (зростання інтенсивності за спаленням коксом на 9%) і на магнітогорській печі об'ємом 1300 м³ від розкриття периферійної зони (зростання на 8%).

Співставлення результатів дослідження, отриманих на ДП №8 ДМК, з даними стосовно газорозподілу трьох інших доменних печей різних підприємств показало, що у випадку існування відносно незмінних сировинних умов інтенсифікація доменного процесу за будь-яким індексом відбувається за рахунок розкриття периферійно-осьових віддушин, розміри яких в перетині визначають теплову і відновлювальну роботу газового потоку та ефективність доменної плавки в цілому.

Літературні джерела

1. Narita K., Sato T., Maekawa M., Fukihara S., Kanayama H., Sasahara S. Report on the analysis of the contents of Blast Furnace No. 1 of the Amagasaki Plant (1980). *Tetsu to Hagane*, 13, 1975–1984.
2. Gudenau H.-W., Sasabe M., Kraibikh K. (1977). Research on cooled furnaces in Japan, *Ferrous Metals*, 6–7, 13–17.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СХЕМИ УКЛАДАННЯ НА РІВНОМІРНІСТЬ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗОРУДНОГО ШТАБЕЛЯ

І. В. Мізіна, Р. С. Абдулкін, Р. М. Руденко, Є. М. Сігарьов, д.т.н., М. Р. Руденко, к.т.н.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Стабільність складу залізорудної сировини при формуванні штабеля визначає якість агломерату та ефективність подальших металургійних процесів. Під час насипання руд, концентратів, флюсів та інших компонентів у штабель відбувається сегрегація частинок за крупністю, густиною та формою, що призводить до утворення зон неоднорідності. Для зменшення таких відхилень доцільно враховувати вплив схеми укладання матеріалу на процес усереднення та рівномірність складу.

Метою роботи є аналіз впливу схеми укладання сипких матеріалів на рівномірність розподілу компонентів у штабелі залізорудної сировини. Дослідження виконано з використанням геометричної моделі, яка описує рух частинок по схилу насипу під час формування штабеля. Розглянуто дві схеми укладання — симетричну та односторонню. В аналітичній моделі враховано висоту штабеля H , кут природного укосу φ та параметри руху частинок, що визначають довжину ковзання і положення шару після осідання.

Розрахунки показали, що при симетричній схемі сумарна довжина траєкторії руху частинок приблизно вдвічі більша, ніж при односторонній, що спричинює формування більш виражених міжшарових зон неоднорідності. При односторонньому укладанні відбувається ущільнення структури насипу, скорочення пустот і більш рівномірний розподіл компонентів. Ефективність усереднення оцінювалась за коефіцієнтом варіації $CV(Fe)$, який характеризує відхилення концентрації заліза у шарах штабеля. Перехід до односторонньої схеми укладання дозволив знизити $CV(Fe)$ з 5,2 % до 3,4 %, що відповідає підвищенню рівномірності хімічного складу приблизно на 35 %.

Промислова перевірка моделі виконана в умовах металургійного підприємства. Отримані результати експериментальних вимірювань показали відхилення розрахункових даних від фактичних у межах $\pm 0,6$ %, що підтверджує адекватність моделі. У порівнянні з класичними підходами (Watanabe, Arima) розроблена модель точніше відображає вплив геометрії укладання на ступінь усереднення та є зручною для практичного застосування.

Отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо оптимізації параметрів штабелювання та підвищення стабільності складу агломераційної шихти на металургійних підприємствах України.

Літературні джерела

1. Arima T., Sato M., Watanabe K. Formation process and characteristics of iron ore raw material stockpiles. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39(9). P. 915–922.
2. Pang J., Li G., Wang H. Segregation behavior of particles during heap forming in bulk storage piles. *Advanced Powder Technology*. 2015. Vol. 26(1). P. 124–131.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УСЕРЕДНЕННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ШИХТИ ПРИ ФОРМУВАННІ ШТАБЕЛЯ

**Р. М. Руденко, Є. М. Сігарьов, д.т.н., М. Р. Руденко, к.т.н.,
М. А. Кашесв, к.т.н., О. А. Чубіна, к.т.н.**

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

У сучасному агломераційному виробництві стабільність хімічного складу шихти визначає якість готового агломерату, рівень продуктивності агломераційних машин і сталість доменного процесу. Значні відхилення у вмісті Fe , SiO_2 , CaO , MgO та інших компонентів у вихідних матеріалах формують нерівномірність по шарах штабеля, що в подальшому відбивається на змінності складу агломерату. Тому процес усереднення сировини при формуванні штабелів є ключовою ланкою системи підготовки шихти.

У даній роботі виконано аналітичне дослідження процесу укладання залізорудних матеріалів при формуванні штабеля з використанням геометричної моделі, яка описує траєкторію руху сипких частинок по схилу насипу. Модель враховує висоту штабеля H , кут природного укосу φ , відстань між точками скидання матеріалу та схему укладання — симетричну або односторонню. Для кожної схеми визначено довжину шляху ковзання частинок і об'єм міжшарових зон, у яких відбувається часткова сегрегація компонентів за крупністю та густиною.

Порівняльні розрахунки показали, що при симетричній схемі сумарна довжина шляху руху частинок становить близько $33 \cdot t$, тоді як при односторонній — лише $(16-17) \cdot t$, що вдвічі зменшує товщину міжшарових прошарків. Це забезпечує щільніше укладання матеріалу, скорочення об'єму пустот і більш рівномірний розподіл частинок різних фракцій. Для оцінки ступеня усереднення використано показник варіації концентрації основного компонента σ , який характеризує відхилення хімічного складу між шарами штабеля.

Встановлено, що при односторонньому формуванні штабеля середнє значення σ зменшується на 12–15 % порівняно з традиційною схемою, що підтверджує ефективність даного підходу. Запропонована модель дозволяє визначати вплив геометрії штабеля на процеси перемішування та прогнозувати рівень хімічної однорідності шихти ще на етапі складування. Отримані результати можуть бути використані при розробленні рекомендацій з оптимізації конструкції стрічкових перевантажувачів і режимів формування штабелів для агломераційних фабрик.

Літературні джерела

1. Watanabe K. Study on the formation and characteristics of iron ore stockpiles. *ISIJ International*. 1986. Vol. 26(2). P. 131–138.
2. Arima T., Sato M., Watanabe K. Formation process and characteristics of iron ore raw material stockpiles. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44(9). P. 1467–1473.

ОБҐРУНТУВАННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ ФЕРОНІКЕЛЮ З ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ

Є. М. Сігарьов, д.т.н., С. В. Семірягін, к.т.н., А. А. Похвалітий, к.т.н.,
Д. С. Кондрашенков

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Наведено результати досліджень особливостей переплаву сировини, що містить нікель (крупністю 1-20+ мм) із забезпеченням максимізації вмісту Ni в отриманих сплавах. До завдань віднесли перевірку доцільності попередньої підготовки вихідної сировини (класифікації за розмірами зразків, використання суміші зразків різного фракційного складу), визначення раціональних температурних умов переплаву, складу газового середовища і типу відновників для отримання металевих зливків, вивчення характеру шлакоутворення і впливу основності шлаку на вихід придатного.

Методика досліджень – прямий високотемпературний експеримент з контролем температури у робочому просторі печі Таммана, регулюванням потужності печі за заданим алгоритмом та з відеофіксацією поведінки поверхні ванни.

Для переплавлення зразків сировини, що містили, %: 80-82 Fe, 14-17 Ni, 0,8-1,0 Si, 1,7-1,1 Cr, 0,07-0,12 Mn, і отримання металевого сплаву який за складом відповідає ФН-20Р (ТУ У 27.3-31076956-010:2011), використали піч Таммана. За результатами виконаних термодинамічних розрахунків для системи NiO-Fe-C доцільним вважали використання у якості активних відновників C (графітового тигля), Si (з FeSi75) та Al.

З метою оцінки впливу крупності зразків сировини на вихід металевого сплаву було виділено три фракції: 0-10 мм; 10-20 мм та 20+ мм. Кожну з наважок фракцій сировини завантажували у графітовий тигель і розміщали у робочому просторі печі Таммана. Створення відновного оточуючого середовища у робочому просторі печі Таммана та графітова вогнетривка пробка забезпечували захист металевого розплаву від прямого окиснення киснем навколишнього середовища, попереджали накопичення FeO та MnO в шлаку.

Тривалість витримки розплавів у тиглях в температурному діапазоні 1510-1540 °C зі створенням умов турбулентного перемішування складала в середньому 30 хв.

Встановлено, що для отримання феросплаву, що містить Fe (77-83 %) та Ni (13,4-20,0 %) шляхом переплаву вихідної сировини у відновних умовах, операції попередньої підготовки сировини (класифікацією та/або додатковим подрібненням) є недоцільними. Так, в умовах проведених досліджень, при використанні зразків сировини фракції «20+ мм» вміст Ni у отриманих сплавах виявився на 44,7% більше ніж зі зразків фракції «0-10 мм».

Оцінили і доцільність використання FeSi75 у якості відновника. Незважаючи на очікуване зростання вмісту Ni при використанні FeSi, вихід металевих сплавів на основі Fe та Ni склав від 56 до 62% від вихідної маси сировини, а при використанні FeSi 39,64% відповідно при вмісті Ni у сплаві 4,3%. Втрати сировини внаслідок переплаву склали від 3,0 до 5,9% від вихідної маси.

У зв'язку з доцільністю забезпечення підвищеної в'язкості сформованих по ходу переплаву шлаків доцільним можна вважати використання модифікаторів складу шлаку, наприклад Al₂O₃ для зменшення розчинності NiO, при забезпеченні основності шлаків (CaO/SiO₂) на рівні 0,9-1,1 з метою мінімального розчинення Ni та MgO (8-12%) – для стабілізації структури шлаку.

Літературні джерела

1. Феронікель. Технічні умови. ТУ У 27.3-31076956-010:2011. ВАТ «Побужський феронікелевий комбінат». 2011. 28 с.

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф., С. В. Іванніков¹

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Відомо, що 19% металургійних компаній систематично застосовують штучний інтелект для перетворення своїх процесів, 31% використовують дані разом зі штучним інтелектом для досягнення експоненціального зростання, 37% переосмислюють взаємодію людей і машин [1]. Розглядаючи внесок ШІ в екологічну стійкість слід відмітити: зниження витрат енергії, сировини та викидів шкідливих речовин; оптимізацію процесів для більш ефективного використання ресурсів; підтримки сталого та екологічно чистого виробництва [2]. Вплив штучного інтелекту на управління ланцюгом поставок дуже великий. Системи ШІ можуть оптимізувати управління запасами, прогнозувати коливання попиту та оптимізувати логістичні операції. Аналізуючи дані в режимі реального часу, штучний інтелект може виявити потенційні збої та запропонувати проактивні заходи для пом'якшення ризиків, забезпечуючи плавну та стійку систему поставок. Ця здатність не тільки підвищує ефективність, але й сприяє стійкості за рахунок зменшення відходів і покращення використання ресурсів [3].

Згідно даним [4] є 10 способів використання ШІ в сталеливарній промисловості: прогнозоване обслуговування; оптимізація процесу; контроль якості та виявлення дефектів; управління ланцюгом поставок; енергоефективність та стійкий розвиток; планування виробництва та управління персоналом; розробка та конфігурація продукту; покращення безпеки; аналіз ринку та стратегії ціноутворення; дослідження та розробки.

Таким чином, штучний інтелект є фактором революційних змін у металургійній промисловості, який дозволяє забезпечувати підвищення продуктивності та якості металопродукції, енергоефективності та сталого розвитку, водночас трансформуючи робочу силу і процеси прийняття рішень у галузі. Основними джерелами застосування штучного інтелекту в металургійній галузі є: прогнозоване обслуговування; оптимізація металургійного процесу; контроль якості металопродукції та виявлення дефектів та браку; управління ланцюгом поставок сировини та металопродукції; енергоефективність; планування виробничого процесу та управління персоналом; розробка нових видів металопродукції; покращення безпеки праці, аналіз ринку та стратегії ціноутворення та інші.

Літературні джерела

1. Як штучний інтелект застосовують у металургії. GMK center. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/yak-shtuchnij-intelekt-zastosovujut-u-metalurgii> (дата звернення: 05.08.2025).
2. Штучний інтелект у металургії: революція у виробництві. ТВК Пегас. URL: <https://stali.kiev.ua/shtuchnyy-intelekt-u-metalurhii-revoliutsiia-u-vyrobnytstvi> (дата звернення: 05.08.2025).
3. Чжан К. Роль штучного інтелекту у трансформації клієнтського досвіду та оптимізації ланцюгів постачання для глобального бізнесу. *InnovationandSustainability*. 2024. № 3. С. 45–52.
4. 10 ways AI is being used in the Steel Industry. Team DigitalDefynd. URL: <https://digitaldefynd.com/IQ/ai-in-the-steel-industry> (дата звернення: 05.08.2025).

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ G10 «МЕТАЛУРГІЯ»

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., **С. А. Воденніков²** д.т.н., проф., **С. А. Борсук¹**

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

На сьогодні такі розумні технології як штучний інтелект (ШІ), цифрові двійники, віртуальна та доповнена реальність, дозволяють оптимізувати освітній процес, підвищити його ефективність і зменшити затрати часу на навчання завдяки новому етапу автоматизації [1]. Серед викликів стосовно використання систем штучного інтелекту, з якими стикаються сучасні ЗВО, є: проблема етики, забезпечення конфіденційності та безпеки, недостатній рівень сформованості цифрової компетентності в аспекті ШІ, фрагментарність навчального й науково-методичного забезпечення впровадження ШІ в освітній процес [2].

Одним із потенційних напрямів використання ШІ як помічника викладача є відбір навчального матеріалу, оптимального до відповідної аудиторії, навчальної програми курсу, цікавим і корисним щодо майбутньої професії. Актуальності набувають мобільні додатки, що використовуються: як помічники у вивченні навчального матеріалу та його закріпленні; як аналітик у процесі збирання інформації під час виконання вправ у вирішенні питань, що викликають певні труднощі, помилки та значні витрати часу [3].

Штучний інтелект дозволяє оцінювати вирішення проблем у реальному часі та покращує процес оцінювання здобувачів вищої освіти. Наприклад, чат-боти пропонують здобувачам освіти персоналізований та інтерактивний досвід навчання, надаючи цілодобову підтримку та покращуючи доступність [4].

Наприклад, використання штучного інтелекту здобувачами вищої освіти, які навчаються за спеціальністю G10 «Металургія», дозволить удосконалити наступні напрями:

1. Оптимізувати металургійні процеси.
2. Провести контроль якості та виявлення дефектів металопродукції.
3. Провести прогнозування технічного обслуговування.
4. Проводити вибір матеріалів та проектування сплавів.

Таким чином, своєчасне впровадження інформаційних технологій в освітній процес ЗВО – це шлях до модернізації освіти, інновацій та підвищення конкурентоспроможності українських ЗВО на глобальній арені. Використання штучного інтелекту в освітньому процесі дасть змогу: викладачам генерувати та перевіряти тести, створювати презентації, аналізувати навчальні досягнення здобувачів вищої освіти та інше; здобувачам вищої освіти займатися пошуком інформації для наукових робіт, при підготовці до іспитів або заліків, генерації ідей для презентацій, отримання зворотного зв'язку на наукові роботи, вивчення мов; керівникам ЗВО оптимізувати адміністративні процеси (наприклад, заповнювати документацію, писати відповіді на запитання та інше).

Літературні джерела

1. Androniceanu A.-M., Georgescu I., Tvaronavičiene M., Androniceanu A. Canonical correlation analysis and a new composite index on digitalization and labor force in the context of the industrial revolution 4.0. *Sustainability (Switzerland)*. 2020. No. 12. <https://cutt.ly/zwDHrHzY>
2. Гриценчук О. Використання штучного інтелекту в освіті : тенденції та перспективи в Україні та за кордоном. *Вісник кафедри ЮНЕСКО «Неперервна професійна освіта ХХІ століття»*. 2024. Вип. 10. С. 152–161.
3. Використання штучного інтелекту в освіті / І. М. Візнюк та ін. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців : методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2021. Вип. 59. С. 14–21.
4. Arie Zilberman. Як ШІ впливає на систему освіти. URL: <https://www.facerua.com/iak-shi-vplivaie-na-sistemu-osviti> (дата звернення: 05.08.2025).

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВІСТІ УКРАЇНИ

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф., А. С. Карамзіна¹

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Відомо два основні шляхи застосування плавленого вапна та композицій на його основі в металургійній промисловості України:

– як основа твердих шлакоутворюючих сумішей (ТШС) для позапічної обробки рідких металевих розплавів;

– як тиглі вакуумних та відкритих індукційних печей; керамічні елементи футеровки кисневих конвертерів та дугових сталеплавильних печей, елементи проміжних ковшів установки безперервного лиття заготовок, елементи розливних стаканів сталерозливних кошів, елементи устрою для фільтрації рідких металевих розплавів.

В конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (зараз ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ») освоєно технологію обробки вуглецевої і низьколегованої спокійної сталей кусковою твердою шлакоутворювальною сумішшю, що складається зі свіжообпаленого металургійного вапна і сухого плавицевого шпату в співвідношенні 4:1 в процесі випуску плавки з конвертера в ківш ємністю 250 т. Обробка ТШС освоєна на сталях марок 20, 35, 09Г2, 16ХГ, 10ХС та ін. Витрата ТШС становила зазвичай 7 кг/т. Вміст сірки у металі перед випуском коливався в межах 0,025–0,050 %, у готовому металі 0,010–0,030 %. Ступінь десульфурації склала 182–315%.

На «Криворіжсталь» (зараз «АрселорМіттал Кривий Ріг») вуглецеву та низьколеговану сталь, виплавлену у 150 т конвертерах, обробляли у ковші шматками шлакоутворювальної суміші вапна та плавицевого шпату. Витрата шматкового вапна становив 2,3–7,8 кг/т сталі. Вихідний вміст сірки у металі під час випуску плавки становив 0,037%. Ступінь десульфурації сталі коливалася в межах 15–30%.

На ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»» (існував до 2022р.) розроблено та освоєно технологію десульфурації конвертерної сталі в ковші твердими шлакоутворюючими сумішами на основі офлюсованого вапна, що відрізняється від звичайного вапна підвищеним вмістом заліза – до 3,3 та меншою величиною втрат при прожарюванні – 1,54%. Офлюсоване вапно подавали в 350 т ківш трактом сипучих матеріалів. Одночасно в ківш вводили плавицевий шпат; при цьому співвідношення ТШС плавицевого шпату і вапна витримували 1:(3–4). Обробці піддавали низьколеговані сталі марок 13ГС, 16ГС та ряд рядових марок. На початку випуску плавки під струмінь сідали алюміній у зливках (0,4–0,5) кг/т сталі, через 20–30 сек. з початку випуску вводили ТШС до 8 кг/т.

Тиглі з плавленого вапна застосовуються також у промислових умовах ПАТ «Мотор Січ» у вакуумних індукційних печах при виплавці сплаву ЧС-70-ВІ. Застосування тиглів з плавленого вапна призводить до збільшення виходу придатних лопаток до 66–79% залежно від типу лопатки. При цьому відбувається помітне зменшення кількості виробів з поверхневими дефектами та шлаковими включеннями.

Позитивні результати має застосування ТШС на основі плавленого вапна в промислових умовах, зокрема в умовах ПАТ «Запоріжсталь» на мартенівській печі №5 при проведенні 500-тонної дослідної плавки конструкційної вуглецевої сталі марки 10СП з обробкою металу в ковші ТШС на основі вапна.

В умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» випробування ТШС на основі плавленого вапна відбувалися наступним чином:

– виплавка підшипникової сталі марок ШХ15 та ШХ15СГ проводиться в СПЦ-3 в 60-тонних дугових електросталеплавильних печах (ДСП) із позапічною обробкою ТШС. Вміст сірки у підшипникових сталях дослідних плавок становило 0,005–0,009%. Досягнута ступінь десульфурації металу 72–81% свідчить про високу рафінуючу здатність плавленого вапна;

– обробка нержавіючих сталей марок 12Х18Н10Т та 08Х18Н10Т плавленням вапном на установці аргонно-кисневого рафінування у СПЦ-2. Сталь виплавляли дуплекс-процесом (електропід-конвертер). Виплавку напівпродукту здійснювали у ДСП ємністю 50 т методом перепау легуваних відходів. Після коригування технології позапічної обробки нержавіючої сталі та вибору оптимальної кількості та складу ТШС на основі плавленого вапна вміст сірки в готовому металі може бути знижено до 0,005–0,007 %, а ступінь десульфурації доведено до 75–85 %.

ПРОМИСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ ТШС ІЗ ПЛАВЛЕНИМ ВАПНОМ У МАРТЕНІВСЬКОМУ ЦЕХУ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф.

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

В умовах ПАТ «Запоріжсталь» на мартенівській печі №5 проведено 500-тонну дослідну плавку конструкційної вуглецевої сталі марки 10СП з обробкою металу в ковші твердими шлакоутворюючими матеріалами (ТШС) на основі вапна. Попередньо плавлене вапно отримували в напівпромисловій трьохфазній електродуговій печі потужністю 140 кВА. Як вихідну шихту використовували металургійне вапно марки ІФ-1,2 (89,5–90,5% CaO, 0,930–1,1% MgO, 0,45–0,62% SiO₂, 0,860–0,92% Al₂O₃, 0,22–0,4% FeO, 0,28–0,35% C, 0,12–0,15% S, 0,009–0,012% P виробництва АТ «Запорізький завод феросплавів», одержуване у вапняно-пальновальній печі. Плавку вели на гарнісажі з приготовленої шихти завтовшки до 200 мм, що виключало контакт рідкого розплаву з магнезитової кладки днища та стін печі.

Виплавка сталі 10СП проводилася за технологічною інструкцією, що діє. Випуск металу здійснено у два ковші. На четвертій хвилині після початку випуску сталі в перший ківш були введені розкислювачі та алюміній, на шостій хвилині зроблена присадка 1200 кг твердої шлакоутворюючої суміші, що складається з 85% плавленого вапна та 15% плавикового шпату. Повний хімічний аналіз ТШС наступний: 82,5% CaO, 14,27% CaF₂, 0,2% MgO, 2,97% SiO₂, 0,19% Al₂O₃, 0,19% Fe, 0,021% C, 0,005% S.

Випуск металу в другий ківш проведено за чинною технологією. Загальний час випуску сталі з печі 22 хв. Протягом випуску плавки метал у ковшах продувався аргоном через шибєрний затвор.

Розливка сталі здійснювалася за діючою технологією: дослідна плавка з присадкою ТШС у виливниці типу 11Б, плавка без присадки ТШС у виливниці типу 1Б.

Результати хімічного аналізу проб металу, відібраних у ході плавки та розливки сталі 10СП наступні:

- після розплавлення: 0,75% C, 0,043% S;
- перед випуском з печі: 0,07% C, 0,18% Mn, 0,032% S;
- у ковші №1 після обробки ТШС: 0,1% C, 0,65% Mn, 0,24% Si, 0,019% S, 0,011% P, 0,08% Cr, 0,05% Ni, 0,01% Cu, 0,08% As;
- у ковші №2 без обробки: 0,09% C, 0,53% Mn, 0,21% Si, 0,027% S, 0,01% P, 0,08% Cr, 0,05% Ni, 0,09% Cu, 0,08% As;

Отже, маючи вихідний вміст сірки в металі перед випуском 0,032% отримуємо у ковші після обробки твердою шлакоутворювальною сумішшю вміст сірки 0,019%, а без обробки 0,027% S. Ступінь десульфурації склала відповідно 40 % та 19%. Переділ зливків відбувся за чинною технологією на лист 1,5 мм. Встановлено, що у листі з дослідного металу механічні властивості були вищими на 15–30 %.

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА ГУБЧАСТОГО ФЕРОВОЛЬФРАМУ У ВІТЧИЗНЯНІЙ МЕТАЛУРГІЇ

С. М. Григор'єв д.т.н. проф., Д. В. Яковлєв

Запорізький національний університет, Запоріжжя

Це дослідження представляє комплексну методологію оцінки економічної доцільності впровадження виробництва губчастого феровольфраму (ФВГ) у вітчизняній металургійній промисловості з використанням методів порошкової металургії. Запропонована технологія спрямована на оптимізацію споживання ресурсів та енергії шляхом заміни дорогих відновлювальних агентів, таких як порошки кремнію та алюмінію, вуглецевісними відходами та спрощення процесу плавлення. Використання ФВГ як легуючої добавки при виплавці швидкорізальної сталі значно покращує ефективність легування, зменшуючи час розчинення вольфраму, знижуючи втрати інших легуючих елементів та підвищуючи продуктивність печі. У статті викладено детальну модель економічного розрахунку, яка враховує економію коштів за рахунок зниження споживання матеріалів та енергії, покращення виходу та підвищення коефіцієнта поглинання вольфраму (у 5–7 разів вище, ніж у традиційного феровольфраму). Економічний ефект був продемонстрований на прикладах виплавки сталі Р6М5 з використанням губчастого феровольфраму в електродугових печах. Результати підтверджують використання ФВГ як економічно ефективної та технологічно просунутої альтернативи традиційним феросплавам, що має великий потенціал для ширшого промислового застосування, на основі даних Лондонської біржі металів (LME).

Розроблено технологію отримання та використання губчастого феровольфраму методом порошкової металургії, яка відрізняється від традиційних феросплавів на основі вольфраму методом термічного плавлення металу гнучкістю та економічністю. Метод розроблений для використання відносно дешевих та поширених відновлювачів та отримання продукту з якісно новими технологічними властивостями: швидкість поглинання вольфраму в розплавленій сталі в 5–7 разів вища, ніж у стандартного аналога. Це дозволяє зменшити вигорання інших елементів з розплавленої сталі на 4–7% (молібден, хром, ванадій). Метод розрахунку економічної ефективності використання нового легуючого матеріалу дає можливість провести розрахунок у будь-який час за наявності даних біржі LME. Губчастий феровольфрам як легуюча добавка вольфраму при виплавці швидкорізальних сталей у дуговій печі за цінами Лондонської фондової біржі підтверджує високу ефективність та перспективи розширення сфери впровадження [1–4].

Літературні джерела

1. Григор'єв С.М., Карпуніна М.С., Москаленко А.С. та ін. Термодинамічний аналіз та математичне моделювання стосовно технології отримання губчастого вольфраму. *Сталь*. 1999. № 11. С. 33–36.
2. Григор'єв С.М., Карпуніна М.С., Москаленко А.С. та ін. Математична модель термодинамічної рівноваги в системі W–O–C стосовно технології отримання губчастого вольфраму. *Сталь*. 1999. № 12. С. 31–34.
3. Григор'єв С.М., Григор'єв Д.С. Відновлення домішок у металізованому вольфрамовому концентраті. *Сталь*. 2002. № 10. С. 43–46.
4. Григор'єв С.М. Економічна стратегія та тактика ресурсо- та енергозбереження в металургії вогнетривких матеріалів. *СБ. "Металургія"* Вип. 1 Запоріжжя: ЗГІА, 1988. С. 17–23.

Електрометалургія

УДК 669.187.2.036.61

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф., Ю. О. Дубасов¹

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Властивості електродів в значній мірі визначаються властивостями шлаку, одержуваного з шлакоутворюючої основи покриття електродів. При цьому електрод повинен забезпечувати:

- легке запалення і стійке горіння зварювальної дуги;
- рівномірне розплавлення покриття електрода;
- рівномірне покриття шва шлаком і легке його видалення після зварювання;
- відсутність в металі шва тріщин, пор, непроварів.

Основними характеристики електродів є механічні властивості шва і зварного з'єднання: тимчасовий опір розриву; відносне подовження, ударна в'язкість; кут вигину.

Стійкість електродів залежить від багатьох факторів:

1. Матеріалу електрода.

Вирішальне значення має вибір матеріалу електрода (мідь, вольфрам, графіт, різні сплави): наприклад, вольфрамові електроди для TIG-зварювання, є неплавкими і мають високу термічну стійкість, а металеві зварювальні електроди плавляться в процесі роботи.

2. Умов експлуатації:

– високі температури можуть призвести до окислення, деформації або випаровування матеріалу електрода;

– вплив корозійних речовин (кислот, лугів, солей) або вологи може швидко погіршити стан електрода, особливо його покриття;

– сила струму, напруга та полярність можуть впливати на швидкість зносу або ерозії електрода.

3. Конструкції та якості виготовлення.

Однорідність матеріалу, якість покриття (для зварювальних електродів) та правильна геометрія кінчика впливають на стабільність процесу та термін служби.

4. Технологічного процесу.

Умови зварювання (наприклад, товщина матеріалу, положення шва) або параметри електролізу також відіграють роль.

Для підвищення стійкості електродів застосовуються різні методи:

– правильний вибір матеріалу (використання спеціалізованих електродів, розроблених для конкретних умов (наприклад, жаростійкі компоненти, мідь з домішками для точкового зварювання));

– термічна обробка та сушіння (зварювальні електроди чутливі до вологи. Їхнє попереднє просушування в печі при рекомендованій температурі (наприклад, 70–150°C) значно покращує їхні характеристики та запобігає проблемам, як-от прилипання);

– оптимізація параметрів процесу (дотримання рекомендованих виробником діапазонів струму та напруги);

– захист від зовнішнього впливу (використання захисних газів під час зварювання або зберігання електродів у сухих умовах).

Стійкість електродів до сталі залежить від їх маркування:

– для легованих сталей використовують електроди з маркуванням «Е» та цифровими позначеннями, що вказують на міцність (наприклад, 38, 42, 46, 50, 55, 60, 70, 85, 100, 125, 150). Літера «А» після цифри (наприклад, 42А, 46А, 50А) означає, що зварний шов матиме підвищену пластичність та ударну в'язкість.

– для термостійких сталей використовують електроди з умовними позначеннями Е-09 та Е-10 (далі можуть йти додаткові індекси, як-от М, МХ).

Технології позапічної обробки чавуну та сталі

УДК 669.046.669

РОЗВИТОК І НАПОВНЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ "ПОЗАПІЧНА ОБРОБКА ЧАВУНУ"

В. Г. Кисляков^{1,2} к.т.н., Д. М. Тогобицька¹ д.т.н., проф., В. П. Петруша¹,
Ю. М. Ліхачов¹, Н. Є. Ходотова¹

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український Державний Університет науки і технологій, м. Дніпро

Сучасне виробництво сталі характеризується зростанням обсягів виплавки сталей з низьким вмістом неметалевих включень. Позапічне рафінування чавуну широко використовується для забезпечення конвертерного переробу чавуном заданої якості, що забезпечує суттєве зниження витрат на виробництво високоякісної металопродукції [1]. Поповнення бази даних інформацією про технології не тільки десульфуратії чавуну [2], а й комплексного видалення домішок дасть змогу одержати описові моделі для зазначених технологій і стати основою для алгоритмічного забезпечення аналітичного блоку експертної системи для обраної технології рафінування чавуну. База даних з позапічного оброблення чавуну "ПОЧ" є повнотекстовою формою організації документально-фактографічної бази даних і дає можливість забезпечити тематичний пошук за певною проблемою або певним питанням, що регламентується відповідним запитом, забезпеченим гнучким інтерфейсом [3]. Набуло розвитку програмне забезпечення інформаційно-пошукової системи, зокрема було розроблено програмний модуль автоматизованої процедури поповнення форматизованих за спеціальним шаблоном машинних паспортів з архіву технологічної інформації Користувача в середовищі Excel. Одержало розвиток поповнення інформаційної системи позапічної обробки чавуну "ПОЧ" показниками комплексної обробки чавуну (видалення домішок сірки, кремнію та фосфору) як власними лабораторними експериментальними даними, так і даними зарубіжних технологій. Виконана обробка фактичних даних, що характеризують процес комплексної обробки чавуну сумішшю реагентів $\text{CaO-CaF}_2\text{-FeO}$, дала можливість розширити концепцію існуючої експертної системи «Позапічна обробка чавуну». Модельний модуль аналітичної системи повинен в якості складових мати інтелектуальне ядро генерації комплексних показників хімічного складу системи шлак-метал-газ та технологічних параметрів обробок. Опрацьовано архітектуру модельної системи для експертної оцінки технології комплексного рафінування чавуну.

Літературні джерела

1. Шевченко А. П., Маначин І. А., Вергун О. С. *Позапічна десульфуратія чавуну в ковшах. Технологія. Дослідження. Аналіз. Удосконалення*. Дніпропетровськ : «Дніпро VAI». 2017. 252 с.
2. Тогобицькая Д. Н., Вергун А. С., Молчанов Л. С., Кисляков В. Г., Ліхачев Ю. М., Ходотова Н. Е. Подсистема «Внепечная обработка чугуна» в решении задач выбора рациональной технологии получения качественной металлопродукции в сложившихся сырьевых и технологических условиях. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2019. Вып.33. С. 3–32. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-105-115>
3. Жмойдин Г. И., Приходько Э. В., Тогобицькая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Ліхачев Ю. М. О паспортизации экспериментальных материалов для банка данных «Металлургия». *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1988. № 8. С. 136–139.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСВОЄННЯ МАГНІЮ У ПРОЦЕСАХ ПОЗАПІЧНОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ

І. О. Маначин^{1,2}, к.т.н., ст.д., В. Г. Кисляков^{1,2}, к.т.н., М. О. Рибальченко², к.т.н., доц,
В. П. Петруша¹, С. О. Почитаєв¹

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український Державний Університет науки і технологій, м. Дніпро

Позапічна десульфуріяція чавуну стала необхідною та надійною ланкою між доменним та сталеплавильним виробництвом при виробництві якісної металопродукції. Оцінка ефективності видалення сірки з чавуну визначає якість технології знесірчення в цілому, забезпечуючи якісне й повне видалення сірки з розплаву. Найбільшого поширення у практиці позапічного знесірчення чавуну знайшов реагент – магній, що має унікальні властивості взаємодії з розплавом чавуну. Проведено порівняльний аналіз різних технологічних показників за різними технологіями вдування магнію у розплав чавуну. Найменші питомі витрати реагенту при моноінжекції магнію зумовлюють найменші витрати при промисловому освоєнні цього процесу. Фактичні показники промислових продувок свідчать про те, що моноінжекція зернистого магнію характеризується найменшими витратами реагентів — у середньому 0,42–0,55 кг/т чавуну, найменшою тривалістю операції десульфурії — у середньому 5,5–7,7 хв, забезпеченням надглибокої десульфурії чавуну — до 0,0003–0,001 %, ступенем десульфурії — до 99 %, високою інтенсивністю видалення сірки — у середньому 12–14,4 %/хв, високим ступенем засвоєння реагенту — у середньому 75–92 %. Зроблений висновок, що моноінжекція зернистого магнію є пріоритетним і найбільш економічним процесом позапічної десульфурії чавуну, перевершуючи інші технології знесірчення за багатьма показниками.

Літературні джерела

1. Voronova, N. A. (1983). *Desulfurization of Hot Metal by Magnesium*. Publisher Iron & Steel Society, 1983.
2. Shevchenko A. F., Bashmakov A. M., Vergun A. S., Manachin I. A., Kislyakov V. G., Trotsenko É. A. et al. (2019). Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium. *Metallurgist*, 62, 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>
3. Шевченко А. Ф., Маначин И. А., Шевченко А. М., Двоскин Б. В., Вергун А. С., Шевченко С. А. и др. Сопоставительный анализ технико-экономических показателей различных процессов внепечной десульфурации чугуна. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2013. Вып. 27. С. 97–110.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ПОТОКІВ У НАКОНЕЧНИКУ ЗАГЛИБНОЇ ФУРМИ

Д. В. Єськов, Є. М. Сігарьов д.т.н., М. Р. Руденко, к.т.н., Р. Д. Павлюк

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Наведено результати досліджень газодинаміки одно- і двофазних потоків у робочому просторі Т-подібного наконечника заглибної фурми для умов УДЧ ПрАТ «Камет-Сталь». Використані методики фізичного та математичного моделювання нестационарного режиму транспортування потоків у системі «труба-робочий простір наконечника-сопла» з використанням програмного комплексу SolidWorks. Застосовано метод скінченних об'ємів (FVM) з розбиттям геометрії моделі на сітку з об'ємними елементами, у межах яких розв'язуються рівняння Нав'є-Стокса для моделювання руху газу.

Розрахунки фактичного пилового навантаження газопорошкового потоку для умов вдування суміші десульфураторів на УДЧ ПрАТ «Камет-Сталь» виконані за методикою М.Я. Меджибожського. Встановлено, що фактичне пилове навантаження ($Fr' > 2500$) в цілому відповідає критичній густині потоку. При закупорюванні одного із сопел наконечника або зменшенні питомих витрат газу-носія ФПН суттєво змінюється. Запобігання умов перевищення ФПН критичної густини потоку може сприяти збільшення витрат газу-носія з 40-50 до 80-100 нм³/год або підвищення тиску газу перед фурмою.

Досліджено вплив конфігурації робочого простору (РП) наконечника на кут розкриття та довжину утвореного газопорошкового струменя, зміну швидкості руху газу, розподіл швидкостей у соплі за його перетином. З метою зміни конфігурації РП при моделюванні використали різні форми днища наконечника. Встановлені особливості переміщення суміші гранульованого магнію та порошкоподібного вапна різних фракцій у робочому просторі наконечника, ступінь наповненості частинками горизонтальної ділянки сопла та закономірності формування потоків на виході із сопел. Показано, що для частинок реагентів розміром більше 400 нм параметр швидкості є визначальним. Для частинок менш ніж 100 нм доцільно застосовувати додаткові заходи для подрібнення утворених агломерацій, наприклад за рахунок використання обертових конструкцій заглибних фурм.

Зміна форми днища наконечника призводить до змін у зоні відбивання газового, і особливо газопорошкового потоків з крупними частинками, від днища та впливає на розподіл швидкості потоків у соплах. Встановлено, що при відбитті частинок від днища наконечника під визначеним кутом забезпечується більш рівномірний розподіл швидкості за перетином сопла із відповідним збільшенням швидкості потоку та збільшенням кута розосередження частинок на виході у ванну. В умовах непружного удару об металеве днище наконечника з коефіцієнтом відновлення $\approx 0,5$ частинки магнію зберігають лише до 25% кінетичної енергії (E_k) по нормалі, але спроможні зберігати повну енергію по дотичній. Так, при ударі о стінку днища у формі конусу під кутом 60 град частинками втрачається 41% E_k , але вони перенаправляються переважно у центральну частину сопла, що є запобіжником для закупорювання [1].

У ході чисельного моделювання досліджено розподіл за перетином і зміну швидкості газових потоків в умовах коливання тиску газу-носія та тиску у розплаві перед соплами наконечника в залежності від глибини ковшової ванни. Виконано порівняння з результатами фізичного моделювання. Підтверджена можливість більш ефективного прискорення потоку при зміні конфігурації робочого простору наконечника.

Літературні джерела

1. Єськов Д. В., Сігарьов Є. М. Параметри вдування реагентів та закупорювання Т-подібних наконечників фурм. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське : ДДТУ, 2024, №1 (44), С. 16–26.

Металознавство та термічна обробка сталі

УДК 669.14.018.292

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ШАРІВ WEL ТА BEL У СТАЛІ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС РІЗНОГО СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ В УМОВАХ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

О. І. Бабаченко¹ д.т.н., чл.-кор. НАН України, **Р. В. Подольський^{1,2}**, докт. філ.,
Г. А. Кононенко^{1,3}, д.т.н., ст. досл., **О. А. Сафронова¹**, **О. Л. Сафронов¹**, **Ж. А. Дементьєва¹**

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Інститут прикладних систем управління НАН України, м. Дніпро

³ Дніпровський технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

Розвиток залізничного транспорту в Україні набуває стратегічного значення в умовах воєнного стану та у період післявоєнного відновлення. Одним із критичних елементів безпечної експлуатації рухомого складу є колісна пара, зокрема обід колеса, який під час роботи зазнає інтенсивних термомеханічних навантажень. У результаті екстремального гальмування можуть формуватися дефекти теплового походження - так звані шари білого та коричневого травлення (WEL і BEL), що знижують ресурс колеса, спричиняють вищербини, повзуни й термотріщини.

Мета дослідження - експериментальне визначення впливу хімічного складу та способу виробництва сталі залізничних коліс на формування зон WEL і BEL під час гальмування юзом.

Для досліджень використано зразки з ободів суцільнокатаних та литих коліс класів С і В, а також сталі марки 2 з різним вмістом вуглецю (0,61–0,76 %) і твердістю (293–333 HB). Випробування проводили на спеціальному стенді, який моделює умови екстреного гальмування юзом при швидкості руху 100 км/год. Металографічні дослідження виконували на мікроскопах Carl Zeiss моделей «Neophot 32» і «Axiovert 200 M MAT» після травлення ніталем. Мікротвердість структурної складової визначали на мікротвердомірі LHVZ-1000 з навантаженням 50 г.

Результати вимірювань мікротвердості, а також металографічні дослідження, свідчать про те, що в поверхневих шарах досліджуваних зразків після гальмування на стенді утворилася слабо витравлювана область з підвищеною мікротвердістю і структурою високовуглецевого мартенситу (WEL), аналогічна тій, яка спостерігається в поверхневих шарах залізничних коліс з дефектами типу «вищербини». Установлено, що після випробувань у всіх зразках формується зона WEL з мартенситною структурою і твердістю до 8000 Н/мм². Для литих коліс характерна більша товщина WEL (4–4,3 мм), ніж для суцільнокатаних (2–3 мм), що пояснюється більшою хімічною неоднорідністю та дендритною ліквідацією у литих структурах. Виявлено наявність перехідної зони BEL з твердістю 3000–7200 Н/мм², що представлена високодисперсним перлітом. Зі збільшенням вмісту вуглецю товщина WEL також зростає: для сталі з 0,76 % С – близько 3 мм, для сталі з 0,61 % С – близько 2 мм.

Хімічний склад і спосіб виготовлення колеса суттєво впливають на схильність матеріалу до утворення термічних шарів WEL і BEL. Литі колеса є більш чутливими до теплових дефектів, тоді як суцільнокатані характеризуються підвищеною стійкістю завдяки більш рівномірній мікроструктурі. Отримані результати мають практичне значення для раціонального обґрунтування складу і технології виготовлення коліс із підвищеною стійкістю до дії термомеханічних навантажень та можуть бути використані при розробленні рекомендацій щодо продовження ресурсу залізничних коліс у важких експлуатаційних умовах.

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛІ 16Г2АФ У КОНСТРУКЦІЇ ЦИСТЕРНИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗРІДЖЕНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ

Д. І. Гузенко¹, Н. О. Ротт¹ к.т.н., доц., Г. А. Кононенко^{1,2} д.т.н., ст. досл.

¹ Дніпровський технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

² Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Транспортування та зберігання зріджених вуглеводневих газів вимагає спеціалізованих ємностей, здатних витримувати високий тиск і перепади температур. Безпечна експлуатація таких цистерн залежить від правильного вибору матеріалу корпусу та обґрунтованого проектування. У роботі проведено комплексне дослідження конструкції цистерни для зріджених газів та визначено оптимальні параметри її елементів із використанням методу скінченних елементів (МСЕ) у середовищі Autodesk Inventor 2024.

Об'єктом дослідження є цистерна-напівпричіп об'ємом 46 м³, призначена для транспортування пропан-бутанових сумішей. Розрахунки проводилися для робочого тиску 1,6 МПа та випробувального 2,1 МПа відповідно до вимог ДОПНВ [1]. Основним матеріалом корпусу обрано сталь 16Г2АФ, яка за властивостями близька до європейської сталі P460NL2 [2]. Вона характеризується високою міцністю (границя текучості ≥ 440 МПа, границя міцності ≥ 590 МПа), ударною в'язкістю та стійкістю до низьких температур до -60 °С. Мікролегування ванадієм та азотом забезпечує дрібнозернисту структуру, підвищену пластичність і опір крихкому руйнуванню [3, 4].

Проведено інженерний аналіз товщини стінки корпусу і днищ згідно з вимогами ДСТУ EN 12493:2019 [5]. Розрахункова товщина обичайки становить 8 мм, а днища – 10 мм. Виконані моделі конструкції з урахуванням зміцнювальних кілець та хвилерізів. Результати МСЕ-аналізу показали, що максимальні еквівалентні напруження за критерієм Мізеса становлять 375,3 МПа, що не перевищує допустимих значень. Мінімальний коефіцієнт запасу міцності для корпусу дорівнює 1,23, а для днища з отвором під люк – 1,14, що свідчить про відповідність конструкції вимогам міцності та безпеки.

Отримані результати підтверджують доцільність використання сталі 16Г2АФ для виготовлення ємностей, що працюють під тиском, а також демонструють ефективність застосування комп'ютерного моделювання для оптимізації конструкцій. Застосування МСЕ в процесі проектування дозволяє зменшити матеріалоємність, підвищити надійність та прогнозованість роботи обладнання в реальних умовах експлуатації.

Літературні джерела

1. Європейська Угода "Про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ)" 2025р.
2. ДСТУ EN 10028-3:2018 Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 3. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі (EN 10028-3:2017, IDT)
3. Metinvest-smc. Характеристика сталі 16Г2АФ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-16g2af/?srsId=AfmBOoov400Dk8DIDn9_VNr7AFzpxPID6acEzf0vTPVGoxFXIqqs0di (дата звернення: 11.10.2025)
4. ДСТУ 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови
5. ДСТУ EN 12493:2019 Устаткування та комплектування для зрідженого нафтового газу. Зварні сталеві баки для автоцистерн. Проектування та виготовлення (EN 12493:2013, IDT)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В СТАЛІ CrMoV1Si ЗА УМОВ БЕЗПЕРЕРВНОГО ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ З РІЗНИМИ ШВИДКОСТЯМИ

Е. В. Олійник, Е. В. Парусов д.т.н., с.н.с., І. М. Чуйко к.т.н., ст. досл.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Наразі світове виробництво бунтового прокату щорічно перевищує 50 млн. т, що пояснюється широкою сферою його використання. Основний напрям подальшого застосування прокату полягає у отриманні з нього холоднодеформованого дроту різноманітного призначення, зокрема для виготовлення зварювальних матеріалів. У той же час споживачі бунтового прокату зварювального призначення висувають підвищені вимоги до показників його пластичності та рівня міцності, оскільки від цього залежить ефективність процесів холодного пластичного деформування (волочіння).

Одним із дієвих напрямів вирішення існуючої проблеми є застосування знеміцнювального термомеханічного оброблення бунтового прокату у потоці прокатного стану, яке дозволяє керувати процесами структуроутворення в металі на заключному етапі його охолодження. Найбільше поширення у світовій металургійній практиці отримала технологія Стелмор, яка передбачає на заключній стадії застосування регульованого повітряного охолодження прокату. Саме на цьому етапі створюються умови для реалізації квазіізотермічного витримування прокату, температурно-часові параметри якого істотно впливають на формування кінцевої структури та механічних властивостей сталі.

Дослідження проводили шляхом імітування експериментальних термічних циклів оброблення сталі CrMoV1Si на автоматизованому комплексі Gleeble 3800 (США) з урахуванням технологічних особливостей ліній Стелмор, що експлуатуються низкою промислових підприємств. Для аналізу процесів структуроутворення в сталі CrMoV1Si (% ваг.: 0,08C-1,30Mn-0,54Si-1,06Cr-0,54Mo-0,24V-Fe_{основа}) застосовували металографічні дослідження засобами оптичної мікроскопії та кількісний фазовий аналіз.

Встановлено, що швидкість безперервного охолодження у інтервалі температур 950–570 °C є визначальним чинником з точки зору впливу на мікроструктурну еволюцію сталі CrMoV1Si. За результатами експериментів запропоновано наступний температурно-швидкісний регламент охолодження прокату: початок охолодження від 950 °C; прискорене повітряне охолодження у діапазоні 950–850 °C зі швидкістю ~10 °C/c; уповільнене охолодження у діапазоні 850–570 °C зі швидкістю ~0,4 °C/c; подальше охолодження від 570 °C на спокійному повітрі. Такий режим охолодження обумовлює формування структури сталі, яка складається з 60 % фериту, 29 % перліту, 8 % бейніту та 3 % мартенситу, зокрема останній спостерігається у вигляді окремих зерен з високою твердістю, проте їх кількість є незначною, що забезпечує досягнення ефективного поєднання показників міцності та пластичності. Визначено, що більш інтенсивне або уповільнене охолодження сталі CrMoV1Si в інтервалі дифузійного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення впливає на збільшення об'ємної частки бейніту й мартенситу, що призводить до зменшення показників пластичності та підвищення міцності металу.

Запропонований регламент охолодження забезпечує мінімальний вміст твердих фаз і сприяє формуванню структури, яка переважно складається з феритної матриці та ділянок перліту. Досягнутий структурний стан слід вважати сприятливим з точки зору можливості підвищення технологічної пластичності прокату зі сталі CrMoV1Si під час волочіння у зварювальний дріт із сумарним відносним обтисненням не менше 90 %. Рекомендований режим повітряного охолодження може розглядатися як найбільш перспективний для промислової апробації технології знеміцнювального термомеханічного оброблення бунтового прокату зварювального призначення, виготовленого з низьковуглецевих легованих Cr-Mo-V сталей.

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЇ НА РОЗМІР НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ТОНКОМУ ДРОТІ

Т. М. Голубенко, к.т.н., В. А. Луценко, д.т.н., с.н.с., О. В. Луценко, к.т.н., Г. І. Сівак

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Контроль неметалевих включень є важливим етапом у виробництві високоякісного сталевго дроту. Для катанки з легованих, зокрема кремнієво-марганцевих сталей типу G3Si1, у нормативній документації не наведено граничної кількості неметалевих включень, які можуть бути в сталі, не впливаючи на технічні характеристики дроту. Тому метою дослідження було виявлення доцільності використання існуючого нормативу для нелегованих сталей ISO 16120-4:2017. Проводилось порівняльне дослідження якості різних партій сталі G3Si1, яку переробляють у дріт холодним волочінням за схемою 5,5→4,75→2,0→0,8 мм. Основні труднощі при виробництві сталевго дроту малих діаметрів пов'язані з підвищенням міцності (наклепом) та обривністю металу в процесі волочіння на виробництві. Вплив наклепу для сталі G3Si1 прибирається проведенням термічної обробки (відпалу) на діаметрі 4,75 мм, після якої сталь має сфероїдизовану структуру й підвищену пластичність.

Дослідження кількості неметалевих включень у сталі G3Si1 діаметром 5,5 мм за ISO 4967:2013 показали присутність включень із наступними індексами: A 0,5, B 2,5, B 1e, C 1, D 1,5 (позначка e – товсте включення). Після волочіння на дріт діаметром 2,0 мм та діаметром 0,8 мм індекси кількості змінилися на A 0, B 2, C 1, D 1, та A 0, B 2, C 1,5, D1 відповідно. Пластичні включення деформуються при обробці сталі, що приводить до їх стоншування і подовження уздовж основних робочих напрямків, в результаті пластичні сульфідні (A) в сталі G3Si1 діаметром 2,0 мм та 0,8 мм не виявляються за стандартною методикою. Великі крихкі алюмінатні (B), силікатні (C) і оксидні (D) включення подрібнюються під дією деформації, в результаті присутність товстих включень в дроті діаметром 2,0 мм не виявлено, але збільшилася кількість рядків (з C 1 до C 1,5). Наведені параметри відповідають нормативу для нелегованих сталей (ISO 16120-4:2017). Інша партія діаметром 5,5 мм зі сталі G3Si1 мала наступні показники індексів: A 0,5, B 3,5, B 2e, C 1,5, D 1,5, DS 1,5 (DS – крупне оксидне включення). Після холодного волочіння на діаметр 2,0 мм форма включень змінилася й індекси дорівнюють: A 0, B 4,5e, B 0,5e, C 1, D 1, DS 1. Рядкові включення тонкі, однак розповсюджені по всій поверхні шліфа й складаються з безлічі дрібних часток зруйнованих великих включень. Для діаметру дроту 0,8 мм вміст неметалевих включень відповідав наступним індексам: A 0, B 3,5, B 0,5e, C 1,5, D 1, DS 1. Виробництво даної партії дроту проходило з обривами на діаметрі 2,0 мм. При цьому помітне перевищення нормованих показників (ISO 16120-4:2017) для нелегованих низьковуглецевих сталей: для діаметру 5,5 мм тонкі рядкові включення типу B мають індекс 3,5 при межі 3 та граничне значення (індекс 2) для товстих включень. Після волочіння крупні включення руйнуються, тому на діаметрі 2,0 мм товсті включення зменшуються з B 2e до B 0,5e і з DS 1,5 до DS 1, а кількість рядків збільшується з B 3,5 до B 4,5 (при межі 3). Наявність незначного перевищення кількості включень у вихідній катанці (5,5 мм) на 0,5 індексу та присутність граничної кількості товстих включень (B 2e) призводить до значного погіршення якості сталі та розривів дроту при подальшому волочінні.

Отже, в прокаті зі сталі G3Si1 діаметром 5,5 мм бажано забезпечити низький вміст неметалевих включень, нижче межі, зазначеній в ISO 16120-4:2017, що гарантуватиме технологічність переробки у дріт та попереджуватиме обрив металу на етапі волочіння на малий діаметр (1,2...0,8 мм).

КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНА ТРИВКІСТЬ ТРУБ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНОГО МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

**Л. І. Ниркова д.т.н., с.д., А. О. Рибаків к.т.н., с.н.с., Л. В. Гончаренко,
С.О. Осадчук к.т.н., ст. досл.**

Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, м. Київ

Дослідження труб з різних марок сталі, проведені фахівцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона показали, що як основний метал, так і зварні з'єднання зберігають високі експлуатаційні характеристики навіть після тривалої експлуатації [1].

Досліджено комплекс механічних, корозійних та корозійно-механічних властивостей основного металу труб зі сталі Х70 магістрального газопроводу після 20 та 40 років експлуатації у порівнянні із трубою, що не експлуатувалася. Встановлено немонотонну тенденцію зміни механічних властивостей під час експлуатації: зростання показників міцності (σ_B , σ_T) та зменшення показників пластичності (δ_5 , KCV^{-15} та ψ) впродовж 20 років з наступним зменшенням σ_B , σ_T та зростанням δ_5 , KCV^{-15} , ψ після 40 років. Тенденція зміни властивостей корелює з результатами інших вчених для гарячекатаної сталі 17Г1С та підтверджується експлуатаційними даними щодо збільшення імовірності числа руйнувань з тривалістю експлуатації. Незважаючи на встановлену тенденцію зміни показників (σ_B , σ_T , δ_5 , KCV^{-15}) їх значення для тривало експлуатованих труб повністю відповідають вимогам технічних умов.

Корозіні та корозійно-механічні властивості досліджено у модельному ґрунтовому електроліті NS4 [2]. Досліджено корозійну стійкість металу труб, що не експлуатувалася, після 20 та 40 років експлуатації. Встановлено, що швидкість корозії становить, відповідно 0,064, 0,058 та 0,056 мм/рік. Згідно зі шкалою корозійної стійкості метал, як не експлуатованої труби, так і після експлуатації відноситься до категорії «стійкий». Зроблено висновок, що корозійна стійкість металу труб після тривалої експлуатації знаходиться на рівні не експлуатованої труби.

Корозійне розтріскування сталі після експлуатації упродовж 20 та 40 років досліджено методом деформації з малою швидкістю. Оцінено схильність до корозійного розтріскування за коефіцієнтом K_s [3]. Показано, що при зміні потенціалів катодної поляризації у діапазоні від -0,750 до -1,050 В, K_s для нової труби становить близько 1, для труб після 20 років експлуатації – змінюється від 1,00 до 1,25, після 40 років експлуатації – від 1,25 до 1,53 [4]. Тобто після тривалої експлуатації встановлено підвищення схильності до корозійного розтріскування. Це дозволило розширити теоретичні уявлення про корозійне розтріскування тривало експлуатованих труб зі сталі контрольованої прокатки.

Літературні джерела

1. Paton B. E., Semenov S. E., Rybakov A. A., S. K. Vasilenko, Vasilyuk V. M. Ageing and procedure of evaluation of the state of metal of the main pipelines in service. *The Paton Welding Journal*. 2000. No. 7. P. 2–10.
2. Antunes de Sena R., Napoleão Bastos I., Mendes Platt G.. Theoretical and Experimental Aspects of the Corrosivity of Simulated Soil Solutions. *International Scholarly Research Notices*. 2012. Article ID 103715. 6 pages. <https://doi.org/10.5402/2012/103715>
3. L. I. Nyrkova, S. O. Osadchuk. *Stress-corrosion cracking of the steels of main gas pipeline: assessment and prevention*. Kyiv: Naukova Dumka. 2023. 216 p. ISBN: 978-966-00-1845-7. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1845-7> [in Ukrainian].
4. Kharchenko Yu.O., Nyrkova L.I. Effect of long-term operation of gas pipeline on stress-corrosion cracking under cathodic polarization. *International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (MSSE2025). Proceedings*. 2025. P.193-194.

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖФАЗНОЇ АДГЕЗІЇ У ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИТАХ, АРМОВАНИХ ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ

В. В. Вишневецький¹, Г. А. Кононенко^{1,2} д.т.н., ст. досл.

¹ Дніпровський технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

² Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Термопластичні композити, армовані вуглецевим волокном, належать до класу матеріалів, що поєднують високу міцність, хімічну стійкість і можливість переробки, тому активно розглядаються для авіаційних, автомобільних, будівельних і спортивних застосувань. Перевагою термопластичних матриць є керованість технологічних процесів, скорочення часу виготовлення, придатність до вторинної переробки та екологічність. Водночас головною проблемою широкого впровадження CFRTP залишається слабка міжфазна адгезія між волокном і матрицею через різницю у полярності та енергетичних характеристиках поверхонь. Гладка, неполярна структура вуглецевого волокна погіршує змочуваність і знижує ефективність перенесення навантажень, що веде до локальних руйнувань і втрати армуючої дії. Для підвищення міцності та довговічності матеріалів необхідна цілеспрямована модифікація поверхні волокна й узгодження хімії матриці.

Сучасні методи підвищення адгезії поділяються на фізичні та хімічні. До фізичних належать плазмова активація, мікрохвильова та радіаційна обробка, а також металізація або наномодифікація поверхні. Плазмова обробка покращує шорсткість і збільшує поверхневу енергію волокна, сприяючи формуванню кисневмісних груп і зростанню змочуваності у системах з PA6, PC, PES. Радіаційна модифікація стабілізує з'єднання за рахунок утворення реакційноздатних центрів, а металеві або наноструктурні покриття (зокрема на основі нікелю, оксиду графену чи вуглецевих нанотрубок) формують ефект механічного зчеплення, який посилює адгезію між волокном і матрицею.

Хімічні методи ґрунтуються на функціоналізації поверхні кислотою, силанами, ізоціанатами та полімерними сумісниками. Кислотна обробка підвищує концентрацію карбоксильних і гідроксильних груп, що покращує адгезію в композитах з HDPE і POM. Силанові сполуки та ізоціанат-модифіковані емульсії забезпечують хімічне зв'язування з матрицями на основі поліамідів, зменшуючи контактний кут змочування та збільшуючи міцність з'єднання. Використання полімерних сумісників, таких як поліпропілени, модифіковані малеїновим ангідридом, оптимізує сумісність завдяки наявності реакційноздатних груп і відповідній молекулярній масі. Нанесення тонкого шару РЕЕК або інших споріднених полімерів на волокно покращує адгезію за рахунок структурної відповідності матриці та підвищує довговічність системи.

Підсилення міжфазної взаємодії визначається не лише хімічною природою волокна та матриці, але й топографією поверхні, типом сумісника, орієнтацією волокон і параметрами технологічного процесу. Вибір способу модифікації має бути узгоджений із природою полімеру та умовами експлуатації композиту. Найбільш перспективними є комбіновані фізико-хімічні підходи, які поєднують функціоналізацію поверхні з контрольованими технологічними режимами формування.

Таким чином, спрямована модифікація вуглецевого волокна та раціональний підбір матриць дозволяють істотно покращити адгезію на межі волокно–матриця, забезпечуючи підвищення механічної міцності, жорсткості, зносостійкості й стабільності властивостей у процесі експлуатації. Отримані узагальнення створюють підґрунтя для подальшої оптимізації технологій та розширення промислового використання термопластичних композитів на основі вуглецевого волокна.

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СКАНУВАННЯ ТА ПОЛОЖЕННЯ НА ПЛАТФОРМІ ПОБУДОВИ НА ГЕОМЕТРІЮ ТА СТАБІЛЬНІСТЬ ВАННИ РОЗПЛАВУ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ LPBF

**С. В. Аджамський^{1,2}, докт. філ., Т. В. Балаханова³, к.т.н., О. Є. Барановська³, к.т.н.,
Р. В. Подольський^{2,3,4}, докт. філ.**

¹Інститут транспортних систем та технологій НАН України, м. Дніпро;

²Адитивні лазерні технології України, м. Одеса;

³Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро;

⁴Інститут прикладних систем управління НАН України, м. Київ

У процесі лазерного сплавлення порошкових матеріалів (LPBF) формування ванни розплаву визначає якість, геометрію та цілісність кінцевих виробів. Основними параметрами, що впливають на цей процес, є потужність лазера, швидкість сканування, діаметр плями та товщина шару, які визначають тепловий режим плавлення й характер дефектів, зокрема пористості чи дефектів несучільності. Водночас значну, але часто недооцінену роль відіграє розташування зразків на платформі побудови. Просторове положення впливає на фокусну відстань, профіль лазерної плями, розподіл теплових потоків, охолодження та газодинамічні умови в камері, температурні градієнти, напрям і швидкість потоку захисного газу, а також конструкція вхідних та вихідних отворів. Аналіз сучасних досліджень виявив суперечливість результатів щодо впливу положення на платформі побудови, особливо це стосується даних, що пов'язані з просторовим розташуванням зразків, часто різняться. Показано актуальність подальших комплексних досліджень, що враховують взаємодію параметрів сканування, позиції на платформі, характеристик газового потоку тощо. Це дозволить підвищити стабільність процесу LPBF, забезпечити контрольоване формування ванни розплаву й прогнозовані властивості готових виробів.

ПОВЕДІНКА ГЕТЕРОФАЗНИХ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ «ТУГОПЛАВКА ФАЗА, ЩО ОТОЧЕНА ЛЕГКОПЛАВКОЮ ОБОЛОНКОЮ» ТА «ФАЗИ ПОРУЧ» ЗА ГАРЯЧОЇ ТА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ СТАЛЕЙ

С. І. Губенко ^{1,2} д.т.н., проф., Е. В. Парусов ¹ д.т.н., с.н.с.,
І. М. Чуйко ¹ к.т.н., ст. досл., О. В. Парусов ¹ к.т.н., с.н.с.

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій:

ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури», м. Дніпро

Практика показує, що неметалеві включення часто відіграють визначальну роль під час зародження руйнування деталей та конструкцій, і навіть негативно впливають на рівень механічних властивостей сталей [1]. Мета роботи полягала у вивченні особливостей трансформації гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч».

Досліджено поведінку за гарячої та холодної прокатки сталей мікрокомполітичних гетерофазних включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч». Показано, що їх поведінка за деформації пов'язана зі складною взаємодією складових фаз включень, а також взаємодією у системі міжфазних границь включення-матриця та внутрішніх міжфазних границь у включеннях. Встановлено, що досліджені включення характеризуються своїми закономірностями розвитку деформаційних процесів, що визначаються їх хімічним та фазовим складом, структурою, деформаційною здатністю фаз включень, температурою деформації. Встановлено взаємний вплив фаз включень на їх спільну деформацію за гарячої і холодної прокатки сталей.

Показано, що формозміна включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» за гарячої прокатки визначається рівнем пластичності фази-оболонки, а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та проковзування. Укладання недеформованих включень оксидів, шпінелей, нітриду титану та ін. у пластичну силікатну або сульфідну оболонку слід розглядати як спосіб зниження крихкості неметалевих включень за гарячої прокатки. Формозміна включень «фази поруч» за гарячої прокатки визначається рівнем пластичності фаз включення, а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок розвитку міжфазного тертя та проковзування (за наявності пластичної фази). Формозміна включень «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» за холодної прокатки визначається рівнем пластичності сульфідної фази-оболонки, а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок виникнення міжфазного тертя та холодного проковзування уздовж міжфазних границь у включеннях. Формозміна включень «фази поруч» за холодної прокатки визначається рівнем пластичності сульфідної фази включення (за її наявності), а також розвитком складної взаємодії фаз внаслідок виникнення міжфазного тертя та холодного проковзування. Досліджена роль пластичних фаз у включеннях «тугоплавка фаза, що оточена легкоплавкою оболонкою» та «фази поруч».

Літературні джерела

1. Губенко С. І., Ошкадеров С. П. *Неметаллические включения в стали*. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.

ВПЛИВ ОБРОБКИ СТАЛЕЙ НА ЗРОСТАННЯ ТРІЩИН ПОБЛИЗУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ

С. І. Губенко ^{1,2} д.т.н., проф.

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

² Український державний університет науки і технологій:

ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури», м. Дніпро

Відомо, що неметалеві включення сприяють окрихчуванню сталей, оскільки утворення тріщини поблизу включення знижує роботу її зародження [1-4]. Це призводить до зниження технологічних та експлуатаційних властивостей сталей, а також викликає втомні та корозійні процеси [5, 6]. Мета роботи полягала у всебічному аналізі особливостей розповсюдження в сталях тріщин, що виникли поблизу неметалевих включень різних типів, а також можливі способи гальмування їх зростання за різних умов навантаження та використання обробок, що впливають на особливості структури сталей поблизу включень.

Для різних типів сталей встановлені особливості розповсюдження тріщин, що виникли поблизу неметалевих включень різних типів, а також можливі способи гальмування їх зростання за різних умов навантаження та використання обробок. Показано, що розвиток тріщин супроводжується їх розгалуженням в межах зруйнованих включень та їх скупченнях, а також при зустрічі з дефектами структури сталеві матриці. Встановлено, що уповільнення зростання тріщин можливе внаслідок гальмування пластичними сульфідними включеннями, розвитку локальних пластичних релаксаційних процесів у сталевій матриці, а також зміни схеми напруженого стану поблизу включення за зміни умов навантаження. Показано вплив локальних мікрокомполітичних структур сталеві матриці, отриманих за високоенергетичних обробок, на характер розвитку та гальмування тріщин, що виникли поблизу неметалевих включень.

Літературні джерела

1. Губенко С. І., Ошкадеров С. П. *Неметаллические включения в стали*. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
2. Sága M., Blatnická M., Blatnický M., Dižo J., Gerlici J. Research of the Fatigue Life of Welded Joints of High Strength Steel S960 QL Created Using Laser and Electron Beams. *Materials* (Basel, Switzerland), 03 Jun, 2020. 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112539>
3. Kusche C. F., Gibson J. S.-L., Wollenweber M. A., Korte-Kerzel, S. On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions. *Materials & Design*. 2020. 193(2):108801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108801>
4. Qayyum F., Umar M., Elagin V., Kirschner M, Hoffman F. Influence of Non-Metallic Inclusions on Local Deformation and Damage Behavior of Modified 16MnCrS5 Steel. *Crystals*. 2022. Vol. 12. No 2. P. 281–288. <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>
5. Zhang L., Ren Y. Non-metallic Inclusions in the Interstitial Free Steel. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*, 2025. P. 687-721. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_27
6. Zhang L., Ren Y. Evolution of Inclusions in Steel During Cooling and Heating. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*, 2025. P. 609-639. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_24

НАНОАРТ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО: ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОБРОБКИ СТРУКТУР МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф.

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

В роботі проаналізовано вплив штучного інтелекту (ШІ) на освітній процес, зокрема його можливості та обмеження для всіх учасників освітнього процесу. Зосереджується увага на застосуванні штучного інтелекту під час дистанційного навчання як віртуального помічника для виконання лабораторних робіт за спеціальністю G10 «Металургія». Безумовно, впровадження інформаційних технологій в освітній процес є одним із напрямів модернізації системи вищої освіти, який не тільки розширює горизонти освітніх можливостей, змінює способи передачі знань, але і забезпечує високу ефективність освітнього процесу та покращує якість знань здобувачів вищої освіти.

В роботі акцентується увага на використанні сучасних інформаційних технологій при роботі зі структурами металів і сплавів як об'єктами досліджень при створенні зображень НаноАрт. Показано, що НаноАрт як симбіоз науки та мистецтва візуалізує невидимий світ атомів і молекул, відображаючи закономірності природи, які присутні як на макро-, так і на мікрорівнях. Зазначається, що процес створення наноструктур металів і сплавів відбувається завдяки проведенню фізичних експериментів, після яких отримують їх зображення за допомогою електронних мікроскопів, а вже потім «митці» обробляють ці зображення за допомогою різних графічних редакторів, створюючи різнобарвні картини – зображення НаноАрт.

При створенні зображень НаноАрт в якості «робочого» інструменту можливим є використання як штучного інтелекту (наприклад, ChatGPT), так і графічних редакторів (наприклад, Adobe Photoshop CS та Paint 3D). Показано механізм перетворення чорно-білого зображення структури металів і сплавів в різнокольорові картини, в яких завдяки своєму творчому підходу та іноді «домалюванню» деяких деталей зображення автори бачать зовсім нові, а іноді і несподівані композиції – пейзажі, тварини, предмети та інші зображення. При застосуванні штучного інтелекту для обробки структур металів та сплавів перед або під час діалогу з ChatGPT для налаштування відповіді слід робити правильні промпти, тобто послідовно, конкретно та чітко давати команди, уникаючи надмірної загальності та іноді перевіряючи і доопрацьовуючи промпт.

Отже, отримані зображення НаноАрт уособлюють не тільки красу науки, але і її творчий потенціал. Взаємодія мистецтва та нанотехнологій в свою чергу дозволяє:

- популяризувати сучасне українське мистецтво як поєднання інноваційного дизайну (за допомогою графічного дизайну) та нанотехнологій;
- привернути увагу закладів вищої освіти, наукових спільнот, підприємств та інших установ до сучасного креативного мистецтва та новітніх технологій;
- показати симбіоз науки та мистецтва, які є насамперед складовими творчого процесу та доповнюють і удосконалюють один одного, а в своїй єдності відкривають нові горизонти пізнання всесвіту.

Таким чином, встановлено, що штучний інтелект виявляється ефективним інструментом для оптимізації освітнього процесу та прискорення прогресу на шляху до Цілі сталого розвитку 4 «Якісна освіта». Визначено, що штучний інтелект полегшує роботу як науково-педагогічних працівників, так і здобувачів вищої освіти, створюючи широкі можливості для підвищення якості освіти. Але все ж таки він не може замінити традиційне навчання, а є тільки помічником, здатним значно збагатити організацію освітнього процесу та підвищенні якості надання освітніх послуг за умови етичного та раціонального його застосування.

ПОГЛИНАННЯ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ ТА УТВОРЕННЯ ПОР В ГРАНУЛАХ ЖАРОМІЩНОГО СПЛАВУ ЭП975МП

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф.

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

На сьогодні особливо актуальним є отримання жароміщних сплавів з мінімальним вмістом інертних газів, таких як Ar, He та Ne. Наявність пор з інертним газом в частинках порошку знижують службові характеристики виробів, причому найбільше впливають на якість жароміщних сплавів внутрішньочастинкові пори.

Серед методів отримання жароміщних нікелевих сплавів слід відмітити газове або відцентрове розпилення. При газовому розпиленні в порошкових частинках утворюються пори, заповнені газом-носієм. Наявність пор в порошкових частинках зумовило появу пористості у компактному матеріалі.

Метою даної роботи є визначення кількості аргону в порошку жароміщного сплаву ЭП975МП на різних стадіях отримання методом газового та відцентрового розпилення.

Технологія отримання розпилених гранул жароміщного сплаву на основі нікелю типу ЭП975МП здійснювалася в умовах ДП «УкрНДІспецсталь» на установках газового (УрЖМВ-3) та відцентрового розпилення (УВРЦ).

При дослідженні впливу часу витримки розплаву в аргоні (Ar) на пористість розпиленого газом порошку було встановлено, що зі збільшенням часу витримки розплаву в аргоні з 8 до 40 хв. перед розпиленням частка пористих частинок в порошку в залежності від фракції зростає до 1,4 разів. У зв'язку з цим можна припустити, що одним з механізмів утворення пор в частинках є поглинання аргону розплавом при витримці з подальшим утворенням пор в краплях розплаву.

Мікроструктурний аналіз жароміщних сплаву ЭП975МП показав, що пори при газовому розпиленні сферичні з чіткими краями, при чому більш великі фракції більшою мірою вражені порожнечами та аргонном.

За допомогою мас-спектрального методу було визначено масову частку аргону в жароміщних сплавах. Дослідження вмісту аргону в сплаві ЭП975МП на різних стадіях технологічного процесу показали на збільшення масової частки аргону після газового розпилення за рахунок статистичної та динамічної взаємодії інертного газу з металом.

Після плавлення і вакуумування розплаву при залишковому тиску 5 Па в пробах металу масова частка аргону досягає значення $1 \cdot 10^{-5} \%$, а після газового розпилення досягає меж $2,3 \cdot 10^{-4} \%$.

Відцентрове розпилення металевих розплавів дозволяє при відносно невеликих енергозатратах отримати компактні порошки з малим розкидом частинок за розмірами. Частинкам порошку властива наявність газових пор, які утворюються за рахунок початкового захвату газу при витримці розплаву в індукційній печі та його переливанні у металоприймач. Пори при відцентрованому розпиленні дрібні, неправильної форми з рваними краями, при чому кількість частинок з порожнечами практично не залежить від їх розмірів. Аргон захоплюється металом тільки в процесі руху по диску, а не за рахунок слабкої газодинамічної взаємодії газу безпосередньо на краплі розплаву.

Таким чином, після напуску аргону в камеру печі його кількість в металі збільшується, а при подальшому відцентровому розпиленні не змінюється в порівнянні з газовим розпиленням.

Отже, аналіз механізму утворення пор в гранулах жароміщного сплаву на основі нікелю показав на відсутність «розчинення» Ar або суміші Ar-He в рідкому або твердому стані при рівні аргону до $1 \cdot 10^{-4} \%$ мас. За допомогою фізичних та технічних методів встановлена можливість значного зменшення вмісту аргону в жароміщному сплаві ЭП975МП.

Прогресивні технології обробки металу тиском

УДК 621.77:004.8

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ПРИ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

О. С. Воденнікова¹ к.т.н., доц., С. А. Воденніков² д.т.н., проф., К. І. Фурлет ¹

¹Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Штучний інтелект (ШІ) стає ключовим елементом сучасних технологій обробки металів тиском (штампування, кування, прокатка, екструзія та інкрементальне формування) і може виконувати роль інтелектуального модуля керування, діагностики та оптимізації. Поєднання сенсорики (наприклад, тиск, температура, деформація, вібрації), потоків даних та моделей машинного навчання дозволяє підприємствам отримувати оперативні рішення щодо корекції режимів у реальному часі, прогнозувати дефекти та планувати технічне обслуговування.

У технологічному плані застосування ШІ можна розглянути через такі напрями:

1. Прогнозне моделювання матеріальних властивостей у ході термомеханічної обробки. Наприклад, нейронні мережі та регресія на базі Gaussian-процесів застосовуються для прогнозу пластичних деформацій, твердості, мікроструктури. Це дозволяє підприємствам передбачати, як поведеться заготовка під час обробки. Дослідження показують, що у процесах листового формування методом інкрементального формування (ISF) використання ANN-моделей дозволяє скоротити середню помилку формоутворення до ~68,5 % [1].

2. Оптимізація режимів гарячої штампування і прокатки. Алгоритми оптимізації на базі даних (Bayesian Optimization чи політ підкріпленням (Reinforcement Learning)) можуть підтримувати оптимальні температурно-тискові профілі. Дослідження показують, що такі підходи дозволяють знизити варіативність властивостей готових виробів, зменшити енерговитрати та підвищити стабільність виробництва [2].

3. Моніторинг у процесі (in-process monitoring) – аналіз часових рядів від сенсорів для виявлення аномалій та прогнозу відмов. Наприклад, у прокатних станах застосовуються моделі часового ряду, які визначають події типу обриву стрічки або аномалії зварювання, корегуючи положення валків чи товщину в реальному часі [3].

4. Корекція траєкторії інструмента у процесах інкрементального формування листа (SPIF) із метою зменшити spring-back та геометричні похибки. Наприклад, завдяки ML-моделям вдалося модифікувати шляхи інструмента й швидкості подачі так, що точність формоутворення суттєво покращилась [1, 4].

Таким чином, ШІ в процес обробки металів тиском є стратегічно важливим кроком для підвищення конкурентоспроможності сучасних металургійних підприємств. Інтеграція сенсорних технологій, алгоритмів машинного навчання та цифрових двійників відкриває можливості для якісного покращення виробничих показників: зниження рівня браку металопродукції, оптимізації енергоспоживання та підвищення гнучкості технологічних процесів. Ключовими чинниками успішної реалізації є системний підхід до цифровізації виробництва, етапне впровадження AI-рішень через пілотні проєкти, ретельна валідація моделей в реальних умовах і комплексне навчання технічного персоналу. За умови збалансованих інвестицій в інфраструктуру та компетенції, перехід до повноцінних AI-керованих виробничих ліній є цілком досяжним завданням у найближчі 3–5 років.

Літературні джерела

1. Möllensiep D., Detering L., Kullessa P., Steinhof M., Kuhlenkötte B. Prediction of forming accuracy in incremental sheet forming using artificial neural networks on local surface representations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 133. P. 4923–4938. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14023-7>
2. Cao J., Bambach M., Merklein M., Mozaffar M., Xue T. Artificial intelligence in metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 73, Iss. 2. P. 561–587. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.102>
3. AI Roll Forming: The Future of Intelligent Metal Fabrication. Machine Matcher. URL: <https://machinematcher.com/articles/2025/05/ai-roll-forming> (дата звернення: 25.10.2025).
4. Simonetto E., Ghiotti A., Bruschi S. Agile manufacturing of complex shaped bent profiles by incremental deformation. *Manufacturing Letters*. 2023. Vol. 36. P. 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.01.004>

Моделювання та оптимізація технологічних процесів

УДК 669.17.046.516.2 : 669-154.001.5

ПІДГОТОВКА ХОЛОДНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛЕГУВАННЯ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ

С. В. Греков, В. П. Піптюк, к.т.н., с.н.с., С. Є. Самохвалов, д.т.н., проф.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Попередніми дослідженнями методом математичного моделювання встановлено вплив кількості шматкової легуючої добавки на змінення гідродинамічних і тепло-, масопереносних умов в зоні контакту з металевим розплавом в короткотривалий час з моменту потрапляння добавки в рідкий метал. Однак, в зв'язку з відсутністю на теперішній час в літературі необхідних швидкісних параметрів, неможливо перевірити на адекватність теоретично отримані результати, що викликало необхідність проведення додаткових досліджень з метою визначення відсутніх даних. Таким чином була встановлена доцільність проведення спеціальних експериментів з холодного фізичного моделювання.

Підготовка до експериментального дослідження складних металургійних процесів, до яких, безперечно, можна віднести і визначення швидкісних параметрів гідродинаміки металевого розплаву, методом холодного фізичного моделювання є обов'язковим і відповідальним етапом перед виконанням запланованої роботи. Виконання підготовчого процесу почали з підбору матеріалів-імітаторів легуючих добавок (шматкових феромарганцю марки ФМн78 та феросіліцію марки ФС45), які в більшості випадків використовуються при виробництві сталі, а також трасерів, що визначатимуть напрями і швидкості потоків води-імітатора металевого розплаву. Вибір матеріалів і їх кількість здійснювали з використанням критеріїв подібності і з дотриманням реальних промислових умов застосування легуючих матеріалів.

Наступним кроком готували лабораторне обладнання. В якості ковша використовували його прозору модель кафедри електromеталургії ім. акад. М.І.Гасика Навчально-наукового інституту «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій. Використовували також відео фіксуюче устаткування, компресор, реєстратор АПЦ та інше. З метою визначення впливу густини імітатора металевого розчину на його електропровідність застосовували шматкову поварену сіль. Для замірів електричних сигналів по внутрішнім стінкам моделі ковша розмістили 12 електродів, а також обладнали на ковші вимірювальні пристрої, які розташували у 3-х взаємоперпендикулярних напрямках (осі x, y, z) для можливості розрахунків швидкості потоків з фіксованих стоп-кадрів в різні моменти часу.

Провели тестові випробування змонтованої схеми лабораторного експериментального обладнання, виявили і ліквідували деякі недоліки. Переконались в дієздатності обладнання і його готовності до запланованих експериментальних досліджень.

МЕТОДИКА АПРОКСИМАЦІЇ ДІАГРАМ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА РОЗТЯГ СТАЛЕВОЇ АРМАТУРИ ДЛЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

М. Ю. Амбражей, Е. В. Парусов д.т.н., с.н.с.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Діаграми деформування «напруження–деформація» є фундаментальним інструментом у матеріалознавстві та інженерній практиці, надаючи графічне уявлення механічної реакції матеріалу на прикладене навантаження. Ці діаграми, одержувані зазвичай під час випробувань на одновісне розтягування, є основою кількісного визначення найважливіших механічних характеристик: модуля пружності, границі плинності, міцності і показників пластичності (відносного подовження, звуження тощо). Знання цих властивостей критично важливе для обґрунтованого вибору матеріалів при проектуванні конструкцій, оцінки їхньої несучої здатності, прогнозування поведінки в умовах експлуатації та для контролю якості продукції.

Однак інформація, що міститься у діаграмі розтягування, не обмежується лише цими стандартними параметрами. Повний аналіз форми кривої, особливо в області пластичної деформації, дозволяє отримати додаткову інформацію про механізми зміцнення, стабільність пластичної течії, чутливість до швидкості деформування та температури, а також оцінити здатність матеріалу до поглинання енергії та опору руйнуванню. Розуміння цих аспектів необхідне для моделювання процесів обробки металів тиском, а також для аналізу поведінки конструкцій за складних, у тому числі динамічних і циклічних, режимах навантаження. Так, методики визначення ступеня деформаційного зміцнення n (*tensile strain-hardening exponent*) активно використовуються за стандартами ASTM E646, ISO 10275 для оцінки здатності до холодного пластичного деформування листового прокату та штаб. Враховуючи широку розповсюдженість арматурного прокату, обсяг світового ринку якого за даними Mordor Intelligence Inc у 2025 році складає 144,75 млн. т., стає очевидним, що отримання додаткової інформації про поведінку сталей для виготовлення арматурного прокату та оцінка його експлуатаційних характеристик є актуальним напрямом. Показано, що існує певна позитивна кореляція між характеристикою пластичності A_{gt} та показником n арматури [1], що важливо для забезпечення високої пластичності A_{gt} при експлуатації в умовах сейсмічних впливів, але наявна методика визначення n є складною та неточною.

Запропоновано спрощену методику апроксимації діаграм деформації при випробуванні на розтяг за наступним алгоритмом:

1. Перебудова наявної машинної діаграми деформування на розтягування в дійсну діаграму деформування виходячи із закону збереження об'єму.

2. Апроксимація ділянки зони деформаційного зміцнення (до точки локалізації деформації) модифікованим рівнянням Холломоуна $S = K(e - e_0)^n$, де S , e – дійсні напруження та деформації, K – коефіцієнт деформаційного зміцнення (МПа), n – експоненційний показник ступеня деформаційного зміцнення, e_0 – поправка на податливість оснащення.

Використання запропонованої методики дозволяє визначати показник n без використання екстензометру.

Літературні джерела

1. Hortigón B., Gallardo J. M., Nieto-García E. J., López J. A. Strain hardening exponent and strain at maximum stress: Steel rebar case *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 196. P. 175–184. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.082>

ОЦІНКА ВЛАСТИВОСТЕЙ ХРОМОВМІСНИХ ШЛАКІВ З ПОЗИЦІЇ МІЖАТОМНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В РОЗПЛАВАХ

Д. О. Степаненко к.т.н., А. І. Белькова к.т.н., Д. М. Тогобицька д.т.н., проф., Н. Є. Ходотова

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Раціональне управління процесами шлакоутворення в багатокомпонентній системі $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO/Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO}$, що широко використовується при виплавці ферохромистих сталей, є одним з визначальних факторів для забезпечення високої якості сталі та енергоефективності виробництва. Оксид хрому Cr_2O_3 , що переходить у шлак із металевої ванни, надає істотний та складний вплив на його фізико-хімічні властивості.

Незважаючи на наявність великої кількості публікацій, комплексний вплив Cr_2O_3 на властивості багатокомпонентних шлаків (в'язкість, температура плавлення, електропровідність, здатність рафінувати) залишається недостатньо вивченим. Немає системних даних, що описують ці залежності при різних концентраціях Cr_2O_3 .

Оксид хрому виявляє подвійну природу, що визначає його неоднозначний вплив на в'язкість шлакового розплаву. При низьких концентраціях оксид хрому знижує в'язкість шлаку, при високих концентраціях він виступає в ролі структуроутворюючого компонента, подібно до SiO_2 , що призводить до збільшення в'язкості. Додаткове підвищення в'язкості відбувається через кристалізацію тугоплавких сполук шлаку, таких як шпинелі, перовскіт і донатит, в обсязі шлаку.

Існуючі дослідження впливу оксиду хрому на електропровідність шлаків показують також суперечливі результати. Деякі публікації свідчать про зниження провідності, інші — про її зростання чи аномальні температурні залежності. Цей аспект є серйозною прогалиною у розумінні властивостей шлакових систем і потребує поглибленого вивчення.

Вплив Cr_2O_3 не можна розглядати ізольовано, оскільки він тісно пов'язаний синергетичними та антагоністичними взаємодіями з іншими оксидами (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO , MnO). Для комплексної оцінки властивостей шлаку доцільно використовувати інтегральні параметри моделі оксидної системи, що ґрунтуються на концепції спрямованого хімічного зв'язку [1]. Використання цих параметрів дозволяє врахувати сукупний вплив всіх компонентів системи на її кінцеві властивості.

Дослідженнями встановлено високий рівень зв'язку в'язкості шлаків, що містять хром, з хімічним еквівалентом складу шлаку (Δe) і параметром хімічної індивідуальності катіонної підрешітки ($\text{tg}\alpha$). Показано, що шлаки різного технологічного призначення можуть бути ідентифіковані за конкретними значеннями Δe .

Виконані дослідження підтверджують доцільність та ефективність використання інтегральних параметрів складу оксидної системи для прогнозування та оцінки властивостей шлаків, що містять хром, з метою оптимізації складів шлакоутворюючих сумішей, що, у свою чергу, веде до підвищення ефективності процесу виплавки ферохромистих сталей.

Літературні джерела

1. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. Vol. 64, No. 1, P. 58–71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ФОСФОРУ У МЕТАЛЕВИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ СПРЯМОВАНОГО ХІМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Д. О. Степаненко к.т.н., Д. М. Тогобицька д.т.н., проф., І. Р. Поворотня к.т.н., С. В. Греков

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Сучасна металургія чорних металів перебуває на етапі пошуку нових технологічних рішень, спрямованих на зниження собівартості продукції, зменшення екологічного навантаження та ефективного використання сировинних ресурсів. Одвічним питанням є забезпечення відповідного рівня чистоти за вмістом шкідливих домішок, зокрема фосфору, адже він має здатність впливати на морфологію неметалевих включень та посилювати неоднорідність металу, що закарбовує відповідний рівень фізико-хімічних властивостей, а отже і якість металу. З метою створення інформаційного забезпечення моделювання фізико-хімічних взаємодій в системі шлак-метал-газ у відділі Фізико-Хімічних Проблем ІЧМ НАНУ постійно ведуться роботи по актуалізації бази «Шлак-Метал-Газ» «Банка даних «Металургія» [1]. Огляд сучасної інформації щодо поведінки фосфору в системах Fe–Cr–P, Fe–Cr, Fe–P, Cr–P, Fe–Cr–P–O дозволив сформувати достовірні репрезентативні вибірки даних з застосуванням методики оцифрування графічних залежностей з збереженням їх початкової точності фіксації, як важливої складової для моделювання і прогнозування фізико-хімічних взаємодій з відповідною спрямованістю на виведення фосфору у шлакову фазу. В якості теоретичної платформи моделювання термодинамічних характеристик системи Me_i-Me_j-P слугує концепція спрямованого хімічного зв'язку [2]. Розглянуто взаємозв'язок ентальпії бінарної системи Fe–P при температурах 298K і 900K та вмісту фосфору по даним роботи [3]. Згідно відправних положень концепції спрямованого хімічного зв'язку хімічна індивідуальність системи, реакційна здатність та структурний стан розплавів виражаються за допомогою методу кодування хімічного складу дослідного розплаву в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії: Z^Y – параметр зарядового стану системи, e ; d – середньозважена між'ядерна відстань, 10^{-1} нм; $tg\alpha$ – константа для кожного елемента, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ρ_l – спрямована зарядова щільність, $e/\text{нм}$. Значна збіжність між представленими у роботі [3] та одержаними нами залежностями свідчить на користь використання параметрів міжатомної взаємодії як оцінювачів достовірності одержаних даних. Зокрема параметр міжатомної взаємодії $tg\alpha$, що описує градієнт зміни радіусу іона від його заряду, практично відтворює ентальпійні криві одержані авторами у роботі [3]. Аналогічні тенденції та залежності прослідковуються і при температурі 900K. Зі зростанням вмісту фосфору зростає його заряд, що відображається параметром $tg\alpha$, у той же час середньозважена між'ядерна відстань закодована у параметрі d є мінімальною при його максимальному вмісті, що свідчить на користь утворення міцних міжатомних зв'язків з партнером зокрема залізом. Таким чином, результати досліджень підтверджують, що параметри міжатомної взаємодії можуть слугувати надійними критеріями для оцінки енергетичних характеристик фосфорвмісних систем та адекватно відображають вплив вмісту фосфору на зміну ентропійних властивостей при різних температурах.

Літературні джерела

1. Тогобицька Д.М., Поворотня І.Р., Ліхачов Ю.М., Ходотова Н.Є. Бази даних та бази моделей – фундаментальне підґрунтя для розробки нових технологічних рішень при виробництві якісних сталей. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»*. м. Дніпро, 2024. С. 155–160.
2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the «Metal-Slag» system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. Vol.64, No. 1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
3. CAO Zhan-Min, WANG Kun-Peng, QIAO Zhi-Yu, DU Guang-Wei. Thermodynamic Reoptimization of the Fe-P System. *Acta Physico-Chimica Sinica*. 2012. Vol. 28, No. 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201111172>

ВПЛИВ ПИТОМОЇ ГУСТИНИ ДОБАВОК НА ГІДРОДИНАМІЧНІ ТА МАСОПЕРЕНОСНІ ПРОЦЕСИ В КОВШІ ПРИ ЇХ КОЛЕКТИВНОМУ ВВЕДЕННІ

С. Є. Самохвалов, д.т.н., проф., В. П. Піптюк, к.т.н., с.н.с., С. В. Греков

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

У процесі обробки сталі на ковшових агрегатах, наприклад на УКП, використовують введення різних шлакоутворюючих і легуючих добавок безпосередньо у рідку ванну розплаву. Ці добавки найчастіше подають у вигляді шматків і при їх зануренні у метал формуються багатофазні потоки, у яких тверді частинки рухаються разом з рідкою фазою. Оскільки густина добавок зазвичай відрізняється від густини рідкого металу, у ванні виникають складні гідродинамічні умови з утворенням нестационарних конвективних течій. Як показали сучасні CFD-дослідження, у таких умовах для адекватного моделювання необхідно поєднувати розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для рідкої фази з описом руху твердих частинок добавок.

Прямих робіт, де саме маса/об'єм добавки як керуючий параметр змінює поле течії у ковші, небагато – частіше досліджують час змішування за фіксованих гідрорежимів. Втім, кількість добавки входить у моделі через кілька фізичних механізмів. Перш за все – через енергетичний (тепловий) вплив: великі маси холоднішої добавки (грудка, брикет) створюють локальні «холодні плями», підсилюють природну конвекцію, можуть тимчасово модифікувати струминні структури плюму. Проте вплив кількості введеної добавки на гідродинаміку в ковші раніше не досліджувався.

В роботі [1] методом математичного моделювання розглядалося колективне введення шматкових добавок (таких як феромарганець марки ФМн78) з питомою густиною близькою до густини розплаву сталі. Проте вплив на гідродинаміку розплаву в ковші добавок з питомою густиною відмінною від густини розплаву сталі залишився не вивченим.

В даній роботі виконано розвиток математичної моделі гідродинамічних та масопереносних процесів в період колективного введення шматкових добавок, запропонованої в роботі [1], на випадок врахування різних питомих густин добавок, а також виконано її програмну реалізацію на мові С#. З використанням розробленого програмного забезпечення проведено серію розрахунків процесу, що розглядається, які дозволили зробити оцінку впливу питомої густини матеріалів, що подаються, на гідродинаміку розплаву в ковші та подальший масоперенос добавок.

Встановлено, що відмінність питомих густин добавок веде до різниці характеристик їх розташування після введення, що впливає на характер їх подальшої динаміки в ковші.

Дану модель планується розвинути у напрямку врахування процесів плавлення, або розчинення добавок з різними питомими густинами та різними теплофізичними характеристиками.

Літературні джерела

1. Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металеві ванни у ковші. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. № 37. С. 231–245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245>

КРИТЕРІЙ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ УМОВ З'ЄДНАННЯ ТА РОЗ'ЄДНАННЯ ШАРІВ МЕТАЛУ В БАГАТОШАРОВОМУ ПРОКАТІ

Є. С. Клемешов к.т.н., І. Ю. Приходько д.т.н., с.н.с.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

На сьогоднішній день основною проблемою при виготовленні багатошарових композитів є отримання міцного з'єднання шарів металу та оцінка міцності з'єднання. Існує безліч різних методів оцінки міцності з'єднання, а у сучасних дослідженнях часто використовують відразу кілька таких методів для контролю та оцінки міцності з'єднання отриманих зразків. Найбільш популярними методами оцінки є методи механічної перевірки міцності з'єднання, такі як випробування на зсув, випробування на відшаровування та в деяких випадках на згинання. Ці методи популярні, оскільки є простими, а в результаті випробувань, дослідники отримують певне кількісне значення, яке характеризує міцність з'єднання. Також існують методи мікроструктурної оцінки міцності з'єднання із застосуванням оптичної мікроскопії (ОМ), скануючої електронної мікроскопії (SEM) з EPC-аналізом, рентгенографії і вимірами твердості шарів на межі з'єднання.

Практично всі перелічені методи оцінки стану поверхні з'єднання та міцності з'єднання належать до тих, що використовуються вже після проведення фізичних експериментів і таким чином збільшуються витрати часу та матеріалів на дослідження. У той же час FEM моделювання може бути використане як до, так і після проведення фізичних експериментів. Однак для цілей прогнозування можливості з'єднання та для оцінки міцності з'єднання шарів металу даний метод використовується вкрай рідко. Існуючі аналітичні моделі враховують безліч змінних, які, як правило, отримані суто емпірично та адаптовані лише під певні параметри процесу прокатки для отримання досить точних результатів, однак, в той же час, вони не є універсальними у застосуванні, що обмежує їх можливості для розрахунку різних комбінацій шарів та матеріалів при створенні технологій, і тому потребують певної адаптації.

Таким чином, актуальною задачею є розробка більш універсальних методів розрахунку для оцінки міцності з'єднання шарів у біметалічному та багатошаровому прокаті при застосуванні комп'ютерних програм FEM моделювання. На основі багатьох досліджень, в області з'єднання шарів металу при прокатці, розроблено критерій з'єднання шарів металу та методику розрахунку міцності з'єднання шарів металу. Розроблена методика заснована на теорії руйнування плівок під час холодної прокатки, враховує геометрію зони деформації, тертя та властивості металів, що деформуються. Окрім цього, розробка методики проводилася з урахуванням можливості її реалізації із застосуванням комп'ютерного моделювання в програмі QForm UK за допомогою вбудованого в програму інструменту, такого як «підпрограми користувача».

АВТОМАТИЧНІ ЛІНІЇ З ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ РЕСУРС ОБОРОННОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ ЧАС

Д. Ю. Канівець, О. М. Несвіт

Машинобудівний фаховий коледж СумДУ, м. Суми

У воєнний час промисловість відіграє вирішальну роль у зміцненні обороноздатності держави. Від ефективності та швидкості виробництва деталей і комплектуючих залежить робота оборонного комплексу. За умов дефіциту ресурсів і кадрів автоматизація стає ключовим шляхом підвищення продуктивності. Автоматичні лінії з обробки металів забезпечують безперервне, точне й гнучке виробництво, сприяючи технологічній стійкості та ефективності промисловості України.

У воєнний час особливо важливим стає швидке та якісне виготовлення деталей для військової техніки й обладнання, адже від цього залежить обороноздатність держави. За умов обмежених ресурсів і нестачі кадрів ключову роль відіграють автоматичні лінії з обробки металів, що забезпечують високу продуктивність, точність і безперервність виробництва.

Автоматичні лінії дозволяють виконувати більшість технологічних операцій без безпосередньої участі людини. Це значно підвищує продуктивність і знижує ризик помилок. Машини працюють за заданими програмами, дотримуючись точності, яку важко досягти вручну. Саме ця точність є критично важливою під час виготовлення військових деталей, де навіть найменше відхилення може вплинути на надійність техніки [1].

Ще однією перевагою автоматизації є стабільність процесу. Автоматичні лінії можуть працювати цілодобово, без втоми та впливу людського фактора. Це забезпечує безперервне виробництво у воєнний період, коли час має величезне значення.

Крім того, сучасні лінії з числовим програмним керуванням можна швидко переналаштовувати під різні вироби. Наприклад, протягом кількох годин завод може перейти від виготовлення корпусних деталей до виробництва запчастин для бронетехніки чи безпілотників. Така гнучкість робить автоматичні лінії незамінними у військовій промисловості. Важливо й те, що автоматизація допомагає зменшити кількість відходів металу. Точна обробка дозволяє максимально ефективно використовувати матеріал, що особливо актуально під час дефіциту сировини. Окрім того, автоматичні системи контролюють стан обладнання, попереджаючи поломки, які можуть призвести до простою виробництва [2].

У перспективі розвиток автоматичних ліній з обробки металів стане одним із ключових напрямів модернізації української промисловості. Подальше впровадження цифрових технологій, забезпечить ще вищу точність, енергоефективність і швидкість виробництва. Це дозволить не лише задовольняти потреби оборонного комплексу у воєнний час, а й створити потужний технологічний потенціал для післявоєнного відновлення економіки.

Літературні джерела

1. Автоматизовані лінії для обробки металу: плюси і мінуси. Metalloobrabotka.org.ua. URL: https://metalloobrabotka.org.ua/ua/avtomatyzovani-liniyi-dlya-obrobky/?utm_source
2. Plan Ukraine Facility (2024). URL: https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/plan-ukraine-facility.pdf?fbclid=IwY2xjawGYNuBleHRuA2FlbQIxMAABHZGwLj7tVTkp1_xW_vzf8dEP66OhRaRS7jUN18PBTNqp4AwDfP_KJRIAGg_aem_olbe89k0iRgJDAYvIegIIQ

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСУ НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ЗАЛІЗА ГАЗОМ СО ПРИ ВІДНОВЛЕННІ З ВЮСТИТУ

С. П. Пантейков к.т.н., доц., А. А. Романенко, Я. І. Бондаренко

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Відновлення заліза з його оксидів (залізорудних матеріалів) відбувається ступінчасто – послідовним відщепленням кисню від оксидів – початкового і проміжних, що утворюються в ході відновного процесу. Відновлене залізо завжди навуглицюється до стану чавуну, при цьому вважається, що процес навуглицювання відбувається за рахунок реакцій взаємодії заліза як із газом СО, так і з твердим вуглецем коксу (або вугілля). Ці наукові положення також викладаються у різних літературних джерелах і на інтернет-ресурсах.

Неминучість навуглицювання відновленого заліза як в доменній печі, так і в інших відновних агрегатах, виключає можливість отримання кінцевого продукту у вигляді чистого (безвуглицевого) або низьковуглицевого заліза (сталі). У зв'язку з цим актуальності набувають питання термодинамічного аналізу процесів навуглицювання заліза при його відновленні з вюститу, насамперед, за рахунок газу СО. Термодинамічні дослідження умов перебігу хімічних реакцій навуглицювання відновленого заліза газом СО буде сприяти правильному розумінню процесу прямого відновлення заліза із залізорудної сировини (газом СО і твердим вуглецем) з подальшим його навуглицюванням у металургійних відновних печах з метою створення достовірної фізико-хімічної моделі цього процесу. Це необхідно також для подальшого теоретичного обґрунтування та промислової розробки інноваційних технологій одностадійного отримання безпосередньо із залізистих сировини рідкої сталі замість рідкого чавуну (або його гранульованого аналога), тобто виключивши (як це відбувалося в різних сиродутних горнах у давнину) проміжну стадію отримання чавуну, що в сучасних відновних печах не вдається здійснити до сьогоднішнього дня, не зважаючи на існування у світовому металургійному виробництві великої кількості технологій прямого відновлення заліза.

Результати проведеного термодинамічного аналізу з використанням отриманих виразів [1] для розрахунку вільної енергії Гіббса для хімічних реакцій непрямого відновлення заліза з вюститу та навуглицювання заліза газом СО дозволили встановити, що навуглицювання відновленого заліза за допомогою газу СО (поряд з неможливістю відновлення заліза з вюститу газом СО понад 765°C, що було встановлено раніше [2, 3]) практично не відбувається або ступінь навуглицювання заліза мізерно мала, що добре кореспондується з даними деяких літературних джерел. Зроблено попередній висновок (який потребує свого подальшого підтвердження) про можливість навуглицювання відновленого заліза при його відновленні з вюститу виключно за рахунок твердого вуглецю.

Літературні джерела

1. Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій навуглицювання заліза газом СО при відновленні з вюститу. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки*. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2024. Вип. 49, том 1. С. 175–183. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243>
2. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом СО і газифікації твердого вуглецю за існуючими формулами і за стандартними значеннями ентальпії та ентропії речовин. *Збірник наукових праць ДДТУ: (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ, 2021. Випуск 2 (39). С.16–26. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2>
3. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом СО і газифікації твердого вуглецю за мірами хімічної спорідненості речовин до кисню. *International Science Journal of Engineering & Agriculture (Poland)*. Volume 1, Issue 2, June 2022. P. 1–8. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220102.1>

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСУ НАВУГЛЕЦЮВАННЯ МАРГАНЦЮ ГАЗОМ СО ПРИ ВІДНОВЛЕННІ З МАНГАН МОНООКСИДУ

С. П. Пантейков к.т.н., доц., Я. І. Бондаренко, А. А. Романенко

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Відновлення марганцю з його оксидів, які входять до складу як залізовмісної, так і марганцевмісної сировини, є ступінчастим процесом, що супроводжується зменшенням ступеня окислення марганцю внаслідок послідовного відщеплення кисню від його оксидів (початкового і проміжних, що утворюються в ході відновного процесу).

У промислових умовах основним способом отримання марганцю є його термічне відновлення за допомогою газоподібного монооксиду вуглецю (газу СО) і твердого вуглецю С (коксу або вугілля). Як і у випадку з залізом, вважається, що в процесі відновлення марганець взаємодіє з відновниками (СО і С), що призводить до утворення марганцевих карбідів або розчинення вуглецю в марганці. У літературних джерелах та на сучасних наукових інтернет-ресурсах також надається інформація про механізми відновлення марганцю і супутні реакції його навуглецювання.

Високий афінитет марганцю до кисню та складність його повного відновлення без супутнього навуглецювання ускладнюють відновлення чисто марганцю (без утворення його карбідів) у залізі або отримання марганцевистих низьковуглецевих сплавів (Fe-Mn і Si-Mn) без подальших стадій очищення. Це зумовлює необхідність глибокого термодинамічного аналізу процесів, що пов'язані з відновленням марганцю з його оксидів, зокрема з MnO, за участю газу СО та твердого вуглецю С. У зв'язку з цим актуальними стають питання термодинамічного аналізу процесів навуглецювання марганцю під час його відновлення з монооксиду марганцю, насамперед за рахунок газу СО, з метою з'ясування можливості перебігу цього процесу.

Термодинамічні дослідження хімічних реакцій непрямого відновлення Mn з Mn та навуглецювання марганцю газом СО із використанням власних виразів для обчислення зміни числових значень вільної енергії Гіббса дають змогу оцінити ймовірність перебігу процесу навуглецювання марганцю газом СО за конкретних температурних режимів. На основі розрахунків встановлено, що за певних температур реального відновного процесу навуглецювання марганцю в газовій фазі за участю СО є малоімовірним і практично не відбувається (поряд з неможливістю відновлення Mn з MnO газом СО, що було встановлено раніше [1, 2]). Такий висновок узгоджується з окремими літературними даними і дає підстави припустити (дане припущення потребує свого подальшого підтвердження), що основним механізмом навуглецювання є взаємодія відновленого марганцю з твердим вуглецем.

Отримані результати є важливими для побудови достовірної фізико-хімічної моделі процесу прямого відновлення марганцю. Це також необхідно для розробки та вдосконалення технологій одностадійного виробництва низьковуглецевих марганцевих сплавів без подальшого рафінування, а також при розробці технологій прямого відновлення заліза для отримання сталі.

Літературні джерела

1. Пантейков С. П., Бондаренко Я. І., Романенко А. А., Узунов І. І. Аналіз процесів ступінчастого відновлення марганцю з його діоксиду газом СО і газифікації твердого вуглецю з позицій термодинаміки. *Сучасні проблеми металургії*. № 27. 2024. С. 141–158. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2024.01.10>

2. Пантейков С. П., Бондаренко Я. І., Романенко А. А., Узунов І. І. Розрахунок термодинамічних температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення марганцю з його діоксиду газом СО і газифікації твердого вуглецю за мірами хімічної спорідненості речовин до кисню. *Збірник наукових праць ДДТУ: (тематичний випуск) «До 95-річчя кафедри металургії ім. проф. В.І.Логінова ДДТУ»*. Кам'янське: ДДТУ. 2024. С. 63–75. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.6>

UDC 622.78 : 669.162.21

INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE PROCESSES OF SOFTENING AND MELTING OF PELLETS IN A BLAST FURNACE

O. S. Nesterov Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., L. I. Garmash Cand. Sc. (Engin.), K. P. Lopatenko, M. G. Boldenko, O. L. Chaika Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res., V.R. Shcherbachov

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The influence of hydrogen on the softening-melting processes of various types of iron ore materials in the blast furnace is a complex and multifaceted topic, and no unanimous opinion regarding its effect has been reached so far. Literature sources demonstrate significant differences in their conclusions, although there is no doubt that hydrogen addition has a substantial impact on the characteristics of the cohesive zone in the blast furnace – the area where materials soften and melt, thereby restricting gas flow and the permeability of iron ore burden. Some researchers argue that with an increase in hydrogen content from 0% to 10% the initial and final softening temperatures of pellets rise, and the softening range expands due to the acceleration of burden reduction by hydrogen [1]. Others, on the contrary, state that with an increase in hydrogen concentration from 0% to 12%, the initial softening temperature decreases [2].

In the laboratory conditions of the Iron and Steel Institute studies were carried out on the high-temperature properties of Ukrainian pellets of two types: fluxed (Fe=67.0, FeO=1.0, SiO₂=2.7, CaO=2.75) and non-fluxed (Fe=65.4, FeO=0.79, SiO₂=3.5, CaO=0.35) with the addition of hydrogen (in the amount of 0-20%) to reducing gas mixtures. The fluxed, high-basicity pellets demonstrated better softening-melting characteristics – the thickness of the cohesive zone for them was smaller than for the acid ones. With an increase in hydrogen content in the gas mixture, all characteristic temperatures rise: for non-fluxed pellets, the temperature of gas-permeability loss (T_{gp}) increases by ~90 °C, the initial filtration temperature (T_{if}) by ~30 °C, and the maximum filtration temperature (T_{mf}) by ~80 °C; for fluxed pellets, the temperatures also increase, but only up to a 10% H₂ content in the gas mixture: T_{gp} and T_{if} by ~20 °C, and T_{mf} by ~115 °C. At the same time, the softening and melting ranges decrease, the cohesive zone narrows, which improves the burden permeability. This can be explained by several factors. The smaller size of H₂ molecules and their higher diffusion coefficient compared to CO accelerate the reduction rate and raise the softening temperature, while the high diffusivity of hydrogen prevents the formation of a dense iron shell on the surface of the pellets, which otherwise would weaken their resistance to deformation.

Hydrogen enrichment in a blast furnace is an important step towards reducing carbon consumption and CO₂ emissions, as well as improving the technological performance of the furnace, mainly by optimizing the softening-melting behavior and cohesion zone dynamics. The research results show that the addition of hydrogen to reducing gas mixtures generally has a positive effect on the high-temperature properties of Ukrainian pellets.

References

1. Qiang Li, Jing Song Wang, Guang Wang. Softening and melting behavior of ferrous burden in hydrogen-rich blast furnace blowing break and re-blowing. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65(6). P. 825–832. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-247>
2. Lan C., Hao Y., Shao J. Effect of H₂ on Blast Furnace Ironmaking: A Review. *Metals*. 2022, Vol. 12. P. 1864. <https://doi.org/10.3390/met12111864>
3. Guilin Wang, Gele Qing, Meng Xu, Zhixing Zhao, Rongsheng Li and Yang Li. Softening-melting mechanism of basic pellets under hydrogenenriched reduction. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65(6). P. 803–810. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-366>

HYDROGEN ENRICHMENT OF REDUCING GAS AND ITS EFFECT ON THE SOFTENING–MELTING BEHAVIOR OF SINTER IN THE BLAST FURNACE

O. S. Nesterov Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., L. I. Garmash Cand. Sc. (Engin.), K. P. Lopatenko,
M. G. Boldenko, B. V. Cornilov Cand. Sc. (Engin.), V. I. Vishnyakov

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The enrichment of reducing gas with hydrogen in the blast furnace process exerts a complex influence on the softening-melting behavior of iron ore materials and on the dynamics of the cohesive zone – a key region that governs gas permeability and overall smelting efficiency. The impact of hydrogen on the softening and melting behavior of sinter has been the subject of extensive investigation, as it may result in either beneficial or adverse effects. Given the heterogeneous structure of sinter and the presence of phases such as calcium and aluminum silico-ferrites, their reduction in an H₂-enriched atmosphere can lead to intensive material degradation, reduced bed permeability, and the formation of liquid phases. Several studies have reported that increasing the hydrogen content in the reducing gas lowers the initial softening temperature of sinter, which is attributed to the intensified formation of FeO both on the surface and within the particles. This, in turn, promotes the formation of low-melting slag with gangue components [1]. Other investigations, however, suggest a gradual rise in the initial softening temperature, associated with a higher reduction degree, reduced FeO content, and the formation of metallic iron [2]. Consequently, the available data remain inconsistent, and the scientific community has yet to reach a consensus on this issue [3].

Laboratory studies conducted at the Iron and Steel Institute using a proprietary methodology for evaluating the softening-melting characteristics revealed the high-temperature behavior of Ukrainian sinter (Fe_{3at}=58.9, FeO=6.95, SiO₂=5.29, CaO=8.34). The results demonstrated that hydrogen addition exerts an overall positive influence on both the reduction and softening-melting processes. Specifically, the temperatures corresponding to gas-permeability loss and melt filtration through the coke bed increased. In the absence of hydrogen, a gas-impermeable structure formed at approximately 1390 °C. When hydrogen content in the reducing gas was raised to 10%, this temperature increased to about 1500 °C. The softening and melting temperatures rose by roughly 50-70 °C. The upward shift in the onset of melting and maximum melt filtration temperatures with increasing hydrogen concentration resulted in a narrower melting interval, thereby improving burden permeability and enhancing smelting efficiency. In summary, the enrichment of reducing gases with hydrogen optimizes the metallurgical properties of sinter within the high-temperature zone of the blast furnace, serving as a key factor in improving the stability and efficiency of the smelting process. This effect can be attributed both to the smaller molecular size and higher diffusivity of H₂ compared with CO – which enhance the reducing potential of the gas, accelerate the reduction rate, and raise the temperature of gas-permeability loss – and to specific morphological features of the sinter, such as the absence of fayalite, its substitution with dicalcium silicate Ca₂SiO₄, and the dissolution of MgO within the wüstite phase.

References

1. Hoque M. M., Mitra S., Barrett N., O'Dea D. and Honeyands T. Effect of hydrogen on voidage and permeability of ferrous burden in softening and melting process. *Conference Paper*. September 2023. <https://www.researchgate.net/publication/375695812>
2. Qiang Li, Jing Song Wang, Guang Wang. Softening and Melting Behavior of Ferrous Burden in Hydrogen-rich Blast Furnace Blowing Break and Re-blowing. *ISIJ International*. 2024. Vol. 65(6). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-247>
3. Guilin Wang, Gele Qing, Meng Xu, Zhixing Zhao, Rongsheng Li and Yang Li. Softening-melting Mechanism of Basic Pellets under Hydrogenenriched Reduction. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65(6). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-366>

PROSPECTS FOR THE USE OF HYDROGEN IN THE OPERATING CONDITIONS OF BF №3 PJSC "ZAPORIZHSTAL"

**O. L. Chaika, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., B. V. Kornilov, Cand. Sc. (Engin.),
A. O. Moskalyna, Cand. Sc. (Engin.), I. G. Muravyova, Dr. Sci. (Engin.), Sen. Res.,
L. I. Garmash, Cand. Sc. (Engin.), M. G. Ivancha, M. M. Iziumskyi**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

In recent years, due to the global trend of reducing CO₂ emissions, interest and the number of publications devoted to the research and development of hydrogen application technology in various fields of science and technology have increased, including in the field of cast iron production as an alternative and replacement for carbon-containing fuels, which, as a result, contributes to the reduction of CO₂ emissions. In the world, at the level of state policy, more and more attention is paid to the development of hydrogen direction, and hydrogen energy is gaining more and more support not only at the corporate but also at the state level. Hydrogen energy, with its diverse sources, low carbon emissions, high efficiency and wide range of applications, is considered the most promising and environmentally friendly energy in the 21st century and is included in the national energy development strategy of many countries.

However, despite the advantages of using hydrogen in the direction of decarbonization of industry in general and metallurgy in particular, there are also certain problems with the use of hydrogen that may require solutions: the high cost of producing environmentally friendly hydrogen; storage and transportation of hydrogen; features of hydrogen combustion, which may require changes to the method of supplying hydrogen to the tuyeres and the design of tuyeres.

The issue of the high cost of hydrogen and its transportation, in our opinion, can be solved by installing and using small-modular high-temperature nuclear reactors at metallurgical enterprises for hydrogen production and energy supply to the plant.

Despite the problems listed above, the issue of using hydrogen in metallurgy in general and the blast furnace in particular, as the most energy-intensive unit in the metal production cycle, is relevant from the point of view of reducing carbon dioxide emissions.

Given that the most common additional fuel used in a blast furnace today is pulverized coal injection (PCI), a rational approach may be to use PCF and hydrogen together in a blast furnace. This approach will solve several problems - to ensure a low cost of metal and reduce CO₂ emissions from the blast furnace.

The analysis of the impact of the joint injection of hydrogen and PCI into the tuyeres of the hearth on CO₂ emissions and blast furnace performance of BF № 3 and the determination of restrictions on the use of H₂ in the furnace were performed using the model of the complete energy balance of blast furnace, which includes a joint calculation of thermal, material and exergy balances.

Joint injection of PCI and hydrogen imposes restrictions on the theoretical combustion temperature in the tuyeres (RAFT). According to research and our own experience, it has been established that at high PCI consumption, RAFT should be no less than 2050-2100°C. Therefore, consideration of reducing RAFT to 1800°C may be appropriate only in the conditions of hydrogen use. In the analysis of joint use of PCI and hydrogen, RAFT was assumed to be constant at the level of the base period of operation of BF № 3 of PJSC "Zaporizhstal" ~2080°C.

When using additional fuel blown into the tuyeres, to maintain RAFT at a given level is carried out by increasing the flow rate of technical oxygen in the blast. An increase in the oxygen content in the blast leads to intensification of blast furnace melting and imposes technical and technological restrictions on the operation of the furnace. On the one hand, the intensification of melting leads to a faster lowering of the charge, which increases the load on the charge feeding system and the loading of the blast furnace. On the other hand, an increase in the proportion of oxygen in the charge can lead to increased loads on the furnace cooling system, the condition of the lining and the units servicing it. Regarding the operating conditions of BF № 3, a limitation of the oxygen content in the blast is determined at 31%, which, with the support of RAFT ~2080°C, is equivalent to blowing 175 m³/t together with a PVP flow rate of 160 kg/t.

According to the results of analytical and experimental studies, it was found that the use of hydrogen in a blast furnace leads to a redistribution of the gas flow in the furnace volume, which ultimately affects the reduction of the top gas temperature. Based on the analysis performed, it was found that the use of hydrogen at a flow rate of 175 m³/t leads to a reduction of the top gas temperature by 60°C (3.4°C for every 10 m³/t of H₂). This may be a limiting factor in increasing the hydrogen flow rate for blast furnaces operating with cold sinter. For the conditions of PJSC

Zaporizhstal, the top gas temperature is not a limiting factor, since all blast furnaces operate with sinter at a temperature of 250-400°C.

As a result of the study, it was found that the joint injection of PCI and hydrogen at BF № 3 will allow:

- reduce CO₂ emissions by at least 11%, with a coke replacement rate of 0.27 kg/m³;
- reduce the proportion of direct iron reduction by 0.9% for every 10 m³/t of hydrogen. This contributes to reducing the intensity of the blast furnace process and the specific energy consumption for the production of each ton of pig iron;
- increase the output of secondary energy resources from the blast furnace by 2.7% for every 10 m³/t of H₂, which is advisable to use for the operation of the CHPP;
- improve exergy indicators: increase the efficiency of the blast furnace by ~2% and the environmental friendliness of the blast furnace operation by 2.8%.

Based on the above, it has been established that the use of hydrogen together with PCI in a blast furnace is a promising direction for reducing CO₂ emissions and reducing coke consumption in a blast furnace.

PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS OF THE POSSIBILITY AND FEASIBILITY OF THERMAL DECOMPOSITION OF IRON OXIDES

T. S. Golub, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., **L. S. Molchanov**, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Iron-carbon alloys still retain their leadership among structural materials due to their technological and economic accessibility. However, the main route of their production - the “blast furnace - oxygen converter” chain - has a significant environmental impact on the environment, in particular, emitting tons of greenhouse gases. This has been forcing researchers and practitioners to look for new ways to obtain iron-carbon alloys for more than one decade, among which the largest share is made up of direct reduction methods. However, all existing direct reduction methods require the participation of a reducing agent, which is most often carbon or its oxides, or hydrogen. Accordingly, under the conditions of using carbon-containing materials, the new process does not differ much from its predecessor in terms of environmental impact. The use of hydrogen is the most acceptable option with the formation of environmentally safe products as a result. However, an ecological method of its formation in the quantities necessary for reduction in industrial conditions without significant energy investments has not yet been developed. An alternative to direct reduction can be the process of direct decomposition - thermolysis. This long-known process has not gained popularity due to the high temperature limitations for iron oxides (for example, for FeO, a temperature of 3500 °C is required). However, it is known that decomposition processes can be influenced not only from the point of view of temperature, but also from the point of view of the partial pressure of oxygen in the environment. The work presents a thermodynamic study of the decomposition process of iron oxides of the Fe₂O₃-Fe₃O₄-FeO system under conditions of elevated temperatures and the influence of reduced pressure (including the partial pressure of oxygen). It was established that for the analyzed system of iron oxides under conditions of decreased pressure up to $1 \cdot 10^{-5}$ atm, it is possible to achieve a decrease in the temperature of the onset of oxide decomposition by 1.35-1.68 times.

PHYSICAL AND NUMERICAL STUDY OF GASDYNAMIC PROPERTIES OF JETS FORMED BY COMPOSITE NOZZLES DURING TOP BLOWING

**T. S. Golub, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., L. S. Molchanov, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
O. M. Minai, Ph D. (Engin.)**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The oxygen converter process, as the most profitable method of steel smelting in the world at the moment, is in a dynamic state of constant improvement. Most often, improvements concern the design and operating modes of the top blow lance. This is due to its key influence on the oxygen converter process: the formation of a high-speed (supersonic) jet of oxygen flowing from the nozzles of the lance for effective interaction with the liquid bath - iron-carbon melt. The characteristics of the jets determine the hydrodynamic, physicochemical, heat and mass transfer processes that occur in the converter bath [1]. To ensure these conditions, it is necessary to provide the gas jet with sufficient kinetic energy at the outlet of the blow nozzle with the achievement of supersonic speed indicators. Accordingly, to solve the problem, since the middle of the twentieth century, instead of cylindrical nozzles, which provide only subsonic characteristics of the gas jet flow, convergent-divergent nozzles of the Laval type began to be used. Since then, researchers have repeatedly tried to improve the above design: a shortened nozzle - to reduce energy loss, an elongated "throat" and an ideally calculated one to reduce shock waves, with a cylindrical outlet to lengthen the jet [2-3]. Among the various designs of blowing nozzles, a special place is occupied by composite nozzles, which consist of several parts and simultaneously form different interacting flows. The work presents the results of a physical study on a water model blown with compressed air and a numerical study in the ANSYS environment of blowing through composite nozzles formed by two concentrically arranged cylinders with different ratios of the peripheral and central parts (25 %, 50 % and 75 % of the total nozzle area) in comparison with blowing through Laval nozzles with the same equivalent radii and under equal blowing conditions. A number of important features of gas jets flowing from composite type nozzles were revealed:

1) the fraction of the peripheral part of the composite nozzle is largely responsible for the hydro-gas-dynamic characteristics of gas jet formation:

- under conditions of a small peripheral fraction (25 %), the jets flowing from composite nozzles are similar in structure and nature of interaction with the liquid bath to those formed when blowing through the Laval nozzles (the jet has a "barrel-shaped" single-chain structure, the immersion crater in shape and depth approaches that of the jet from the Laval nozzle). The increase in the peripheral fraction to 50 % and further to 75 % is reflected in the change in both the structure of the jet and the features of the interaction with the liquid bath (the jet acquires a complex intertwined structure in the middle of each large "barrel", the crater of interaction becomes more gentle, rounded and the depth is significantly reduced).

- the larger the peripheral part of the folded nozzle, the fewer splashes are formed during the blowing of the liquid with the transition to a fine "mist". This can probably be explained by the formation of a larger number of small waves on the surface of the bath under the action of the composite nozzles and the reduction of the distance between them to 50 % compared to blowing through the Laval nozzle.

2) jets flowing from composite nozzles are characterized by significant energy indicators (at the same level or higher than jets formed by the Laval nozzles) with a core length shorter by 15 – 33 %, respectively, with an increase in the peripheral share from 25 % to 75 %.

References

1. Li M.M., Li Q., Li L., He Y.B., Zou Z.S. Effect of operation parameters on supersonic jet behaviour of BOF six-nozzle oxygen lance. *Ironmaking & Steelmaking*. 2014. Vol. 41(9). P. 699–709. <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.00000000154>
2. Ali M.H., Mashud M., Bari A.A., Islam M.M. Numerical solution for the design of minimum length supersonic nozzle. *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7(5). P. 605–612.
3. Thirugnanasambantham K.T., Elangovan B., SreeRangaiah S., Kannan R., Palani S., Nachiappan M.N. Optimization of the convergent-divergent nozzle tip and reducing the acoustic energy. *Turkish Journal of Engineering*. 2015. Vol. 9(3). P. 417–424. <https://doi.org/10.31127/tuje.1561759>

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MEASURES TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF CONVERTER SMELTING IN THE CONDITIONS OF PJSC "KAMET-STEEL"

L. S. Molchanov, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., A. H. Cherniatevych, Dr. Sc. (Engin.), Prof.

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The development of technical solutions and technologies aimed at reducing CO₂ emissions and saving raw materials and energy resources allows increasing of the competitiveness of metallurgical enterprises with unstable supply of their materials. The choice of decarbonization directions at metallurgical enterprises of Ukraine is connected with investment opportunities and solving the problem of producing high-quality competitive metal products while ensuring the resource and efficiency requirements of the technological process along the "blast furnace – oxygen converter" route. In the conditions of the most widespread in world practice technology of oxygen-converter smelting with combined blowing of the bath with oxygen from above through a conventional multi-nozzle lance and neutral mixing gas (nitrogen, argon) through the bottom, the maximum amount of recycled scrap metal in the charge (scrap metal + liquid hot metal) is 25 % [1]. Regardless of the price of scrap metal and liquid iron, modern environmental standards of industrially developed countries force iron producers to reduce the production of the latter as the main source of CO₂ emissions into the environment with an increase in the share of scrap in the charge. The work presents the results of a physical and mathematical study of ways to increase the share of scrap metal by preheating it in a 250-ton converter for the conditions of the converter shop of PJSC "KAMET-STEEL" by using new designs of fuel-oxygen lances, as well as subsequent blowing of the melt using a multi-purpose dual-circuit oxygen lance, which provides the functions of energy-efficient combined blowing of the converter bath with postcombustion of exhaust gases when supersonic and sonic oxygen and nitrogen jets are supplied from above with simultaneous injection through the bottom of the unit of neutral mixing gases (nitrogen, argon). An important final step in the steelmaking cycle is the application of slag garniture to the converter lining in order to extend the converter's operating campaign. The following new energy-efficient lances and methods of converter smelting have been proposed for implementation in the post-war period of the country's recovery. They can ensure an increase in the share of metal scrap in the metal charge: a fuel-oxygen lance for heating scrap in the converter in a vertical position using pulverized coal fuel (PCF) or natural gas (NG) (equipped with a head with 6 Laval oxygen nozzles and with cylindrical fuel nozzles in each of them and scrap heating technology with the supply of PCF or NG in an annular oxygen shell); design of a rotating fuel-oxygen lance for heating scrap with a horizontal converter position (equipped with a head with 10 cylindrical nozzles of the "pipe in pipe" type, placed in 5 rows along the length of the lance barrel and technology for heating scrap with the supply of PCF or NG in an annular oxygen shell); energy-efficient technology of combined blowing of the converter bath with oxygen from above and neutral mixing gas (nitrogen, argon) through the bottom using a new design of a double-circuit lance (contains a double-row 15-nozzle head: 5 Laval nozzles and 10 cylindrical ones).

References

1. Boichenko B.M., Okhotskii V.B., Harlashin P.S. *Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit designs, material recycling and ecology*. Dnipropetrovsk: RVA "Dnipro-VAL", 2004. 454 p. (in Ukrainian)

COMPARISON OF THE RESULTS OF LOW-TEMPERATURE AND HIGH-TEMPERATURE MODELING OF TOP BLOWING OF A TWO-PHASE LIQUID SYSTEM USING THE SAME NOZZLE

L. S. Molchanov, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., **A. H. Cherniatevych**, Dr. Sc. (Engin.), Prof.,
T. S. Golub, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., **Ye. S. Kakushkin**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The most common way to improve the technical and economic indicators of the steelmaking process in oxygen converters is to develop new designs of blowing devices or to improve existing ones. This is especially true of the top blowing lance, which plays a leading role in the converting process. A mandatory stage in improving the design of oxygen lances and developing their operating modes is to check its efficiency under the conditions of blowing a liquid bath. Such a check can be done either on a real industrial facility (an extremely risky method due to the possibility of an accident or loss of unit productivity), or on a physical model or by mathematical modeling (with validation of the results on a physical model). The most indicative is physical modeling, which can be carried out either on a real metal melt with oxygen blowing (a complex and expensive method) or using water and oil as model media, imitating metal and slag melts, with air blowing (an accessible, simple method). During modeling, it is mandatory to use similarity coefficients that take into account the difference in geometric dimensions and physical properties of model media from real ones. However, low-temperature modeling can still provide qualitative results. To move to quantitative indicators that would correspond to the real process, it is necessary to understand more deeply the correspondence of the processes occurring during blowing of the water model and the real metal melt. This can be done under the conditions of using the same blowing devices and similar technological modes (the difference then consists only in the peculiarities of the interaction of the same gas jets with the model medium). Therefore, it is very relevant to conduct research on the comparative analysis of the results of low-temperature and high-temperature modeling of the blowing processes a liquid bath under the conditions of using the same blowing devices and maximum similarity of the technological conditions of blowing. The analysis was carried out based on the results of physical low-temperature (on a 6 kg water model with the addition of 600 g of polymethyl silicone oil) and high-temperature (on a 60 kg model of an oxygen converter with blowing of liquid iron with the addition of 2 kg of lime for slag formation) modeling under the conditions of blowing with the top three-nozzle lance (nozzle diameter $1.5 \cdot 10^{-3}$ m, inclination angle to the lance axis 14 degrees). The gas pressure was up to 300 kPa.

According to the results of the research, it was established: 1) when using polymethyl silicone oil, it is possible to simulate the interaction of the liquid with the gas jet, which in the real process occurs in the final period of blowing, when the slag bath somewhat “settles” and “exposing” the metal is observed due to the retreat of the slag from the center of the bath under the action of the gas jet. 2) According to the specified period, the foaming height of the second phase under low-temperature modeling conditions differs by 13 – 20 % from the real foaming height of the slag. This allows us to evaluate and separate the influence of the top gas jets on the foaming of the slag and the influence of the lifting force of CO gas bubbles formed in the real bath due to the decarburization reaction.

BENCH RESEARCH ON ELECTRICAL DISCHARGE ACTIVATED OXYGEN GAS JET FLOWING FROM THE TOP BLOWING NOZZLE

**S. I. Semykin, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., T. S. Golub, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
S. O. Dudchenko, Cand. Sc. (Engin.), V. V. Vakulchuk, Cand. Sc. (Engin.)**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Today, the share of steel smelted in oxygen converters remains at a significant level, despite the active development of modern steelmaking processes. Such high competitiveness is due to the constant active development of the converting process in the direction of increasing both technological indicators and environmental friendliness of the process. The main sources of environmental pollution, which are formed by the activity of the oxygen converter process, are the release of gas with a large share of CO and CO₂ and dust emission. They are formed as a result of the interaction of key process factors: a high-speed gas oxygen jet flowing from the top lance and a slag-metal liquid bath, under conditions of sufficiently high temperatures and as a result of the course of chemical oxidation reactions, primarily of carbon, as the main component of the iron-carbon melt. The most common direction of increasing the technological and environmental indicators of converter process is currently the direction of increasing the share of scrap metal that is processed, with a decrease in the consumption of hot metal and lime, the production of which is associated with the formation of carbon oxide emissions [1]. This is possible under conditions of increasing the thermal state of the bath and intensive flow of exchange processes. One of the ways to intensify the oxygen converter process can be the use of ozone, which is much more active than oxygen, but unstable at the temperatures of oxygen-converter smelting [2]. The work presents the results of a study of the method of ozone formation directly at the outlet of the top blow lance through the use of a spark electric discharge. The main goal was to determine the possibility of using a laboratory sample of a blow lance for blowing iron-carbon melt by assessing the distribution of ozone along the length of the gas jet. The studies were conducted on a laboratory stand for determining ozone concentration using a Cyclone 5.21 ozon meter and a model of a top oxygen lance equipped with an ozone generation device by means of a spark electric discharge at the outlet of the nozzle. According to the results of the studies, it was noted that ozone was created by a spark discharge in front of the blow device at a distance of 5 – 7 calibers (concentration surge) and then mixed with the gas flow and moved along the jet. This caused a decrease in ozone concentration along the jet depending on the blowing pressure. At a gas pressure of 50 – 100 kPa at a distance of 10 to 40 calibers, a decrease in ozone concentration by 15 – 20 % for every 10 calibers was noted. At a gas pressure of 200 kPa, the decrease in concentration was 30 – 35 % for every 10 calibers. At the same time, at a distance of 40 calibers, which corresponds to the working position of the blowing lance in the oxygen converter according to the calm bath, the amount of ozone was about 2.5 mg/m³ at a gas pressure of 50 – 100 kPa, and at a pressure of 200 kPa – 1.5 – 2 mg/m³. However, it should be taken into account that during real blowing, the steelmaking bath is in constant motion, and for a longer period of time the blowing tip of the lance is immersed in the slag melt as a result of the bath rising. Therefore, it is necessary to take into account the ozone concentration at a distance of 5 – 10 calibers, the level of which is quite higher: at a gas pressure of 50 – 100 kPa at the level of 12 – 20 mg/m³, and at 200 kPa it reached 32 – 35 mg/m³. Therefore, it can be expected that ozone produced in the sublance zone will be able to participate in metal refining processes. Based on the results obtained, an empirical oxygen jet expansion coefficient was developed to estimate ozone productivity.

References

1. Madhavan N., Brooks G., Rhamdhani M.A., Bordignon A. Contribution of CO₂ emissions from Basic Oxygen Steelmaking process. *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 797–815. <https://doi.org/10.3390/met12050797>
2. Vosmaer F. Ozone: its manufacture, properties and uses. Leopold Classic Library, 2015. 232 p.

RESEARCH ON THE PREHEATING PROCESS OF METAL SCRAP USING PULVERIZED COAL FUEL IN AN OXYGEN CONVERTER

**A. G. Chernyatevych Dr. Sc. (Engin.), Prof., A. A. Pokhvalityi Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof.,
D. S. Kondrashenkov**

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

Pulverized coal fuel (PCF) is one of the most promising alternatives to traditional heat carriers in metallurgy due to its high calorific value and economic efficiency. In converter steelmaking, the use of PCF is limited by the risks of local overheating of the charge, difficulties in controlling the combustion process, and incomplete afterburning of exhaust gases. Uneven temperature distribution in the converter cavity may lead to accelerated lining wear and pose a risk of splashes during hot metal charging.

The development of special fuel–oxygen lance with combined injection of PCF in an oxygen stream makes it possible to combine the advantages of pulverized coal fuel with the specific features of the converter process, increase energy efficiency, and reduce dependence on traditional fuels. The urgent challenge is to ensure uniform combustion of PCF and stabilization of the temperature regime, which is critical for preventing local overheating and the formation of a liquid phase.

To identify the regularities of the influence of main factors on the process of scrap preheating using PCF, a design of a fuel–oxygen lance and a laboratory setup were developed. These make it possible to study the combustion characteristics and the heating efficiency of the scrap inside the oxygen converter cavity [1].

Carbon particles of PCF ignite after moisture evaporation and pyrolysis, forming high-temperature (up to 2000 °C) bright flames that effectively heat the surface of the metal scrap. The use of PCF ensures a higher combustion coefficient and more efficient oxygen utilization compared to lump coal, owing to the larger total surface area of the particles and more intensive heat exchange. The time required for the scrap surface to reach 850–870 °C was reduced by about half, with no liquid phase formation observed. An empirical dependence of flame temperature on the specific oxygen consumption (m^3/kg PCF) was established. The most uniform heating without local melting is achieved at 1.0–1.35 m^3/kg PCF [2].

The proposed design of the fuel–oxygen lance enables effective control of the scrap preheating process, reduction of heat losses, minimization of the harmful effects of slag formation, and improvement of the energy efficiency of the converter process. The use of PCF in this format allows shortening the preheating time and reducing the risk of local overheating and lining damage.

References

1. Chernyatevych A. G., Sigarov Ye. M., Molchanov L. S., Pokhvalityi A. A., Kondrashenkov D. S. Ustanovka vysokotemperaturnoho modeliuvannia nahrivu metalevoho brukhtu v konverteri [High-temperature simulation unit for heating metal scrap in a converter]. // Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference “Casting. Metallurgy. 2024” (Kharkiv–Kyiv, May 28–30, 2024). Kharkiv: NTU “KhPI”, 2024. P. 505–507.
2. Chernyatevych A. G., Sigarov Ye. M., Molchanov L. S., Pokhvalityi A. A., Kondrashenkov D. S., Chubina O. A. Videofiksatsiia fizyko-khimichnykh protsesiv u porozhnyni konvertera pid chas nahrivu metalevoho brukhtu [Video recording of physicochemical processes in the converter cavity during scrap heating]. // Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference “Casting. Metallurgy. 2024” (Kharkiv–Kyiv, May 28–30, 2024). Kharkiv : NTU “KhPI”, 2024. P. 507–511.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE THERMAL STABILITY OF A BLAST FURNACE ON THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF SMELTING

Yu. S. Semenov, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The target function of controlling the thermal state of blast furnace (BF) smelting is to maintain the thermal regime at a level that ensures the production of cast iron of a given quality with minimal deviations in the components of its chemical composition. The silicon content in cast iron $[Si]$ is most often used as the main indicator of the thermal state. Most of the methods for predicting $[Si]$ that have become widespread in recent years have a low degree of accuracy due to the multifactorial influence of technological parameters on the thermal state of BF smelting. In addition, the accuracy of these forecasting methods is determined by two main conditions: prompt receipt of the full amount of reliable information about the parameters of the technology and the constancy of fuel and raw material and exhaust parameters. Compliance with the first condition is difficult to achieve, and if the second condition is met, the stability of the thermal state is ensured, which excludes the feasibility of forecasting as such. Therefore, the task of maintaining a stable process, a clear understanding of the degree of influence of certain factors and the promptness of responding to changes is relevant [1].

For the most accurate assessment of the stability of the thermal state of BF smelting, in recent years it has been customary to use the root mean square deviation (RMSD) $[Si] - \sigma[Si]$, which is usually determined within one day of operation of the BF by the number of releases per day. The assessment of $\sigma[Si]$ over a longer time period complicates the analysis of identifying factors that affect $\sigma[Si]$, since the comparison is made relative to the average value of $[Si]$, which can be affected by various factors in each day.

For the operating conditions of BF-1M PrJSC "Kamet-steel" in March–June 2025, the relationships $\sigma[Si]$ from the specific coke consumption (C) and coke equivalent (CE) were obtained using the method of statistical convolution and sorting of daily data, using the adopted coke replacement coefficients with coke nuts (CN) – 0.72 and pulverized coal (PCI) – 0.80. The analyzed period of operation of BF-1M was characterized by the following melting parameters: C–438 kg/t; CE–522 kg/t; $[Si]$ –0.59%; $\sigma[Si]$ –0.058%; PCI–83 kg/t; CN–25 kg/t; daily production–2862 t/day. It should be noted that the analysis was performed for the operating conditions of BF-1M during the period when another BF-9 of the shop was stopped for major repairs, which allowed to avoid certain features of averaging individual parameters between two BF's of the shop.

The obtained dependences: $C=109.68 \cdot \sigma[Si]+431.16$ ($R_{x,y}=0.77$) and $CE=148.04 \cdot \sigma[Si]+513.13$ ($R_{x,y}=0.88$) indicate the influence of the stability of the thermal state on the efficiency of melting and the need to maintain the value of $\sigma[Si]$ no more than 0.060% to obtain high melting performance. To achieve this value of $\sigma[Si]$, it is necessary, first of all, in unstable fuel and raw material conditions: to adhere to the release schedule; to carry out targeted flushing of the BF with hard-to-recover materials when it is clogged; to carry out preventive soft flushing of flux residues and coke waste in the intermediate zone of the BF with a mixture of iron ore materials with a basicity of 0.65–0.85 units; to ensure a uniform distribution of theoretical combustion temperatures along the circumference of the BF by directional regulation of the PCI flow rates through air tuyeres; to use manganese-containing materials in the BF charge to ensure a change in the manganese content in cast iron of not less than 0.20% [1].

References

1. Semenov Yu.S., Podkorytov A.L., Shumelchik E.I. et al. (2021). Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel in Translation*. Vol. 51(4). P. 261–266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>

IMPROVEMENT OF METHODS FOR ESTIMATING THE BURDEN DISTRIBUTION WHEN CHARGING INTO THE FURNACE BY CHUTE-TYPE BELL-LESS DEVICE

V. V. Lebid Cand. Sc. (Engin.)

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Installation of chute-type bell-less top devices (BLT) on blast furnaces of various volumes (in world practice from 600 to 6000 m³), increasing the design options of the charging device and its distribution chute, require taking into account in the algorithms of the models the materials flow parameters coming from the distributor. A calculation method for estimating the distribution of the flow density of charge materials coming from the chute when they are charged into the furnace has been developed. The experimental method has been improved using a sensor measuring probe of an original design, which allowed confirming the reliability of the calculation results in industrial conditions. In a blast furnace with a volume of 1513 m³, it was experimentally established that the width of the flow of materials discharged when using the chute inclination angles in the range of 30°-48° differs slightly and at the charge filling level of 1.0 m is ~0.8 m, and the distribution of the flow density along its width is uneven – the intensive part is shifted to the furnace axis. The obtained computational and experimental data on the patterns of the flow density distribution of the charged burden materials allowed us to improve the method of choosing rational chute inclination angles in working angular positions and to obtain the dependence of the rational number of equal-sized annular zones on the radius of the blast furnace top. Improved calculation methods for assessing the burden distribution were used in the development of a mathematical charging model of BLT, implemented by the ISI in 2019-2020 on a blast furnace with a volume of 2000 m³.

OPERATING RESULTS OF MODERNIZED OXYGEN LANCE TIPS

**A. A. Pokhvalityi Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., Ye. M. Sigarev, Dr. Sc. (Engin.), Prof.,
A. V. Krut, P. L. Gerasymenko**

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

Examines the key factors affecting the service life of welded oxygen lance tips operating under the extreme conditions of converter steelmaking. In particular, the tips are exposed to high temperatures that significantly exceed the melting point of copper (1085 °C), as well as to the action of oxygen blowing, thermal radiation from the reaction zone, and mechanical wear caused by molten metal droplets. Unlike cast or forged–brazed tips, increasing the durability of welded tips, in addition to operating close to the design parameters, depends largely on the quality of welding operations and the resulting weld seams [1]. The main factor limiting the service life of welded tips is the failure of welds, especially at the joint between the Laval nozzle and the outer shell (plate).

During the first stage of testing of experimental tips manufactured using ErCuNi5Fe1 welding wire (GOST 16130-90), the weld seams exhibited a tendency to crack formation in both longitudinal and transverse directions. Chemical composition analysis revealed a significant difference in copper content between the welding wire (92.81 %) and the nozzle material (99.99 %), which creates conditions for the formation of brittle eutectic compounds susceptible to cracking. Copper, particularly when containing impurities such as lead, bismuth, sulfur, and oxygen, is highly prone to hot cracking during welding [3].

To reduce alloying and increase thermal conductivity, CuSn1 welding wire (ISO 24373:2018) with a chemical composition close to that of M1 copper (deviation 0.39 %) was introduced. This made it possible to increase the service life of welded tips from 16–56 heats to 49–245 heats. However, even with CuSn1, cases of water leakage through cracks in the welds were still observed.

Metallographic studies using an “Olympus” microscope confirmed that the causes of cracking include both deviations from the welding procedure (insufficient or excessive heating) and surface contamination with oxides. Examination of welds in a tip with service life exceeding 200 heats revealed lack of fusion and brittle grain boundary structures acting as crack initiation sites.

Recommendations for improving the durability of welded oxygen lance tips include:

- using welding wire with a composition as close as possible to the base metal;
- applying preheating and interpass heating, especially for thicknesses over 10–15 mm;
- hammering (peening) of welded areas after welding;
- thorough cleaning of surfaces from oxides before welding.

Thus, achieving high durability of welded oxygen lance tips requires a comprehensive approach to material selection, welding technology, and design solutions. Further research should focus on optimizing the thermal regime, alloying of welds, and the microstructure of metallic joints.

References

1. Pokhvalityi A. A., Sigarev Ye. M., Chubin K. I., Lobanov Yu. S., Yakunin P. A. Osoblyvosti vyznachennia konstruktsii nakonechnykh kysnevykh furm v nestatsionarnykh umovakh konverternoi plavky z poperednim pidhrivom metalobrukhtu [Features of determining the design of oxygen lance tips under non-stationary converter blowing conditions with scrap preheating]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. 2021. No. 39. P. 9–14. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.3>
2. Sigarev Ye. M., Pokhvalityi A. A., Rudenko M. R., Kondrashenkov D. S., Krut A. V. Vyznachennia faktoriv vplyvu na stiikist zvarnykh nakonechnykh kysnevykh furm [Determination of factors influencing the durability of welded oxygen lance tips]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. 2024. Thematic issue dedicated to the 95th anniversary of the Department of Metallurgy. P. 111–122. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.10>

ANALYSIS OF GAS–LIQUID FLOW FORMATION IN THE TAP CHANNEL OF AN OXYGEN CONVERTER

A. A. Pokhvalityi, Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., O. A. Chubina, Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof.,
A. O. Vovk

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

With the increasing quality requirements for steel and the growing role of secondary metallurgy, improving the tapping process from the converter is becoming particularly relevant. In particular, optimizing the formation conditions of the gas–liquid flow in the tap channel is considered one of the promising directions for ensuring a stable and efficient technological process.

The development of new technical solutions aims to achieve several objectives: improving slag cutoff efficiency, reducing the effect of atmospheric oxygen on the melt, and creating favorable conditions for deoxidation directly during tapping. One of the reserves for intensifying these processes is the use of the potential energy of the melt flowing into the ladle from a height of 5–8 m, which promotes mixing and dispersion of components [1].

To investigate the conditions of gas–liquid flow formation, a model in the form of a flat runner—an analogue of a cylindrical tap channel with coaxially arranged nozzles—was developed. The key variable parameters in the study were gas flow rate (q) and bath level (H) in the converter. The main analysis criterion was the relative vortex depth (K_v), defined as the ratio of vortex depth (Δi) to the tap channel diameter [2].

The studies showed that at high gas flow rates ($q \geq 0.1 \text{ m}^3/\text{min}$), K_v stabilizes within 0.03–0.09, and the influence of the liquid level is insignificant. The flow is characterized by a stable, moderately developed gas–liquid interface. As the gas flow rate decreases to $q \leq 0.05 \text{ m}^3/\text{min}$ and H to 0.25–0.60 m, K_v increases to 0.22–0.65, indicating flow destabilization, vortex deepening, and a decrease in the degree of flow organization.

Based on the experimental data, a classification of flow formation regimes was developed, which takes into account dynamic changes in bath level—unlike previous approaches based on constant geometric nozzle parameters.

Flow regime classification by relative vortex depth (K_v) [2]:

- **regime I:** $K_v > 0.5$ — no intensive mixing of gas and liquid occurs.
- **regime II:** $0.5 > K_v > 0$ — increasing gas flow rate or decreasing bath level reduces vortex depth, promoting intensive mixing of gas and liquid. In this regime, a gas–liquid flow with a well-developed interfacial surface and a high degree of organization is formed.
- **regime III:** $K_v < 0$ — further increasing gas flow rate or decreasing bath level causes central gas breakthrough and transition of the gas–liquid flow to a dispersed–annular regime (“breakthrough regime”), characterized by an increase in the opening angle of the flow’s free surface.

References

1. Pokhvalityi A. A., Sigarev Ye. M., Chubin K. I., Poletaiev V. P., Pokhvalita O. V. Formuvannia hazometalevoho potoku v umovakh “khimichnoho” vakuumu u stalevypusknomy kanalі [Formation of a gas–metal flow under “chemical” vacuum conditions in the steel tapping channel]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. 2019. No. 34. P. 3–8. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.34.2019.1>
2. Vovk A. O., Pokhvalityi A. A. Doslidzhennia umov formuvannia hazoridynnoho potoku pry vypusku plavky z konvertera [Investigation of gas–liquid flow formation during converter tapping]. *Reporter of the Priazovskiyi state technical university. Section: Technical sciences*. 2024. No. 49. P. 200–207. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.45.2024.1>

IMPROVEMENT OF THE IGNITION PROCESS OF SINTERING MIXTURE THROUGH THE DEVELOPMENT OF A BLOCK BURNER WITH SEPARATE AIR SUPPLY

**A. I. Gubarieva, I. M. Koshlyak, R. M. Rudenko, Ye. M. Siharov, Dr. Sc. (Engin.),
M. R. Rudenko, Cand. Sc. (Engin.)**

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The efficiency of the ignition process of the sintering mixture significantly affects the quality of the finished sinter, the uniformity of the sinter structure, the productivity of the sintering machine, and energy consumption. Traditional burner designs for ignition hoods provide only partial control of the heat flow, which leads to local overheating and areas of insufficient heating. As a result, uneven combustion, instability of the ignition front, temperature fluctuations in the bed, and increased nitrogen oxide emissions are observed.

The problem is further complicated by the fact that the sintering mixture layer is heterogeneous in terms of particle size distribution, moisture content, and gas permeability, and therefore requires differentiated heat input. This justifies the need to develop a new type of burner with independent control of air and fuel flows across the width of the ignition hood.

The aim of this work is to improve the efficiency of the ignition process of the sintering mixture by refining the design of a gas burner with separate supply of primary and secondary air. This allows for the adjustment of the ratio between convective and radiant heat transfer components and stabilizes the thermal field in the ignition zone.

The proposed burner has a modular design: it consists of several narrow sections combined into a single block. Each module is equipped with separate channels for supplying gas, primary, and secondary air, as well as control dampers that allow adjustment of the flow ratios. Primary air is supplied to the flame stabilization zone to maintain stable combustion, while secondary air is fed into the terminal part of the flame for staged afterburning of gases, flame temperature control, and the formation of the required oxidizing potential of the flue gases above the sintering mixture bed.

Computational modeling has shown that with separate air supply, more complete fuel combustion can be achieved and the ignition zone temperature can be increased by 60–80 °C at the same gas consumption. Experimental studies confirmed a leveling of the temperature profile across the hood to within $\pm 10\%$, a 10% reduction in ignition time, a 6–10% decrease in specific gas consumption, and a reduction in NO_x emissions of up to 30%.

The developed burner design is compatible with standard ignition hoods of the AKM-75 type without the need to modify the casing. Modularity ensures easy scalability for units of other widths, while separate air supply enables adaptation of heating modes to the current composition and condition of the mixture. In the future, the implementation of an automated air supply control system based on temperature feedback is planned, which will enable the maintenance of a stable flame profile in real time.

INFLUENCE OF BLAST FURNACE INTENSITY ON FORMATION OF CHARGE COLUMN STRUCTURE AND RADIAL GAS DISTRIBUTION

H. Yu. Kryachko, Cand. Sc. (Engin.), Ye. M. Siharyov, Dr. Sc. (Engin.),
M. R. Rudenko, Cand. Sc. (Engin.), S. A. Kholodnyi

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

To study the influence of smelting intensity on the formation of the charge column structure, the results of investigations of the charge column structure in blast furnaces frozen in operation were compared — namely, Japanese blast furnace No. 1 at Amagasaki Works [1] and No. 1 at Hirohata [2]. To investigate the relationship between smelting intensity, gas distribution, and gas permeability of the charge column in blast furnace cross-sections, performance indicators of BF No. 8 of the Dnipro Metallurgical Plant (DMP) with a volume of 1754 m³ were used. This furnace operated at nominal increased intensity in 1979 and at reduced intensity in 1997, depending on production demands.

Based on the analysis of the condition of the charge columns of frozen-in-operation blast furnaces [1, 2], which operated at different smelting intensities, changes in the column structure due to increased process intensification were identified. This increase led to a higher super-tuyere coke layer and its total volume. At the same time, the number of coke windows in the cohesive zone increased, and consequently, the gas permeability of the zone rose. Moreover, intensification reduced or eliminated circumferential irregularity in the formation of the cohesive zone and the coke burden.

Gas distribution was evaluated using two indicators — the unevenness of CO₂ concentration distribution across the furnace radius (V_R) and the degree of peripheral distribution CO_{2P}/CO_{2C}. The stability of radial gas distribution was assessed by the range of fluctuations in CO₂ concentration in gas at specific radial points over the observation period.

Comparison of characteristic operation periods of the 1754 m³ furnace revealed that an increase in smelting intensity from 0.650 to 1.009 t/m³·day resulted in the following changes in radial gas distribution: the unevenness (based on the coefficient of variation of CO₂ concentrations) increased from 21% to 30% on average, while the degree of peripheral loading (based on CO_{2P}/CO_{2C}) decreased from 0.89 to 0.65. It was shown that process intensification through blast parameters on the studied furnace led not only to greater unevenness of radial gas distribution but also to increased instability, caused by fluctuations in gas permeability of individual blast furnace zones. The highest range of CO₂ concentration variation in the radial gas occurred at the periphery with blast rates of 1.37–1.48 m³/m³·min, and the lowest — at the ridge (center) with blast rates of 1.48–1.60 m³/m³·min.

Contrary to the prevailing opinion that increased smelting intensity promotes the leveling of radial gas distribution, the study demonstrated a dependency of process intensification on the opening of peripheral-axial zones — on the Cherepovets furnace (2000 m³), intensification by 9% (based on coke consumption) was linked to peripheral-axial openings, and on the Magnitogorsk furnace (1300 m³), an 8% increase was linked to the opening of the peripheral zone.

Comparison of the results obtained on BF No. 8 DMP with gas distribution data from three other blast furnaces at different plants showed that, under relatively stable raw material conditions, intensification of the blast furnace process — according to any index — occurs due to the opening of peripheral-axial pathways, the cross-sectional dimensions of which determine the thermal and reduction work of the gas flow and the overall efficiency of blast furnace smelting.

References

1. Narita K., Sato T., Maekawa M., Fukihara S., Kanayama H., Sasahara S. Report on the analysis of the contents of Blast Furnace No. 1 of the Amagasaki Plant (1980). *Tetsu to Hagane*, 13, 1975–1984.
2. Gudenau H.-W., Sasabe M., Kraibikh K. (1977). Research on cooled furnaces in Japan, *Ferrous Metals*, 6–7, 13–17.

ANALYSIS EFFECT OF STACKING PATTERN ON THE UNIFORMITY CHEMICAL COMPOSITION OF AN IRON ORE STOCKPILE

**I. V. Mizina, R. S. Abdulkyn, R. M. Rudenko, Ye. M. Siharov, Dr. Sc. (Engin.),
M. R. Rudenko, Cand. Sc. (Engin.)**

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The stability of iron ore raw material composition during stockpile formation determines the quality of sinter and the efficiency of subsequent metallurgical processes. During the stacking of ores, concentrates, fluxes, and other components, particle segregation occurs based on size, density, and shape, leading to the formation of heterogeneity zones. To reduce such deviations, it is advisable to consider the impact of the stacking scheme on the blending process and composition uniformity.

The aim of this study is to analyze the influence of bulk material stacking patterns on the uniform distribution of components in an iron ore stockpile. The research was conducted using a geometric model describing particle movement along the slope of the pile during stockpile formation. Two stacking schemes were considered — symmetrical and unidirectional. The analytical model takes into account the stockpile height H , the angle of repose φ , and particle motion parameters that determine sliding length and the final position of the deposited layer.

Calculations showed that under the symmetrical stacking scheme, the total particle trajectory length is approximately twice as long as in the unidirectional scheme, leading to the formation of more pronounced interlayer heterogeneity zones. In unidirectional stacking, compaction of the pile structure occurs, voids are reduced, and a more uniform component distribution is achieved. Blending efficiency was evaluated using the coefficient of variation $CV(Fe)$, which reflects the deviation of iron concentration across the stockpile layers. Transitioning to a unidirectional stacking scheme reduced $CV(Fe)$ from 5.2% to 3.4%, corresponding to an approximately 35% improvement in chemical composition uniformity.

Industrial validation of the model was conducted under real conditions at a metallurgical enterprise. Experimental measurements showed a deviation of the calculated data from actual values within $\pm 0.6\%$, confirming the adequacy of the model. Compared to classical approaches (Watanabe, Arima), the developed model more accurately reflects the impact of stacking geometry on the degree of blending and is practical for real-world application.

The results can be used to develop recommendations for optimizing stockpiling parameters and improving the stability of sintering mixture composition at Ukrainian metallurgical enterprises.

References

1. Arima T., Sato M., Watanabe K. (1999). Formation process and characteristics of iron ore raw material stockpiles. *ISIJ International*. Vol. 39 (9). P. 915–922.
2. Pang J., Li G., Wang H. (2015). Segregation behavior of particles during heap forming in bulk storage piles. *Advanced Powder Technology*. Vol. 26(1). P. 124–131.

MODELING OF THE PROCESS OF AVERAGING THE CHEMICAL COMPOSITION OF IRON ORE CHARGE DURING STACK FORMATION

R. M. Rudenko, Ye. M. Siharov, Dr. Sc. (Engin.), M. R. Rudenko, Cand. Sc. (Engin.),
M. A. Kashcheev, Cand. Sc. (Engin.), O. A. Chubina, Cand. Sc. (Engin.)

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

In modern sintering production, the stability of the chemical composition of the charge determines the quality of the finished sinter, the productivity level of sintering machines, and the stability of the blast furnace process. Significant deviations in the content of Fe, SiO₂, CaO, MgO, and other components in the raw materials create layer-to-layer inhomogeneity in the stockpile, which subsequently affects the variability of the sinter composition. Therefore, the process of raw material averaging during stack formation is a key stage in the charge preparation system.

This work presents an analytical study of the process of iron ore material stacking during stockpile formation using a geometric model that describes the trajectory of bulk particle movement along the slope of the pile. The model takes into account the stack height H , the natural repose angle φ , the distance between material discharge points, and the stacking scheme — symmetric or one-sided. For each scheme, the length of the particle sliding path and the volume of interlayer zones, where partial segregation of components by size and density occurs, were determined.

Comparative calculations showed that with the symmetric stacking scheme, the total path length of particle movement is about $33 \cdot t$, whereas with the one-sided scheme — only $(16\text{--}17) \cdot t$, which reduces the thickness of interlayer zones by half. This ensures denser material packing, a reduction in void volume, and a more uniform distribution of particles of different fractions. To evaluate the degree of averaging, the concentration variation coefficient σ was used, characterizing the deviation of the chemical composition between the layers of the stockpile.

It was found that during one-sided stack formation, the average value of σ decreases by 12–15% compared to the traditional scheme, confirming the effectiveness of this approach. The proposed model makes it possible to determine the influence of stack geometry on mixing processes and to predict the level of chemical homogeneity of the charge already at the stacking stage. The obtained results can be used in developing recommendations for optimizing the design of belt stacker-reclaimers and the stacking regimes of sinter plants.

References

1. Watanabe K. Study on the formation and characteristics of iron ore stockpiles. *ISIJ International*. 1986. Vol. 26(2). P. 131–138.
2. Arima T., Sato M., Watanabe K. Formation process and characteristics of iron ore raw material stockpiles. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44(9). P. 1467–1473.

RATIONALE FOR OBTAINING FERRONICKEL FROM SECONDARY RAW MATERIALS

**Ye. M. Siharov, Dr.Sc. (Engin.), S. V. Semirvahn, Cand. Sc. (Engin.),
A. A. Pokhvality, D. S. Kondrashenkov**

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The purpose of the study was to determine the specific features of remelting nickel-containing raw materials (particle size 1–20+ mm) in order to maximize the nickel content in the resulting alloys. The objectives of the research included assessing the feasibility of preliminary preparation of the feedstock (classification by particle size, use of mixtures with different fractional compositions), determining the optimal temperature conditions for remelting, the composition of the gaseous atmosphere, and the type of reductants required for obtaining metallic ingots. Additionally, the study aimed to investigate slag formation characteristics and to evaluate the effect of slag basicity on the yield of the usable metallic product.

The research methodology involved conducting direct high-temperature experiments with controlled temperature in the working chamber of a Tammann furnace, regulated furnace power according to a predefined algorithm, and video monitoring of melt surface behavior.

For the remelting of raw material samples with the following chemical composition (wt.%): 80–82 Fe, 14–17 Ni, 0.8–1.0 Si, 1.7–1.1 Cr, and 0.07–0.12 Mn, to obtain a metallic alloy corresponding to FN-20R (TU U 27.3-31076956-010:2011), a Tammann furnace was utilized. Based on thermodynamic calculations for the NiO–Fe–C system, the application of C (graphite crucible), Si (from FeSi75), and Al as active reductants was determined to be appropriate.

To assess the effect of particle size on the yield of metallic alloy, three fractions of raw material were selected: 0–10 mm, 10–20 mm, and 20+ mm. Each fraction was charged into a graphite crucible and placed in the working chamber of the Tammann furnace. The creation of a reducing atmosphere within the furnace and the use of a graphite refractory plug ensured protection of the molten metal from direct oxidation by atmospheric oxygen and prevented the accumulation of FeO and MnO in the slag.

The holding time of the melts in the crucibles at 1510–1540 °C under turbulent mixing conditions averaged 30 minutes.

It was established that, for producing a ferroalloy containing Fe (77–83%) and Ni (13.4–20.0%) by remelting the raw material under reducing conditions, preliminary preparation (classification and/or additional grinding) of the feedstock is impractical. Under the experimental conditions, the use of the 20+ mm particle fraction resulted in a 44.7% higher nickel content in the produced alloy compared with the 0–10 mm fraction.

The feasibility of using FeSi75 as a reductant was also examined. Although an increase in nickel content was expected when using FeSi, the yield of Fe–Ni-based metallic alloys amounted to 56–62% of the initial raw material mass; when FeSi was used, the yield decreased to 39.64%, with a nickel content of 4.3%. Material losses during remelting ranged from 3.0 to 5.9% of the initial mass.

Considering the need to ensure increased slag viscosity during the remelting process, it is advisable to introduce slag composition modifiers such as Al₂O₃—to reduce NiO solubility—while maintaining slag basicity (CaO/SiO₂) within the range of 0.9–1.1 to minimize nickel dissolution, and MgO (8–12%) to stabilize the slag structure.

References

1. Ferronickel. Technical Specifications. (2011). TU U 27.3-31076956-010:2011. PJSC “Pobuzhsky Ferronickel Plant.”

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE METALLURGY INDUSTRY

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof., S. Ivannikov¹

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

It is known that 19% of metallurgical companies systematically apply artificial intelligence to transform their processes, 31% use data together with artificial intelligence to achieve exponential growth, 37% rethink the interaction between people and machines [1]. When considering the contribution of AI to environmental sustainability, it should be noted: reducing energy consumption, raw materials and emissions of harmful substances; optimizing processes for more efficient use of resources; supporting sustainable and environmentally friendly production [2]. The impact of artificial intelligence on supply chain management is very large. AI systems can optimize inventory management, predict demand fluctuations and optimize logistics operations. By analyzing data in real time, artificial intelligence can identify potential failures and suggest proactive measures to mitigate risks, ensuring a smooth and resilient supply chain. This ability not only increases efficiency, but also contributes to sustainability by reducing waste and improving resource use [3].

According to [4], there are 10 ways to use AI in the steel industry: predictive maintenance; process optimization; quality control and defect detection; supply chain management; energy efficiency and sustainable development; production planning and personnel management; product development and configuration; safety improvement; market analysis and pricing strategies; research and development.

Thus, artificial intelligence is a factor of revolutionary changes in the metallurgical industry, which allows to ensure increased productivity and quality of metal products, energy efficiency and sustainable development, while transforming the workforce and decision-making processes in the industry. The main sources of application of artificial intelligence in the metallurgical industry are: predictive maintenance; optimization of the metallurgical process; quality control of metal products and detection of defects and shortages; supply chain management of raw materials and metal products; energy efficiency; production process planning and personnel management; development of new types of metal products; improvement of occupational safety, market analysis and pricing strategies, and others.

References

1. How artificial intelligence is used in metallurgy. GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/yak-shtuchnij-intelekt-zastosovujut-u-metalurgii> (date of application: 05.08.2025).
2. Artificial Intelligence in Metallurgy: A Revolution in Manufacturing. TVK Pegas. URL: <https://stali.kiev.ua/shtuchnyy-intelekt-u-metalurhii-revoliutsiia-u-vyrobnystvi> (date of application: 05.08.2025).
3. Zhang K. AI's role of transforming customer experience and optimizing supply chains for global businesses. *Innovation and Sustainability*. 2024. No. 3. P. 45–52.
4. 10 ways AI is being used in the Steel Industry. Team DigitalDefynd. URL: <https://digitaldefynd.com/IQ/ai-in-the-steel-industry> (date of application: 05.08.2025).

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE EDUCATIONAL PROCESS IN THE SPECIALTY G10 «METALLURGY»

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof., S. Borsuk¹

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

Today, such smart technologies as artificial intelligence (AI), digital twins, virtual and augmented reality allow to optimize the educational process, increase its efficiency and reduce the time spent on learning due to the new stage of automation [1]. Among the challenges regarding the use of artificial intelligence systems that modern HEIs face are: the problem of ethics, ensuring confidentiality and security, insufficient level of formation of digital competence in the aspect of AI, fragmentation of educational and scientific and methodological support for the implementation of AI in the educational process [2].

One of the potential areas of using AI as a teacher's assistant is the selection of educational material that is optimal for the appropriate audience, course curriculum, interesting and useful for the future profession. Mobile applications are becoming relevant, which are used: as assistants in studying educational material and consolidating it; as an analyst in the process of collecting information during exercises in solving problems that cause certain difficulties, errors and significant time consumption [3].

Artificial intelligence allows for real-time assessment of problem solving and improves the assessment process of higher education students. For example, chatbots offer students a personalized and interactive learning experience, providing 24/7 support and improving accessibility [4].

For example, the use of artificial intelligence by higher education students studying in the specialty G10 «Metallurgy» will allow improving the following areas:

1. Optimize metallurgical processes.
2. Conduct quality control and identify defects in metal products.
3. Conduct maintenance forecasting.
4. Conduct material selection and alloy design.

Thus, the timely introduction of information technologies into the educational process of higher education institutions is a way to modernize education, innovation, and increase the competitiveness of Ukrainian higher education institutions in the global arena. The use of artificial intelligence in the educational process will allow: teachers to generate and check tests, create presentations, analyze the academic achievements of higher education students, etc.; higher education students to search for information for scientific papers, prepare for exams or tests, generate ideas for presentations, receive feedback on scientific papers, learn languages; for HEI leaders to optimize administrative processes (for example, filling out documentation, writing answers to questions, etc.).

References

1. Androniceanu A.-M., Georgescu I., Tvaronavičiene M., Androniceanu A. Canonical correlation analysis and a new composite index on digitalization and labor force in the context of the industrial revolution 4.0. *Sustainability (Switzerland)*. 2020. No. 12. <https://cutt.ly/zwDHrHzY>
2. Hrytsenchuk O. The use of artificial intelligence in education: trends and prospects in Ukraine and abroad. *UNESCO Chair Journal Lifelong Professional Education in the XXI Century*. 2024. Iss. 10. P. 152–161.
3. Viznyuk I. M., Buhlai N. M., Kutsak L. V., Polishchuk A. S., Kylyvnyk V. V. Use of artificial intelligence in education. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*. 2021. Iss. 59. P. 14–21.
4. Arie Zilberman. How AI affects the education system. URL: <https://www.facerua.com/iak-shi-vplivaie-na-sistiemu-osviti> (date of application: 05.08.2025).

MODERN ASPECTS OF THE USE OF FLUTED LIME IN THE METALLURGICAL INDUSTRY OF UKRAINE

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof., A. Karamzin¹

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

There are two main ways of using slaked lime and compositions based on it in the metallurgical industry of Ukraine:

- as a basis for solid slag-forming mixtures (SSM) for the out-of-furnace treatment of liquid metal melts;
- as crucibles for vacuum and open induction furnaces; ceramic lining elements for oxygen converters and arc steelmaking furnaces, elements of intermediate ladles of continuous casting plants, elements of pouring glasses of steel pouring ladles, elements of devices for filtering liquid metal melts.

In the converter shop of PJSC «Dnepr Metallurgical Combine» (now PrJSC «KAMET-STEEL»), a technology was mastered for treating carbon and low-alloyed calm steels with a lumpy solid slag-forming mixture consisting of freshly calcined metallurgical lime and dry fluorspar in a ratio of 4:1 during the process of releasing the melt from the converter into a ladle with a capacity of 250 tons. TSS treatment was mastered on steel grades 20, 35, 09G2, 16KhG, 10KhS, etc. The TSS consumption was usually 7 kg/t. The sulfur content in the metal before release ranged from 0.025–0.050%, in the finished metal 0.010–0.030%. The degree of desulfurization was 182–315%.

At «Kryvorizhstal» (now «ArcelorMittal Kryvyi Rih»), carbon and low-alloy steel smelted in 150-ton converters was treated in a ladle with pieces of a slag-forming mixture of lime and fluorspar. The consumption of piece lime was 2.3–7.8 kg/ton of steel. The initial sulfur content in the metal during the smelting was 0.037%. The degree of steel desulfurization ranged from 15–30%.

At PrJSC «Azovstal Metallurgical Plant» (existed until 2022), a technology for desulfurization of converter steel in ladles with solid slag-forming mixtures based on fluxed lime was developed and mastered, which differs from ordinary lime in its increased iron content - up to 3.3 and lower calcination losses - 1.54%. Fluxed lime was fed into 350 t ladles through a bulk material path. At the same time, fluorspar was introduced into the ladle; at the same time, the ratio of TSS of fluorspar and lime was maintained at 1: (3–4). Low-alloy steels of grades 13GS, 16GS and a number of ordinary grades were processed. At the beginning of the smelting production, aluminum in ingots (0.4–0.5) kg/t of steel were placed under the stream, after 20–30 sec. from the beginning of production, TSS was introduced up to 8 kg/t.

Molten lime crucibles are also used in industrial conditions at PJSC «Motor Sich» in vacuum induction furnaces when smelting the alloy ChS-70-VI. The use of fused lime crucibles leads to an increase in the yield of usable blades to 66–79%, depending on the type of blade. At the same time, there is a noticeable decrease in the number of products with surface defects and slag inclusions.

The use of TSS based on fused lime in industrial conditions has positive results, in particular in the conditions of PJSC «Zaporizhstal» at open-hearth furnace No. 5 when conducting a 500-ton experimental smelting of structural carbon steel of grade 10SP with metal processing in a TSS ladle based on lime.

In the conditions of PrJSC «Dneprospeysstal» tests of TShS based on slaked lime were carried out as follows:

- smelting of bearing steel grades ShKh15 and ShKh15SG is carried out in SPC-3 in 60-ton electric arc steelmaking furnaces (EAF) with out-of-furnace processing of TShS. The sulfur content in bearing steels of the experimental melts was 0.005–0.009%. The achieved degree of metal desulfurization of 72–81% indicates a high refining ability of slaked lime;

- treatment of stainless steel grades 12X18H10T and 08X18H10T with slaked lime on an argon-oxygen refining unit in SPC-2. The steel was smelted by a duplex process (electric converter furnace). The semi-finished product was smelted in a 50-ton chippings furnace by the method of alloyed waste remelting. After adjusting the technology of out-of-furnace processing of stainless steel and selecting the optimal amount and composition of TSS based on slaked lime, the sulfur content in the finished metal can be reduced to 0.005–0.007%, and the degree of desulfurization is brought to 75–85%.

INDUSTRIAL TESTING OF TSH WITH FLUTED LIME IN THE OPEN-HEATED STEEL WORKSHOP OF PJSC «ZAPORIZHSTAL»

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof.

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

In the conditions of PJSC «Zaporizhstal» in the open-hearth furnace No. 5, a 500-ton experimental melting of structural carbon steel of the 10SP brand was carried out with metal treatment in the ladle with solid slag-forming materials (SSF) based on lime. Pre-melted lime was obtained in a semi-industrial three-phase electric arc furnace with a capacity of 140 kVA. The initial charge used was metallurgical lime of the IF-1.2 brand (89.5–90.5% CaO, 0.930–1.1% MgO, 0.45–0.62% SiO₂, 0.860–0.92% Al₂O₃, 0.22–0.4% FeO, 0.28–0.35% C, 0.12–0.15% S, 0.009–0.012% P produced by JSC «Zaporizhzhia Ferroalloy Plant»), obtained in a lime-burning furnace. Melting was carried out on a garniture of the prepared charge up to 200 mm thick, which excluded contact of the liquid melt with the magnesite masonry of the bottom and the walls of the furnace.

Smelting of 10SP steel was carried out according to the current technological instructions. The metal was released in two ladles. At the fourth minute after the start of steel production, deoxidizers and aluminum were introduced into the first ladle, at the sixth minute, 1200 kg of solid slag-forming mixture was added, consisting of 85% fused lime and 15% fluorspar. The complete chemical analysis of the TSH is as follows: 82.5% CaO, 14.27% CaF₂, 0.2% MgO, 2.97% SiO₂, 0.19% Al₂O₃, 0.19% Fe, 0.021% C, 0.005% S.

The metal was released into the second ladle using the current technology. The total time for steel to be released from the furnace was 22 minutes. During the release of the melt, the metal in the ladles was purged with argon through a gate valve.

The steel was cast using the current technology: experimental melting with the THS additive in a 11B type caster, melting without the THS additive in a 1B type caster.

The results of the chemical analysis of the metal samples taken during the melting and casting of 10SP steel are as follows:

- after melting: 0.75% C, 0.043% S;
- before release from the furnace: 0.07% C, 0.18% Mn, 0.032% S;
- in ladle No.1 after TSH treatment: 0.1% C, 0.65% Mn, 0.24% Si, 0.019% S, 0.011% P, 0.08% Cr, 0.05% Ni, 0.01% Cu, 0.08% As;
- in ladle No.2 without treatment: 0.09% C, 0.53% Mn, 0.21% Si, 0.027% S, 0.01% P, 0.08% Cr, 0.05% Ni, 0.09% Cu, 0.08% As;

So, having an initial sulfur content in the metal before release of 0.032%, we obtain in the ladle after treatment with a solid slag-forming mixture a sulfur content of 0.019%, and without treatment 0.027% S. The degree of desulfurization was 40% and 19%, respectively. The ingots were redistributed according to the current technology into a 1.5 mm sheet. It was established that the mechanical properties of the sheet from the experimental metal were higher by 15–30%.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF SPONGE FERROTUNGSTEN PRODUCTION IN DOMESTIC METALLURGY

S. M. Grigoriev, Dr.Sc.(Engin.), Prof., D. V. Yakovlev

Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia

This study presents a comprehensive methodology for assessing the economic feasibility of introducing sponge ferrotungsten (FVG) production in the domestic metallurgical industry using powder metallurgy techniques. The proposed technology aims to optimize resource and energy consumption by replacing expensive reducing agents such as silicon and aluminum powders with carbon-containing waste and simplifying the melting process. The use of FVG as an alloying additive in high-speed steel smelting significantly improves alloying efficiency—reducing dissolution time of tungsten, lowering losses of other alloying elements, and increasing furnace productivity. The article outlines a detailed economic calculation model that factors in cost savings from reduced material and energy consumption, improved yield, and enhanced absorption rates of tungsten (5–7 times higher than traditional ferrotungsten). The economic effect was demonstrated through case studies of smelting steel P6M5 using sponge ferrotungsten in electric arc furnaces. The findings support the use of FVG as a cost-effective and technologically advanced alternative to conventional ferroalloys, with strong potential for broader industrial application based on data from the London Metal Exchange (LME).

A technology for obtaining and using sponge ferrotungsten by powder metallurgy has been developed, which differs from traditional ferroalloys based on tungsten by metal thermal melting in flexibility and economy. The method is designed to use relatively cheap and common reducing agents and obtain a product with qualitatively new technological properties: the speed of tungsten absorption in molten steel is 5-7 times higher than from a standard analogue. This allows reducing the burnout of other elements from molten steel by 4-7% (molybdenum, chromium, vanadium). The method for calculating the economic efficiency of using a new alloying material makes it possible to make a calculation at any time with the availability of data from the LME exchange. Sponge ferrotungsten as an alloying additive of tungsten in the smelting of high-speed steels in an arc furnace at the prices of the London Stock Exchange, confirm the high efficiency and prospects of expanding the scope of implementation [1-4].

References

1. Grigoriev S.M., Karpunina M.S., Moskalenko A.S. et al. Thermodynamic analysis and mathematical modeling in relation to the technology of obtaining sponge tungsten. *Steel*. 1999. No. 11. P. 33–36.
2. Grigoriev S.M., Karpunina M.S., Moskalenko A.S. et al. Mathematical model of thermodynamic equilibrium in the W-O- C system in relation to the technology of obtaining sponge tungsten. *Steel*. 1999. No. 12. P. 31-34.
3. Grigoriev S.M., Grigoriev D.S. Reduction of impurities in metallized tungsten concentrate. *Steel*. 2002. No. 10. P. 43-46.
4. Grigoriev S.M. Economic strategy and tactics of resource and energy saving in metallurgy of refractory materials. *Sat. "Metallurgy"* Issue 1. Zaporizhzhia: ZGIA, 1988. P. 17–23.

UDC 669.187.2.036.61

WAYS TO INCREASE ELECTRODE STABILITY

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof., Yu. Dubasov ¹¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

The properties of electrodes are largely determined by the properties of the slag obtained from the slag-forming base of the electrode coating. In this case, the electrode must provide:

- easy ignition and stable burning of the welding arc;
- uniform melting of the electrode coating;
- uniform coating of the weld with slag and its easy removal after welding;
- absence of cracks, pores, and non-welding in the weld metal.

The main characteristics of the electrodes are the mechanical properties of the weld and the welded joint: temporary resistance to rupture; relative elongation, impact strength; bending angle.

The stability of the electrodes depends on many factors:

1. Electrode material.

The choice of electrode material (copper, tungsten, graphite, various alloys) is of decisive importance: for example, tungsten electrodes for TIG welding are infusible and have high thermal stability, while metal welding electrodes melt during operation.

2. Operating conditions:

- high temperatures can lead to oxidation, deformation or evaporation of the electrode material;
- exposure to corrosive substances (acids, alkalis, salts) or moisture can quickly deteriorate the condition of the electrode, especially its coating;
- current strength, voltage and polarity can affect the rate of wear or erosion of the electrode.

3. Construction and manufacturing quality.

The homogeneity of the material, the quality of the coating (for welding electrodes) and the correct geometry of the tip affect the stability of the process and service life.

4. Technological process.

Welding conditions (e.g. material thickness, seam position) or electrolysis parameters also play a role.

Various methods are used to increase the stability of electrodes:

- correct selection of material (use of specialized electrodes designed for specific conditions (e.g. heat-resistant components, copper with impurities for spot welding));
- heat treatment and drying (welding electrodes are sensitive to moisture. Their preliminary drying in an oven at a recommended temperature (e.g. 70–150°C) significantly improves their characteristics and prevents problems such as sticking);
- optimization of process parameters (observance of the manufacturer's recommended current and voltage ranges);
- protection from external influences (use of shielding gases during welding or storage of electrodes in dry conditions).

The resistance of electrodes to steel depends on their marking:

- for alloyed steels, electrodes with the «E» marking and numerical designations indicating strength are used (e.g. 38, 42, 46, 50, 55, 60, 70, 85, 100, 125, 150). The letter «A» after the number (for example, 42A, 46A, 50A) means that the weld will have increased ductility and impact strength.
- for heat-resistant steels, electrodes with the symbols E-09 and E-10 are used (additional indices, such as M, MX, may follow).

Technologies for step by step processing of cast iron and steel

UDC 669.046.669

DEVELOPMENT AND CONTENT OF THE INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM "OUT-OF-FURNACE CAST IRON PROCESSING"

V. G. Kysliakov^{1,2} Cand. Sc. (Engin.), D. M. Togobytska¹ Dr. Sc. (Engin.), Prof.,
V. P. Petrusha¹, Y. M. Likhachov¹, N. E. Khodotova¹

¹Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

²Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro

Modern steel production is characterized by an increase in the production of steels with a low content of non-metallic inclusions. Out-of-furnace pig iron refining is widely used to provide BOF processors with pig iron of a given quality, which significantly reduces the cost of producing high-quality steel products [1]. Updating the database with information on technologies for not only pig iron desulphurization [2], but also complex impurity removal will allow us to obtain descriptive models for these technologies and become the basis for algorithmic support of the expert system's analytical block for the selected pig iron refining technology. The Out-of-Furnace Iron Processing Database "POCH" is a full-text form of documentary database organization and makes it possible to provide a thematic search for a particular problem or a certain issue, which is regulated by a corresponding query provided with a flexible interface [3]. The information support subsystem was developed, in particular, a software module for the automated procedure of replenishing machine passports formatted according to a special template from the User's technological information archive in Excel was developed. The information system of out-of-furnace cast iron treatment "POCH" was further developed by adding indicators of complex cast iron treatment (removal of sulfur, silicon and phosphorus impurities) both with our own laboratory experimental data and data from foreign technologies. The processing of the actual data characterizing the process of complex treatment of cast iron with a mixture of CaO-CaF₂-FeO reagents made it possible to expand the concept of the existing expert system "Out-of-furnace treatment of cast iron". The model module of the analytical system should include an intellectual core for generating complex indicators of the chemical composition of the slag-metal-gas system and technological parameters of treatments. The architecture of the model system for expert evaluation of the technology of complex cast iron refining was developed.

References

1. Shevchenko A. P., Manachin I. A., Vergun O. S. *Pozapichna desulfuratsiya chavunu v kovshakh. Tekhnolohiya. Doslidzhennya. Analiz. Udoskonalennya*. [Out-of-furnace desulfurization of cast iron in ladles. Technology. Research. Analysis. Improvement]. Dnipropetrovs'k. «Dnipro VAI». 2017. 252 p.
2. Togobitskaya D. N., Vergun A. S., Molchanov L. S., Kislakov V. G., Likhachev Yu. M., Khodotova N. E. Podsystema «Vnepechnaya obrabotka chuguna» v reshenii zadach vybora racionalnoj tehnologii polucheniya kachestvennoj metalloprodukcii v slozhivshisya syrevykh i tehnologicheskikh usloviyah [«Out-of-furnace cast iron processing» subsystem in the solution of tasks for the choice of rational technology for producing quality metal products under the applicable conditions of raw material and technological.]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2019. Vol.33. P. 106–115. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-105-115>
3. Zhmojdin G. I., Prihod'ko E. V., Togobitskaya D. N., Hamhot'ko A. F., Likhachev Yu. M. (1988). O pasportizacii eksperimental'nykh materialov dlya banka dannykh "Metallurgiya". *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya*. 1988, 8, 136-139.

SIMULATION OF THE INTERACTION PROCESSES OF COMPONENTS OF THE TWO-PHASE FLOW INTRODUCED INTO CAST IRON DURING INJECTION DESULFURATION

**I. O. Manachyn^{1,2}, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., V. G. Kysliakov^{1,2}, Cand. Sc. (Engin.),
M. O. Rybalchenko², Cand. Sc. (Engin.), Assoc. prof., V. P. Petrusha¹, S. O. Pochytaiev¹**

¹**Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro**

²**Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro**

Off-furnace desulfurization of pig iron has become a necessary and reliable link between blast furnace and steelmaking production in the manufacture of high-quality metal products. The efficiency of sulfur removal from pig iron determines the overall quality of the desulfurization technology, ensuring thorough and complete elimination of sulfur from the melt. Magnesium has become the most widely used reagent in off-furnace desulfurization practice due to its unique interaction properties with molten pig iron. A comparative analysis of various technological parameters across different magnesium injection methods into molten pig iron has been conducted. The lowest specific reagent consumption is observed with mono-injection of magnesium, which results in the lowest costs during industrial implementation of the process. Industrial blowing data show that mono-injection of granular magnesium is characterized by the lowest reagent consumption — averaging 0.42–0.55 kg per ton of pig iron, the shortest desulfurization operation time — averaging 5.5–7.7 minutes, achievement of ultra-deep desulfurization — down to 0.0003–0.001% sulfur content, desulfurization degree — up to 99%, high sulfur removal rate — averaging 12–14.4% per minute, high reagent utilization rate — averaging 75–92%. It is concluded that mono-injection of granular magnesium is the most efficient and economically viable off-furnace desulfurization process, outperforming other desulfurization technologies across multiple indicators.

References

1. Voronova, N. A. (1983). Desulfurization of Hot Metal by Magnesium; Publisher. Iron & Steel Society, 1983. [in Russian]
2. Shevchenko A. F., Bashmakov A. M., Vergun A. S., Manachin I. A., Kislyakov V. G., Trotsenko É. A. et al. (2019). Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium. *Metallurgist*, 62, 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>
3. Shevchenko, A. F., Manachin, I. A., Shevchenko, A. M., Dvoskin, B. V., Vergun, A. S., Shevchenko, S. A. et al. (2013). Sopostavitel'nyy analiz tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley razlichnykh protsessov vnepechnoy desul'furatsii chuguna. [Technical and economic indices of different processes of external pig iron desulphurization comparative analysis]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 27, 97-110. [In Russian].

NUMERICAL SIMULATION OF GAS DYNAMICS OF FLOWS IN A SUBMERGED LANCE NOZZLE

**D. V. Yeskov, Ye. M. Siharov, Dr. Sc. (Engin.), M. R. Rudenko, Cand. Sc. (Engin.),
R. D. Pavliuk**

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The results of studies on the gas dynamics of single- and two-phase flows in the working space of a T-shaped submerged lance nozzle under the operating conditions of the Secondary Steelmaking Unit (SSU) of *PJSC Kamet-Steel* are presented. The research employed physical and mathematical modeling techniques of the unsteady flow regime in the “pipe–nozzle working space–outlet” system using the SolidWorks software package. The finite volume method (FVM) was applied, dividing the model geometry into a grid of volumetric elements within which the Navier–Stokes equations were solved to simulate gas motion.

Calculations of the actual dust load of the gas–powder flow for desulfurizing mixture injection under the SSU conditions at *PJSC Kamet-Steel* were performed according to the method of M. Ya. Medzhybozhsky. It was found that the actual dust load ($Fr' > 2500$) generally corresponds to the critical flow density. When one of the nozzles of the lance becomes blocked or when the specific consumption of the carrier gas decreases, the dust load parameter (DLP) changes significantly. To prevent exceeding the critical density of the DLP, it is advisable to increase the carrier gas flow rate from 40–50 to 80–100 Nm³/h or raise the gas pressure before the lance.

The influence of the working space (WS) configuration of the nozzle on the opening angle and length of the resulting gas–powder jet, gas velocity variation, and velocity distribution across the nozzle cross-section was investigated. To vary the WS configuration during modeling, different bottom shapes of the nozzle were used. The movement features of the granulated magnesium and powdered lime mixtures of various particle sizes within the WS, the degree of filling of the horizontal section of the nozzle with particles, and the regularities of flow formation at the nozzle outlet were established.

It was shown that for reagent particles larger than 400 μm, the velocity parameter is dominant. For particles smaller than 100 μm, it is advisable to apply additional measures to break up agglomerates, for example, by using rotating submerged lance designs.

Changing the bottom shape of the nozzle leads to changes in the reflection zone of the gas and especially gas–powder flows containing coarse particles, influencing the velocity distribution within the nozzles. It was found that when particles are reflected from the nozzle bottom at a certain angle, a more uniform velocity distribution across the nozzle cross-section is achieved, accompanied by an increase in the overall flow velocity and a wider dispersion angle of particles at the outlet into the molten bath.

Under conditions of inelastic collision with the metallic bottom of the nozzle (restoration coefficient ≈ 0.5), magnesium particles retain only about 25% of their kinetic energy (E) in the normal direction but can retain the full tangential energy. Thus, when impacting a conical bottom wall at an angle of 60°, particles lose about 41% of E but are redirected mainly toward the central part of the nozzle, which helps prevent clogging [1].

During the numerical simulation, the distribution and variation of gas velocity across the cross-section were studied under fluctuations in the carrier gas pressure and the molten bath pressure in front of the nozzle, depending on the ladle bath depth. A comparison with physical modeling results confirmed the possibility of more efficient flow acceleration through changes in the configuration of the nozzle’s working space.

References

1. Yeskov, D. V., & Siharov, Ye. M. Parameters of reagent injection and clogging of T-shaped lance nozzles. *Collection of Scientific Papers of Dniprovsky State Technical University (Technical Sciences)*, Kamianske: DSTU, 2024, No. 1(44). P. 16–26.

Metal Science and Heat Treatment of Steel

UDC 669.14.018.292

FEATURES OF THE FORMATION OF WEL AND BEL LAYERS IN RAILWAY WHEEL STEEL OF VARIOUS MANUFACTURING METHODS UNDER EXTREME BRAKING CONDITIONS

**O. I. Babachenko¹, Dr. Sc. (Engin.), Cor.-Mem. NAS of Ukraine, R. V. Podolskyi^{1,2}, Ph. D. (Engin.),
G. A. Kononenko^{1,3}, Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., O. A. Safronova¹, O. L. Safronov¹, Zh. A. Dementeva¹**

¹ Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

² Institute of Applied Control Systems of NAS of Ukraine

³ Dnipro University of Technology, Dnipro

The development of railway transport in Ukraine is of strategic importance in the conditions of martial law and in the period of post-war reconstruction. One of the critical elements of the safe operation of rolling stock is the wheelset, in particular the wheel rim, which is subjected to intense thermomechanical loads during operation. As a result of extreme braking, thermal defects can form - the so-called white and brown etching layers (WEL and BEL), which reduce the wheel resource, cause gouges, cracks and thermal cracks.

The purpose of the study is to experimentally determine the influence of the chemical composition and method of production of railway wheel steel on the formation of WEL and BEL zones during wheel braking.

Samples from the rims of solid-rolled and cast wheels of classes C and B, as well as steel grade 2 with different carbon content (0.61–0.76%) and hardness (293–333 HB) were used for the research. The tests were carried out on a special stand that simulates the conditions of emergency braking by a train at a speed of 100 km/h. Metallographic studies were performed on Carl Zeiss microscopes of the models “Neophot 32” and “Axiovert 200 M MAT” after etching with nital. The microhardness of the structural component was determined on a microhardness tester LHVZ-1000 with a load of 50 g. The results of microhardness measurements, as well as metallographic studies, indicate that in the surface layers of the studied samples after braking on the stand, a weakly etched area with increased microhardness and a high-carbon martensite (WEL) structure was formed, similar to that observed in the surface layers of railway wheels with “notch” type defects. It was established that after testing, a WEL zone with a martensite structure and hardness up to 8000 N/mm² is formed in all samples. Cast wheels are characterized by a larger WEL thickness (4–4.3 mm) than solid-rolled wheels (2–3 mm), which is explained by greater chemical heterogeneity and dendritic liquation in cast structures. The presence of a BEL transition zone with a hardness of 3000–7200 N/mm², represented by highly dispersed pearlite, was revealed. With increasing carbon content, the WEL thickness also increases: for steel with 0.76% C - about 3 mm, for steel with 0.61% C - about 2 mm.

The chemical composition and method of manufacturing the wheel significantly affect the material's susceptibility to the formation of thermal layers WEL and BEL. Cast wheels are more sensitive to thermal defects, while solid-rolled wheels are characterized by increased resistance due to a more uniform microstructure. The results obtained are of practical importance for rational substantiation of the composition and technology of manufacturing wheels with increased resistance to thermomechanical loads and can be used in developing recommendations for extending the service life of railway wheels in difficult operating conditions.

ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF 16G2AF STEEL IN THE DESIGN OF A TANK FOR TRANSPORTING LIQUEFIED HYDROCARBON GASES

D. I. Huzenko¹, N. O. Rott² Cand. Sc. (Engin.), ass.prof., G.A. Kononenko^{1,2} Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res.

¹ **Dnipro University of Technology, Dnipro**

² **Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro**

The transportation and storage of liquefied hydrocarbon gases require specialized vessels capable of withstanding high pressure and temperature fluctuations. The safe operation of such tanks depends on the correct choice of material and a well-substantiated structural design. This study presents a comprehensive analysis of a tank designed for liquefied gas transportation and determines the optimal parameters of its elements using the Finite Element Method (FEM) in Autodesk Inventor 2024.

The research object is a 46 m³ semi-trailer tank intended for the transportation of propane–butane mixtures. Calculations were performed for an operating pressure of 1.6 MPa and a test pressure of 2.1 MPa, according to ADR [1] requirements. The main construction material selected is 16G2AF steel, which is similar in properties to P460NL2 steel [2]. This low-alloy structural steel has high strength (yield strength ≥ 440 MPa, tensile strength ≥ 590 MPa), good impact toughness, and resistance to low temperatures down to -60 °C. Microalloying with vanadium and nitrogen refines the grain structure and improves plasticity and resistance to brittle fracture [3, 4].

An engineering analysis of the wall and head thickness was carried out according to DSTU EN 12493:2019 [5]. The calculated thickness of the cylindrical shell is 8 mm, and the dished ends are 10 mm. The tank model was developed with reinforcing rings and baffles. The FEM analysis results show that the maximum equivalent (Von Mises) stress is 375.3 MPa, which does not exceed the permissible limits. The minimum safety factor for the shell is 1.23, and for the dished end with a manhole – 1.14, confirming that the design meets strength and safety requirements.

The obtained results confirm the suitability of 16G2AF steel for manufacturing pressure vessels and demonstrate the effectiveness of computer-aided modelling for design optimization. The use of FEM in the design process allows for reduced material consumption, improved reliability, and enhanced predictability of equipment performance under real operating conditions.

References

1. Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR), 2025
2. DSTU EN 10028-3:2018 Flat products made of steels for pressure purposes – Part 3: Weldable fine grain steels, normalized (EN 10028-3:2017, IDT)
3. Metinvest-smc. Characteristics of steel 16G2AF [Electronic resource]. – Access mode: https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-16g2af/?srsId=AfmBOoov400Dk8DIDn9_VNr7AFzpxPID6acEzf0vTPVGoxFXIqqs0di (date of application: 11.10.2025)
4. DSTU 8541:2015 High-strength rolled steel. Technical conditions
5. DSTU EN 12493:2019 LPG equipment and accessories – Welded steel pressure vessels for LPG road tankers – Design and manufacture (EN 12493:2013, IDT)

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN CrMoV1Si STEEL UNDER CONTINUOUS AIR COOLING WITH DIFFERENT SPEEDS

**E. V. Oliinyk, E. V. Parusov Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
I. M. Chuiko Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Currently, the world production of rolled steel exceeds 50 million tons annually, which is explained by the wide scope of its use. The main direction of further application of rolled steel is to obtain cold-deformed wire for various purposes, in particular for the manufacture of welding materials. At the same time, consumers of rolled steel for welding purposes put forward increased requirements for its plasticity and strength indicators, since the efficiency of cold plastic deformation (drawing) processes depends on this.

One of the effective directions for solving the existing problem is the use of de-strengthening thermomechanical processing of rolled steel in the rolling mill flow, which allows you to control the processes of structure formation in the metal at the final stage of its cooling. The most widespread in world metallurgical practice is the Stelmor technology, which provides for the use of controlled air cooling of rolled steel at the final stage. It is at this stage that conditions are created for the implementation of quasi-isothermal aging of rolled steel, the temperature-time parameters of which significantly affect the formation of the final structure and mechanical properties of steel.

The research was carried out by simulating experimental thermal cycles of CrMoV1Si steel processing on the automated Gleeble 3800 complex (USA) taking into account the technological features of Stelmor lines operated by a number of industrial enterprises. To analyze the processes of structure formation in CrMoV1Si steel (% wt.: 0.08C-1.30Mn-0.54Si-1.06Cr-0.54Mo-0.24V-Fe_{base}), metallographic studies using optical microscopy and quantitative phase analysis were used. It was established that the rate of continuous cooling in the temperature range of 950–570 °C is a determining factor in terms of the impact on the microstructural evolution of CrMoV1Si steel. According to the results of the experiments, the following temperature-rate regulation of rolled steel cooling was proposed: the beginning of cooling from 950 °C; accelerated air cooling in the range of 950–850 °C at a rate of ~10 °C/s; slow cooling in the range of 850–570 °C at a rate of ~0.4 °C/s; further cooling from 570 °C in still air. This cooling regime causes the formation of a steel structure consisting of 60 % ferrite, 29 % pearlite, 8 % bainite and 3 % martensite, in particular the latter is observed in the form of individual grains with high hardness, but their number is insignificant, which ensures the achievement of an effective combination of strength and plasticity indicators. It was determined that more intensive or slow cooling of CrMoV1Si steel in the interval of diffusion $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation affects the increase in the volume fraction of bainite and martensite, which leads to a decrease in plasticity indicators and an increase in the strength of the metal.

The proposed cooling schedule ensures a minimum content of solid phases and contributes to the formation of a structure consisting mainly of a ferrite matrix and pearlite areas. The achieved structural state should be considered favorable from the point of view of the possibility of increasing the technological plasticity of rolled steel CrMoV1Si during drawing into a welding wire with a total relative compression of at least 90 %. The recommended air cooling mode can be considered the most promising for industrial testing of the technology of softening thermomechanical treatment of rolled steel for welding purposes made of low-carbon alloyed Cr-Mo-V steels.

EFFECT OF THE DEFORMATION ON THE SIZE OF THE NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE THIN WIRE

**T. M. Golubenko, Cand. Sc. (Engin.), V. A. Lutsenko, Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
O. V. Lutsenko, Cand. Sc. (Engin.), G. I. Sivak**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

The non-metallic inclusions control is an important part in the production of the high-quality steel wire. For the wire rod made of alloyed steels, in particular silicon-manganese steels of the G3Si1 type, the regulatory documentation does not specify the maximum number of the non-metallic inclusions that can be present in the steel without affecting the technical characteristics of the wire. That's why, the purpose of the investigation was to identify the expediency of using the existing standard for unalloyed steels ISO 16120-4:2017. Comparative investigation was conducted of the quality of the different batches of the G3Si1 steel, which was processed into wire by cold drawing according to the scheme 5.5→4.75→2.0→0.8 mm. The main difficulties in the production of the wire with a small diameter are associated with increasing strength (strain hardening) and breakage of the metal during the drawing process in production. The effect of the strain hardening for G3Si1 steel is removed by heat treatment (annealing) on the diameter of 4.75 mm, after which the steel has a spheroidized structure and increased ductility.

Investigations of the quantity of the non-metallic inclusions in G3Si1 steel with a diameter of 5.5 mm according to ISO 4967:2013 were showed the presence of the inclusions with the following indices: A 0.5, B 2.5, B 1e, C 1, D 1.5 (marker e is a large inclusion). After drawing into the wire with a diameter of 2.0 mm and diameter of 0.8 mm, the quantity indices were changed to A 0, B 2, C 1, D 1, and A 0, B 2, C 1.5, D1, respectively. Plastic inclusions are deformed during steel processing, which leads to their thinning and extension along the main working directions, as a result, plastic sulfides (A) in the G3Si1 steel with a diameter of the 2.0 mm and 0.8 mm are not detected by standard methods. The great fragile aluminate (B), silicate (C) and oxide (D) inclusions are crushed under the action of the deformation, as a result, the presence of the large inclusions in the wire with a diameter of 2.0 mm was not detected, but the number of the rows increased (from C 1 to C 1.5). The specified parameters correspond to the standard for unalloyed steels (ISO 16120-4:2017). Another batch with a diameter of 5.5 mm from the G3Si1 steel had the following index values: A 0.5, B 3.5, B 2e, C 1.5, D 1.5, DS 1.5 (DS is a large oxide inclusion). After cold drawing to diameter of 2.0 mm, the form of the inclusions are changed and the indices were: A 0, B 4.5e, B 0.5e, C 1, D 1, DS 1. The linear inclusions are thin, but spread over the entire surface of the section and consist of the many small particles of the destroyed large inclusions. For the wire with diameter of the 0.8 mm, the content of the non-metallic inclusions correspond to the following indices: A 0, B 3.5, B 0.5e, C 1.5, D 1, DS 1. The production of this batch of the wire was carried out with breaks at the diameter of 2.0 mm. At the same time, it is noticeable that the normalized indicators (ISO 16120-4:2017) for unalloyed low-carbon steels are exceeded: for diameter of 5.5 mm, thin linear inclusions of the type B have an index of 3.5 at limit of 3 and limit value (index 2) for large inclusions. After drawing, the great inclusions are destroyed, so at the diameter of 2.0 mm, large inclusions decrease from B2e to B0.5e and from DS1.5 to DS1, and the number of rows increases from B3.5 to B4.5 (at the limit of 3). The presence of the minor excess of the quantities of the inclusions in the initial wire rod (5.5 mm) by 0.5 of the index and the presence of a limiting amount of large inclusions (B 2e) leads to significant deterioration quality of the steel and wire breaks during subsequent drawing.

Accordingly, in the rolled products from the G3Si1 steel with a diameter of 5.5 mm it is preferably to ensure a low content of the non-metallic inclusions, below the limit specified in ISO 16120-4:2017, which will guarantee the technological efficiency of the processing into wire and prevent metal breakage at the stage of drawing to a small diameter (1.2...0.8 mm).

CORROSION-MECHANICAL RESISTANCE OF PIPES OF LONG-OPERATED MAIN GAS PIPELINE

**L.I. Nyrkova, Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res., A.O. Rybakov, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
L.V. Goncharenko, S.O. Osadchuk, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.**

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Studies of pipes made of different steel grades, investigated by the E.O. Paton Electric Welding Institute specialists, showed that both the base metal and welded joints retain high performance characteristics even after long-term operation [1].

The complex of mechanical, corrosion and corrosion-mechanical properties of the base metal of X70 steel pipes of the main gas pipeline after 20 and 40 years of operation in compare with a pipe that was not operated was studied. A non-monotonic trend of change in mechanical properties during operation was established: an increase in strength indicators (σ_{ts} , σ_{ys}) and a decrease in plasticity indicators (δ_5 , KCV^{-15} and ψ) for 20 years with a subsequent decrease in σ_{ts} , σ_{ys} and an increase in δ_5 , KCV^{-15} after 40 years. The trend of change in properties correlates with the results of other scientists for 17G1S steel and is confirmed by operation in order to increase the probability of the number of fractures with the duration of operation. Despite on the established trend of change in indicators (σ_{ts} , σ_{ys} , δ_5 , KCV^{-15} and ψ) their values for the base metal of long-operated pipes fully correspond to the requirements of the technical conditions.

Corrosion and corrosion-mechanical properties were investigated in the model soil electrolyte NS4 [2]. The corrosion resistance of the metal of the pipes, that was not operated, and after after 20 and 40 years of operation was investigated. It was established that the corrosion rate is, respectively, 0.064, 0.058 and 0.056 mm/year. In accordance with the scale of corrosion resistance of the metal, both the non-operated pipe and the operation after operation are in the category of «stable». It was concluded that the corrosion resistance of the pipe metal after long-term operation is at the level of the non-operated pipe.

Stress-corrosion cracking of steel after operation during 20 and 40 years was investigated by the slow-strain rate test. The susceptibility to stress-corrosion cracking was estimated by the coefficient K_S [3]. It is shown that when the cathodic polarization potentials in the section change from -0.750 to -1.050 V, K_S for a new pipe is about 1, for pipes after 20 years of operation – K_S changes from 1.00 to 1.25, after 40 years of operation – from 1.25 to 1.53 [4]. That is, after long-term operation, an increase in stress-corrosion cracking susceptibility was established. This allowed expanding theoretical ideas about stress-corrosion corrosion cracking of long-term operated pipes made of controlled rolling steel.

References

1. Paton B. E., Semenov S. E., Rybakov A. A., S. K. Vasilenko, Vasilyuk V. M. Ageing and procedure of evaluation of the state of metal of the main pipelines in service. *The Paton Welding Journal*. 2000. No. 7. P. 2–10.
2. Antunes de Sena R., Napoleão Bastos I., Mendes Platt G.. Theoretical and Experimental Aspects of the Corrosivity of Simulated Soil Solutions. *International Scholarly Research Notices*. 2012. 103715. 6 pages. <https://doi.org/10.5402/2012/103715>
3. Nyrkova L. I., Osadchuk S. O. *Stress-corrosion cracking of the steels of main gas pipeline: assessment and prevention*. Kyiv : Naukova Dumka. 2023. 216 p. ISBN: 978-966-00-1845-7. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1845-7> [in Ukrainian].
4. Kharchenko Yu.O., Nyrkova L.I. Effect of long-term operation of gas pipeline on stress-corrosion cracking under cathodic polarization. *International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (MSSE2025). Proceedings*. 2025. P. 193–194.

PHYSICO-CHEMICAL ASPECTS OF ENSURING INTERFACIAL ADHESION IN THERMOPLASTIC COMPOSITES REINFORCED WITH CARBON FIBER

V. V. Vyshnevetskyi¹, G. A. Kononenko^{1,2} Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res.

¹ **Dnipro University of Technology, Dnipro**

² **Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro**

Thermoplastic composites reinforced with carbon fiber belong to a class of materials that combine high strength, chemical resistance, and recyclability, and are therefore actively considered for aerospace, automotive, construction, and sports applications. The advantages of thermoplastic matrices include controllable processing parameters, reduced manufacturing time, recyclability, and environmental friendliness. At the same time, the main challenge to the widespread implementation of CFRTTP remains the weak interfacial adhesion between the fiber and the matrix, which arises from differences in surface polarity and energetic characteristics. The smooth, nonpolar structure of carbon fiber reduces wettability and the efficiency of load transfer, leading to localized failures and a loss of reinforcing effectiveness. To improve the strength and durability of such materials, a targeted modification of the fiber surface and optimization of the matrix chemistry are required.

Modern methods for improving adhesion are divided into physical and chemical approaches. The physical methods include plasma activation, microwave and radiation treatment, as well as metallization or nanoscale surface modification. Plasma treatment enhances surface roughness and increases the surface energy of the fiber, promoting the formation of oxygen-containing functional groups and improving wettability in systems with PA6, PC, and PES matrices. Radiation modification stabilizes the interfacial bonding through the formation of reactive sites, while metallic or nanostructured coatings (particularly those based on nickel, graphene oxide, or carbon nanotubes) create a mechanical interlocking effect that strengthens the adhesion between the fiber and the matrix.

Chemical methods are based on surface functionalization using acids, silanes, isocyanates, and polymer compatibilizers. Acid treatment increases the concentration of carboxyl and hydroxyl groups, thereby improving adhesion in composites with HDPE and POM matrices. Silane compounds and isocyanate-modified emulsions enable chemical bonding with polyamide-based matrices, reducing the contact angle of wettability and enhancing interfacial strength. The use of polymer compatibilizers, such as polypropylene modified with maleic anhydride, optimizes compatibility due to the presence of reactive functional groups and an appropriate molecular weight. The application of a thin layer of PEEK or other structurally related polymers onto the fiber improves adhesion through structural matching with the matrix and increases the overall durability of the system.

The enhancement of interfacial interaction is determined not only by the chemical nature of the fiber and the matrix but also by surface topography, the type of compatibilizer, fiber orientation, and processing parameters. The choice of modification method should be consistent with the polymer's nature and the operating conditions of the composite. The most promising approaches are combined physico-chemical methods that integrate surface functionalization with controlled processing regimes during composite formation.

Thus, targeted modification of carbon fibers and the rational selection of polymer matrices make it possible to significantly improve adhesion at the fiber–matrix interface, leading to increased mechanical strength, stiffness, wear resistance, and stability of properties during service. The obtained generalizations provide a foundation for further optimization of processing technologies and for the broader industrial application of carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites.

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF SCANNING PARAMETERS AND BUILD PLATFORM LOCATION EFFECTS ON MELT POOL GEOMETRY AND STABILITY DURING THE LPBF PROCESS

**S.V. Adzhamskyi^{1,2}, Ph. D. (Engin.), T. V. Balakhanova³, Cand. Sc. (Engin.),
O. E. Baranovska³, Cand. Sc. (Engin.), R.V. Podolskyi^{3,4}, Ph. D. (Engin.)**

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Dnipro;

²Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro;

³Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro;

⁴Institute of Applied Control Systems of the NAS of Ukraine, Kyiv

In the laser powder bed fusion (LPBF) process, melt pool formation determines the quality, geometry, and integrity of the final products. The main parameters affecting this process are laser power, scan speed, spot diameter, and layer thickness, which govern the thermal melting regime and the occurrence of defects, such as porosity or lack of fusion. At the same time, the position of samples on the build platform plays a significant but often underestimated role. The spatial location influences the focal length, laser spot profile, heat flux distribution, cooling rate, and gas flow conditions within the chamber. Process stability is also affected by temperature gradients, the direction and velocity of the shielding gas, and the design of the inlet and outlet openings. An analysis of current research reveals contradictory results regarding the influence of sample position on the build platform. While trends in melt pool geometry with variations in laser power and scan speed are generally consistent, the effects associated with sample location often differ due to variations in experimental setups, optical systems, and gas flow conditions. Therefore, further comprehensive studies are needed that consider the interaction of scanning parameters, platform position, gas flow characteristics, and the optical system. Such investigations will improve LPBF process stability, enable controlled melt pool formation, and allow better prediction of the properties of the final products.

BEHAVIOR OF THE TRANSFORMATION OF HETEROPHASE NON-METALLIC INCLUSIONS «REFRACTORY PHASE SURROUNDED BY LOW-MELTING SHELL» AND «PHASES ARE BESIDE» DURING HOT AND COLD ROLLING OF THE STEELS

S. I. Gubenko ^{1,2} Dr. Sc. (Engin.), Prof., **E. V. Parusov** ¹ Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
I. M. Chuiko ¹ Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res., **O. V. Parusov** ¹ Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.

¹ **Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro**

² **Ukrainian State University of Science and Technologies:
 SEI «Prydniprovskaya Academy of Civil Engineering and Architecture»**

Practice shows that non-metallic inclusions often play a decisive role in the initiation of fracture of parts and structures, and even negatively affect the level of mechanical properties of steels [1]. The purpose of the work is to study the features of the transformation of heterophase inclusions «refractory phase surrounded by a low-melting shell» and «phases are beside».

The behavior of microcomposite heterophase inclusions of «refractory phase surrounded by low-melting shell» and «phases are beside» during hot and cold rolling of the steels was investigated. It is shown that their behavior during deformation is associated with a complex interaction of the constituent phases of inclusions, as well as interaction in the system of inclusion-matrix interphase boundaries and internal interphase boundaries in inclusions. It is established that the studied inclusions are characterized by their own regularities in the development of deformation processes, which are determined by their chemical and phase composition, structure, deformation capacity of inclusion phases, and deformation temperature. The mutual influence of inclusion phases on their joint deformation during hot and cold rolling of steels is established.

It is shown that the change in the shape of the «refractory phase surrounded by a low-melting shell» inclusions during hot rolling is determined by the level of plasticity of the shell phase, as well as the development of a complex interaction of the phases due to the development of interphase friction and slippage. The enclosure of undeformable inclusions of oxides, spinels, titanium nitride, etc. in a plastic silicate or sulfide shell should be considered as a way to reduce the brittleness of non-metallic inclusions during hot rolling. The change in the shape of the «phases are beside» inclusions during hot rolling is determined by the level of plasticity of the inclusion phases, as well as the development of a complex interaction of the phases due to the development of interphase friction and slippage in the presence of a plastic phase. The change in the shape of the «refractory phase surrounded by a low-melting shell» inclusions during cold rolling is determined by the level of plasticity of the sulfide shell phase, as well as the development of a complex interaction of the phases due to the development of interphase friction and cold slippage along the interphase boundaries in the inclusions. The change in the shape of the inclusions of the «phases are beside» during cold rolling is determined by the level of plasticity of the sulphide phases of the inclusion (if it present), as well as the development of complex interaction of the phases due to the development of interphase friction and cold slippage. The role of plastic phases in the inclusions of «refractory phase surrounded by a low-melting shell» and «phases are beside» was investigated.

References

1. Gubenko S.I., Oshkaderov S.P. Non-metallic inclusions in steel. Kyiv : Naukova Dumka, 2016. 528 p.

INFLUENCE OF STEEL TREATMENT ON THE CRACK GROWTH NEAR NON-METALLIC INCLUSIONS

S. I. Gubenko ^{1,2} Dr. Sc. (Engin.), Prof.

¹ Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

² Ukrainian State University of Science and Technologies:
SEI Prydniprovskaya Academy of Civil Engineering and Architecture

It is known that non-metallic inclusions contribute to the embrittlement of steels, since the formation of a crack near the inclusion reduces the work of its initiation [1-4]. This leads to a decrease in the technological and operational properties of steels, and also causes fatigue and corrosion processes [5, 6]. The aim of the work was to comprehensively analyze the distribution features of the propagation of cracks in steels that have arisen near non-metallic inclusions of various types, as well as possible ways to inhibit their growth under different loading conditions and the use of treatments that affect the structural features of steels near the inclusions.

For different types of steels, the features of the propagation of cracks that have arisen near non-metallic inclusions of different types have been established, as well as possible methods of inhibiting their growth under different loading conditions and the use of treatments. It is shown that crack development is accompanied by their branching within the destroyed inclusions and in their clusters, as well as when encountering structural defects of the steel matrix. It is established that crack growth slowdown is possible as a result of inhibition by plastic sulfide inclusions, development of local plastic relaxation processes in the steel matrix, and changes in the stress state pattern near the inclusion due to changes in loading conditions. The effect of local microcomposite structures of the steel matrix obtained under high-energy impacts on the nature of crack development that occurred near non-metallic inclusions is shown.

References

1. Gubenko S. I., Oshkaderov S. P. Non-metallic inclusions in steel. Kyiv : Naukova Dumka, 2016. 528 p.
2. Sága M., Blatnická M., Blatnický M., Dižo J., Gerlici J. Research of the Fatigue Life of Welded Joints of High Strength Steel S960 QL Created Using Laser and Electron Beams. *Materials* (Basel, Switzerland), 03 Jun, 2020. 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112539>
3. Kusche C. F., Gibson J. S.-L., Wollenweber M. A., Korte-Kerzel, S. On the mechanical properties and deformation mechanisms of manganese sulphide inclusions. *Materials & Design*. 2020. 193(2):108801. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108801>
4. Qayyum F., Umar M., Elagin V., Kirschner M, Hoffman F. Influence of Non-Metallic Inclusions on Local Deformation and Damage Behavior of Modified 16MnCrS5 Steel. *Crystals*. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 281–288. <https://doi.org/10.3390/cryst12020281>
5. Zhang L., Ren Y. Non-metallic Inclusions in the Interstitial Free Steel. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*, 2025. P. 687–721. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_27
6. Zhang L., Ren Y. Evolution of Inclusions in Steel During Cooling and Heating. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*, 2025. P. 609–639. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0_24

NANOART AND MATERIALS SCIENCE: USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR PROCESSING STRUCTURES OF METALS AND ALLOYS

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov Dr. Sci. (Engin.), Prof.

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

The work analyzes the impact of artificial intelligence (AI) on the educational process, in particular its capabilities and limitations for all participants in the educational process. The focus is on the use of artificial intelligence during distance learning as a virtual assistant for performing laboratory work in the specialty G10 «Metallurgy». Of course, the introduction of information technologies into the educational process is one of the directions of modernization of the higher education system, which not only expands the horizons of educational opportunities, changes the methods of knowledge transfer, but also ensures high efficiency of the educational process and improves the quality of knowledge of higher education applicants.

The work focuses on the use of modern information technologies when working with metal and alloy structures as objects of research when creating NanoArt images. It is shown that NanoArt as a symbiosis of science and art visualizes the invisible world of atoms and molecules, reflecting the laws of nature that are present at both the macro and micro levels. It is noted that the process of creating nanostructures of metals and alloys occurs through physical experiments, after which their images are obtained using electron microscopes, and only then do the «artists» process these images using various graphic editors, creating colorful paintings – NanoArt images.

When creating NanoArt images as a «working» tool, it is possible to use both artificial intelligence (for example, ChatGPT) and graphic editors (for example, Adobe Photoshop CS and Paint 3D). The mechanism of transforming a black-and-white image of the structure of metals and alloys into multi-colored paintings is shown, in which, thanks to their creative approach and sometimes «repainting» of some image details, the authors see completely new, and sometimes unexpected compositions – landscapes, animals, objects and other images. When using artificial intelligence to process the structures of metals and alloys, before or during the dialogue with ChatGPT, to set up the answer, one should make the correct prompts, that is, give commands consistently, specifically and clearly, avoiding excessive generality and sometimes checking and finalizing the prompt.

Thus, the resulting NanoArt images embody not only the beauty of science, but also its creative potential. The interaction of art and nanotechnology, in turn, allows:

- to popularize modern Ukrainian art as a combination of innovative design (through graphic design) and nanotechnology;
- to attract the attention of higher education institutions, scientific communities, enterprises and other institutions to modern creative art and the latest technologies;
- to show the symbiosis of science and art, which are primarily components of the creative process and complement and improve each other, and in their unity open up new horizons of knowledge of the universe.

Thus, it has been established that artificial intelligence is an effective tool for optimizing the educational process and accelerating progress towards Sustainable Development Goal 4 «Quality Education». It has been determined that artificial intelligence facilitates the work of both scientific and pedagogical workers and higher education students, creating broad opportunities for improving the quality of education. However, it cannot replace traditional learning, but is only an assistant capable of significantly enriching the organization of the educational process and improving the quality of educational services provided that it is used ethically and rationally.

ABSORPTION OF INERT GASES AND FORMATION OF PORES IN EP975MP HEAT-RESISTANT ALLOY GRANULES

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof.

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

Today, it is especially relevant to obtain heat-resistant alloys with a minimum content of inert gases, such as Ar, He and Ne. The presence of pores with inert gas in powder particles reduces the service characteristics of products, and intraparticle pores have the greatest impact on the quality of heat-resistant alloys.

Among the methods for obtaining heat-resistant nickel alloys, gas or centrifugal spraying should be noted. During gas spraying, pores filled with a carrier gas are formed in powder particles. The presence of pores in powder particles caused the appearance of porosity in the compact material.

The purpose of this work is to determine the amount of argon in the powder of heat-resistant alloy EP975MP at different stages of production by gas and centrifugal spraying.

The technology of obtaining sprayed granules of a nickel-based heat-resistant alloy of the EP975MP type was carried out in the conditions of the State Enterprise «UkrNDIspetsstal» on gas (UrZHMV-3) and centrifugal spraying (UVRC) installations.

When studying the influence of the melt holding time in argon (Ar) on the porosity of the gas-sprayed powder, it was found that with an increase in the melt holding time in argon from 8 to 40 min. before spraying, the proportion of porous particles in the powder, depending on the fraction, increases by up to 1.4 times. In this regard, it can be assumed that one of the mechanisms of pore formation in particles is the absorption of argon by the melt during holding with the subsequent formation of pores in the melt droplets.

Microstructural analysis of the heat-resistant alloy EP975MP showed that the pores during gas spraying are spherical with clear edges, with larger fractions being more affected by voids and argon.

The mass fraction of argon in heat-resistant alloys was determined using the mass spectral method. Studies of the argon content in the EP975MP alloy at different stages of the technological process showed an increase in the mass fraction of argon after gas atomization due to the statistical and dynamic interaction of the inert gas with the metal.

After melting and vacuuming the melt at a residual pressure of 5 Pa in metal samples, the mass fraction of argon reaches $1 \cdot 10^{-5} \%$, and after gas atomization it reaches $2.3 \cdot 10^{-4} \%$.

Centrifugal atomization of metal melts allows for relatively small energy consumption to obtain compact powders with a small particle size distribution. The powder particles are characterized by the presence of gas pores, which are formed due to the initial gas capture during the holding of the melt in an induction furnace and its pouring into a metal receiver. The pores in centrifugal spraying are small, irregular in shape with jagged edges, and the number of particles with voids practically does not depend on their size. Argon is captured by the metal only in the process of movement along the disk, and not due to the weak gas-dynamic interaction of the gas directly on the melt drop.

Thus, after argon is introduced into the furnace chamber, its amount in the metal increases, and with further centrifugal spraying it does not change in comparison with gas spraying.

Thus, the analysis of the mechanism of pore formation in granules of a nickel-based heat-resistant alloy showed the absence of «dissolution» of Ar or an Ar-He mixture in the liquid or solid state at an argon level of up to $1 \cdot 10^{-4}$ wt %. Using physical and technical methods, the possibility of a significant reduction in the argon content in the EP975MP heat-resistant alloy has been established.

Progressive Metal Processing Technologies

UDC 621.77:004.8

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PRESSURE PROCESSING OF METALS

O. Vodennikova¹ Cand. Sc. (Engin.), Assoc. Prof., S. Vodennikov² Dr. Sci. (Engin.), Prof., K. Furlet¹

¹**Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia**

²**National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia**

Artificial intelligence (AI) is becoming a key element of modern metal forming technologies (stamping, forging, rolling, extrusion and incremental forming) and can act as an intelligent control, diagnostic and optimization module. The combination of sensors (e.g. pressure, temperature, strain, vibration), data streams and machine learning models allows companies to receive operational decisions on mode correction in real time, predict defects and plan maintenance.

In terms of technology, the application of AI can be considered in the following areas:

1. Predictive modeling of material properties during thermomechanical processing. For example, neural networks and regression based on Gaussian processes are used to predict plastic deformations, hardness, microstructure. This allows companies to predict how the workpiece will behave during processing. Studies show that in sheet forming processes using the incremental forming (ISF) method, the use of ANN models allows reducing the average forming error to ~68.5% [1].

2. Optimization of hot stamping and rolling modes. Data-driven optimization algorithms (Bayesian Optimization or Reinforcement Learning) can support optimal temperature-pressure profiles. Studies show that such approaches can reduce the variability of finished product properties, reduce energy consumption, and increase production stability [2].

3. In-process monitoring – analysis of time series from sensors to detect anomalies and predict failures. For example, in rolling mills, time series models are used to detect events such as strip breakage or welding anomalies, correcting roll positions or thickness in real time [3].

4. Tool path correction in sheet incremental forming (SPIF) processes to reduce spring-back and geometric errors. For example, thanks to ML models, it was possible to modify tool paths and feed rates so that the accuracy of shaping was significantly improved [1, 4].

Thus, the introduction of AI into the process of metal processing by pressure is a strategically important step to increase the competitiveness of modern metallurgical enterprises. The integration of sensor technologies, machine learning algorithms and digital twins opens up opportunities for qualitatively improving production indicators: reducing the level of scrap metal products, optimizing energy consumption and increasing the flexibility of technological processes. The key factors for successful implementation are a systematic approach to the digitalization of production, the phased implementation of AI solutions through pilot projects, thorough validation of models in real conditions and comprehensive training of technical personnel. Provided that balanced investments in infrastructure and competence are made, the transition to full-fledged AI-controlled production lines is a completely achievable task in the next 3–5 years.

References

1. Möllensiep D., Detering L., Kullessa P., Steinhof M., Kuhlenkötte B. Prediction of forming accuracy in incremental sheet forming using artificial neural networks on local surface representations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 133. P. 4923–4938. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14023-7>
2. Cao J., Bambach M., Merklein M., Mozaffar M., Xue T. Artificial intelligence in metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 73, Iss. 2. P. 561–587. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.102>.
3. AI Roll Forming: The Future of Intelligent Metal Fabrication. Machine Matcher. URL: <https://machinematcher.com/articles/2025/05/ai-roll-forming> (date of application: 25.10.2025).
4. Simonetto E., Ghiotti A., Bruschi S. Agile manufacturing of complex shaped bent profiles by incremental deformation. *Manufacturing Letters*. 2023. Vol. 36. P. 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.01.004>

Modeling and optimization of technological processes

UDK 669.17.046.516.2 : 669-154.001.5

PREPARATION OF COLD MODELING OF METAL MOLTEN ALLOYING PROCESSES

**S. V. Grekov, V. P. Pityuk Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
S. E. Samokhvalov, Dr. Sc. (Engin.), Prof.**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Previous studies using mathematical modeling have established the influence of the amount of lump alloying additive on changes in hydrodynamic and heat and mass transfer conditions in the contact zone with the metal melt in a short time from the moment the additive enters the liquid metal. However, due to the current lack of the necessary speed parameters in the literature, it is impossible to verify the adequacy of the theoretically obtained results, which necessitated additional research to determine the missing data. Thus, the feasibility of conducting special experiments on cold physical modeling was established.

Preparation for experimental research of complex metallurgical processes, which undoubtedly include the determination of the speed parameters of the hydrodynamics of the metal melt, using the method of cold physical modeling is a mandatory and responsible stage before performing the planned work. The preparatory process began with the selection of materials-imitators of alloying additives (lump ferromanganese of the FeMn78 brand and ferrosilicon of the FeSi45 brand), which are in most cases used in the production of steel, as well as tracers that will determine the directions and speeds of water flows-imitator of the metal melt. The selection of materials and their quantity was carried out using similarity criteria and in compliance with real industrial conditions of application of alloying materials. The next step was to prepare laboratory equipment. As a ladle, its transparent model of the Department of Electrometallurgy named after Acad. M.I. Gasyk of the Educational and Scientific Institute "Dniepro Metallurgical Institute" of the Ukrainian State University of Science and Technology was used. Video recording equipment, a compressor, an APC recorder, etc. were also used. In order to determine the influence of the density of the metal solution simulator on its electrical conductivity, lumpy table salt was used. To measure electrical signals on the inner walls of the bucket model, 12 electrodes were placed, and the bucket was also equipped with measuring devices, which were located in 3 mutually perpendicular directions (axes x, y, z) to enable calculations of flow speeds from fixed still frames at different times.

Tests of the assembled scheme of laboratory experimental equipment were carried out, some shortcomings were identified and eliminated. The equipment was verified to be operational and ready for the planned experimental studies.

A METHODOLOGY FOR APPROXIMATING STRESS-STRAIN DIAGRAMS FROM TENSILE TESTING OF STEEL REINFORCEMENT FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

M. Yu. Ambrazhey, E. V. Parusov Dr. Sc. (Engin.), Sen. Res.

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Stress-strain diagrams are a fundamental tool in material science and engineering practice, providing a graphical representation of a material's mechanical response to an applied load. These diagrams, typically obtained during uniaxial tensile tests, form the basis for the quantitative determination of the most important mechanical properties: the modulus of elasticity, yield strength, ultimate strength, and ductility parameters (relative elongation, reduction of area, etc.). Knowledge of these properties is critically important for the informed selection of materials in structural design, assessment of their load-bearing capacity, prediction of in-service behavior, and for product quality control.

However, the information contained in a tensile diagram is not limited to these standard parameters. A complete analysis of the curve's shape, especially in the plastic deformation region, allows for obtaining additional information about hardening mechanisms, the stability of plastic flow, sensitivity to strain rate and temperature, as well as assessing the material's capacity for energy absorption and fracture resistance. Understanding these aspects is necessary for modeling metal forming processes and for analyzing the behavior of structures under complex loading conditions, including dynamic and cyclic ones. For instance, methods for determining the tensile strain-hardening exponent n are actively used in ASTM E646 and ISO 10275 standards to assess the cold plastic deformation formability of sheets and strips. Given the widespread use of rebar, with a global market volume projected by Mordor Intelligence Inc. to be 144.75 million tons in 2025, it becomes clear that obtaining additional information about the behavior of steels used for rebar production and evaluating its operational characteristics is highly relevant. It has been shown that a certain positive correlation exists between the A_{gt} ductility characteristic and the n -value of rebar [1], which is important for ensuring high A_{gt} ductility under seismic conditions, but the existing methodology for determining n is quite complex and inaccurate.

A simplified methodology for approximating tensile test diagrams is proposed based on the following algorithm:

1. Conversion of the existing engineering stress-strain diagram into a true stress-strain diagram based on the principle of volume conservation.

2. Approximation of the strain-hardening region (up to the necking) using the modified Hollomon equation: $S = K(e - e_0)^n$, where S , e – the true stress and true strain, K – the strain-hardening coefficient (MPa), n – the strain-hardening exponent, e_0 – correction for machine compliance.

The use of the proposed methodology allows to simplify the determination of the n -value without using an extensometer.

References

1. Hortigón B., Gallardo J. M., Nieto-García E. J., López J. A. Strain hardening exponent and strain at maximum stress : Steel rebar case *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 196. P. 175–184. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.082>

EVALUATION OF PROPERTIES OF CHROMIUM-CONTAINING SLAGS FROM THE STANDPOINT OF INTERATOMIC INTERACTION IN MELTS

**D. Stepanenko Cand. Sc. (Engin.), A. Bielkova Cand. Sc. (Engin.),
D. Togobitskaya Dr. Sci. (Engin.), Prof., N. Hodotova**

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Rational control of the slag formation processes in the multicomponent system $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO/Fe}_2\text{O-MnO}$, which is widely used in the smelting of ferrochrome steels, is one of the determining factors for ensuring high steel quality and energy efficiency of production. The chromium oxide, Cr_2O_3 , which transfers into the slag from the metallic bath, has a significant and complex influence on its physicochemical properties.

Despite a large number of publications, the complex influence of Cr_2O_3 on the properties of multicomponent slags (viscosity, melting temperature, electrical conductivity, refining capacity) remains insufficiently studied. There is a lack of systematic data describing these dependencies at various Cr_2O_3 concentrations.

Chromium oxide exhibits a dual nature, which determines its ambiguous effect on the viscosity of the slag melt. At low concentrations, chromium oxide reduces slag viscosity, while at high concentrations, it acts as a structure-forming component, similar to SiO_2 , leading to an increase in viscosity. An additional increase in viscosity occurs due to the crystallization of refractory slag compounds, such as spinel, perovskite, and donathite, within the slag volume.

Existing studies on the influence of chromium oxide on the electrical conductivity of slags also show contradictory results. Some publications indicate a decrease in conductivity, while others report its increase or anomalous temperature dependencies. This aspect represents a serious gap in the understanding of slag system properties and requires in-depth study.

The influence of Cr_2O_3 cannot be considered in isolation, as it is closely linked by synergistic and antagonistic interactions with other oxides (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO , MnO). For a comprehensive evaluation of slag properties, it is expedient to use integral parameters of the oxide system model, which are based on the concept of directed chemical bonding [1]. The use of these parameters makes it possible to account for the cumulative effect of all components in the system on its final properties.

Research has established a high level of correlation between the viscosity of chromium-containing slags and the chemical equivalent of the slag composition (Δe) and the parameter of chemical individuality of the cationic sublattice ($\text{tg}\alpha$). It has been shown that slags of different technological purposes can be identified by specific Δe values.

The conducted studies confirm the expediency and effectiveness of using integral parameters of the oxide system composition for predicting and evaluating the properties of chromium-containing slags, with the aim of optimizing the compositions of slag-forming mixtures, which, in turn, leads to an increase in the efficiency of the ferrochrome steel smelting process.

References

- 1 Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. Vol. 64, No. 1, P. 58–71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF PHOSPHORUS BEHAVIOR IN METAL SYSTEMS BASED ON THE CONCEPT OF DIRECTED CHEMICAL BOND

**D. O. Stepanenko Cand. Sc. (Engin.), D. M. Togobitska Dr. Sci. (Engin.), Prof.,
I. R. Povorotnia Cand. Sc. (Engin.), S.V. Grekov**

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Modern ferrous metallurgy is at the stage of searching for new technological solutions aimed at reducing the cost of production, reducing the environmental burden, and effectively using raw materials. An eternal issue is ensuring an appropriate level of purity in terms of the content of harmful impurities, in particular phosphorus, because it has the ability to influence the morphology of non-metallic inclusions and enhance the heterogeneity of the metal, which affects the appropriate level of physicochemical properties, and therefore the quality of the metal. In order to create information support for modeling physicochemical interactions in the slag-metal-gas system, the Department of Physicochemical Problems of the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine is constantly working to update the database «Slag-Metal-Gas» of the «Databank «Metallurgy» [1]. A review of current information on the behavior of phosphorus in the Fe–Cr–P, Fe–Cr, Fe–P, Cr–P, Fe–Cr–P–O systems allowed us to form reliable representative data samples using the method of digitizing graphical dependencies while preserving their initial accuracy of fixation, as an important component for modeling and predicting physicochemical interactions with a corresponding focus on the removal of phosphorus into the slag phase. The theoretical platform for modeling the thermodynamic characteristics of the Mei-Mej-P system is the concept of directed chemical bonding [2]. The relationship between the enthalpy of the binary Fe–P system at temperatures of 298K and 900K and the phosphorus content is considered according to the data of the work [3]. According to the starting points of the concept of directed chemical bonding, the chemical individuality of the system, the reactivity and structural state of melts are expressed using the method of encoding the chemical composition of the experimental melt in the integral parameters of interatomic interaction: Z^Y – system state of charge parameter, e ; d – weighted average internuclear distance, 10^{-1} nm; $tg\alpha$ – a constant for each element that characterizes the gradient of change in the radius of an ion when its charge changes; pl – directional charge density, e/nm . The significant similarity between the dependencies presented in [3] and those obtained by us indicates in favor of using the parameters of interatomic interaction as estimators of the reliability of the obtained data. In particular, the parameter of interatomic interaction $tg\alpha$ practically reproduces the enthalpy curves obtained by the authors in [3]. Similar trends and dependencies are observed at a temperature of 900 K. With increasing phosphorus content, its charge increases, which is reflected by the parameter $tg\alpha$, while the weighted average internuclear distance encoded in the parameter d is minimal at its maximum content, which indicates the formation of strong interatomic bonds with the partner, in particular iron. Thus, the research results confirm that the parameters of interatomic interaction can serve as reliable criteria for assessing the energy characteristics of phosphorus-containing systems and adequately reflect the influence of phosphorus content on the change in entropic properties at different temperatures.

References

1. Togobitska D.M., Povorotnia I.R., Likhachev Yu.M., Khodotova N.E. Databases and model bases – a fundamental basis for the development of new technological solutions in the production of high-quality steels. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «*Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*». Dnipro, 2024. P. 155–160.
2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the «Metal-Slag» system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics*. Vol.64, No 1, P. 58–71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
3. CAO Zhan-Min, WANG Kun-Peng, QIAO Zhi-Yu, DU Guang-Wei. Thermodynamic Reoptimization of the Fe–P System. *Acta Physico-Chimica Sinica*. 2012. Vol. 28. No. 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201111172>

THE INFLUENCE OF ADDITIVE DENSITY ON HYDRODYNAMIC AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A LADLE DURING THEIR COLLECTIVE INJECTION

S. Ye. Samokhvalov, Dr. Sc. (Engin.), Prof., V. P. Piptiuk, Cand. Sc. (Engin.), Sen. Res.,
S. V. Grekov

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

During steel processing in ladle treatment units (e.g., LFU - Ladle Furnace Unit), various slag-forming and alloying additives are introduced directly into the liquid metal bath. These additives are most often fed in lump form, and upon their immersion in the metal, multiphase flows are formed where the solid particles move along with the liquid phase. Since the density of the additives usually differs from the density of the liquid metal, complex hydrodynamic conditions arise in the bath, leading to the formation of unsteady convective currents. As modern CFD studies have shown, in such conditions, adequate modeling requires combining the solution of the Navier–Stokes equations for the liquid phase with the description of the motion of solid additive particles.

There are few direct studies where the mass/volume of the additive itself acts as a governing parameter changing the flow field in the ladle – more often, mixing time is investigated under fixed hydraulic regimes. However, the amount of additive enters the models through several physical mechanisms. First of all, through the energetic (thermal) influence: large masses of colder additive (lump, briquette) create local "cold spots," intensify natural convection, and can temporarily modify the jet structures of the plume. Nevertheless, the influence of the amount of introduced additive on the hydrodynamics in the ladle has not been previously investigated.

Work [1] used mathematical modeling to examine the collective injection of lump additives (such as ferromanganese grade FMn78) with a density close to that of the molten steel. However, the influence on the melt hydrodynamics in the ladle of additives with a density differing from the density of the molten steel remained unexplored.

This work presents the development of the mathematical model for hydrodynamic and mass transfer processes during the collective injection of lump additives, proposed in [1], to account for different additive densities, and its software implementation in the C# language. Using the developed software, a series of calculations of the process under consideration was performed, which allowed for an assessment of the influence of the density of the supplied materials on the melt hydrodynamics in the ladle and the subsequent mass transfer of the additives.

It has been established that the difference in additive densities leads to a difference in the characteristics of their location after introduction, which affects the nature of their subsequent dynamics in the ladle.

This model is planned to be developed further to account for the melting or dissolution processes of additives with different densities and different thermophysical characteristics.

References

1. Samokhvalov S. Y., Piptiuk V. P., Grekov S. V. Influence of the quantity of the additive on the hydrodynamics of the metal bath in the ladle. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*. 2023. Vol. 37. P. 231–245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245>

CRITERIA AND METHODS FOR ASSESSING THE CONDITIONS OF LAYER BONDING AND DELAMINATION IN MULTILAYER ROLLED METAL

Ye. S. Klemeshov, Cand. Sci. (Engin.), I. Yu. Prykhodko, Dr. Sci. (Engin.), Sen. Res.

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro

Currently, the main problem in the production of multilayer composites is achieving a strong bond between the metal layers and assessing the strength of this bond. There are numerous methods for assessing bond strength, and modern research often uses several such methods simultaneously to monitor and evaluate the bond strength of the obtained samples. The most popular assessment methods are those of mechanical testing of bond strength, such as shear tests, peel tests, and in some cases, bending tests. These methods are popular because they are simple, and as a result of the tests, researchers obtain a specific quantitative value that characterizes the bond strength. There are also methods for microstructural assessment of bond strength using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) with EDS analysis, radiography, and hardness measurements of the layers at the bonding interface.

Almost all the listed methods for assessing the condition of the bonding interface and the bond strength belong to those used after physical experiments have been conducted, thus increasing the time and material costs of the research. At the same time, FEM modeling can be used both before and after physical experiments. However, for the purposes of predicting the possibility of bonding and assessing the strength of the bond between metal layers, this method is used extremely rarely. Existing analytical models take into account many variables, which are usually obtained purely empirically and adapted only for specific rolling process parameters to obtain sufficiently accurate results; however, at the same time, they are not universal in application, which limits their capabilities for calculating different combinations of layers and materials when developing technologies and therefore require certain adaptation.

Thus, the development of more universal calculation methods for assessing the bond strength of layers in bimetal and multilayer rolling using FEM simulation software is an urgent task. Based on numerous studies in the field of metal layer bonding during rolling, a criterion for the bonding of metal layers and a methodology for calculating the strength of the bond between metal layers have been developed. The developed methodology is based on the theory of film rupture during cold rolling, takes into account the geometry of the deformation zone, friction, and the properties of the metals being deformed. Furthermore, the methodology was developed considering the possibility of its implementation using computer simulation in the QForm UK software through a built-in program tool, such as "user subroutines".

AUTOMATIC METAL PROCESSING LINES AS A STRATEGIC RESOURCE OF UKRAINE'S DEFENSE INDUSTRY IN WARTIME

D.Yu. Kanivets, O.M. Nesvit

Mechanical Engineering Professional College of Sumy State University, Sumy

During wartime, industry plays a crucial role in strengthening the defense capability of the state. The efficiency and speed of producing parts and components determine the performance of the defense complex. Under conditions of resource and personnel shortages, automation becomes the key means of increasing productivity. Automatic metal processing lines provide continuous, precise, and flexible production, contributing to the technological resilience and efficiency of Ukraine's industry

During wartime, the rapid and high-quality manufacturing of parts for military equipment and machinery becomes especially important, as the country's defense capability depends on it. Under conditions of limited resources and workforce shortages, automatic metal processing lines play a key role by ensuring high productivity, accuracy, and continuity of production.

Automatic lines allow most technological operations to be performed without direct human involvement. This significantly increases productivity and reduces the risk of errors. Machines operate according to programmed instructions, maintaining a level of precision that is difficult to achieve manually. This precision is critically important when manufacturing military parts, where even the slightest deviation can affect the reliability of equipment [1].

Another advantage of automation is process stability. Automatic lines can operate around the clock, without fatigue or the influence of human factors. This ensures continuous production during wartime, when time is of enormous importance.

In addition, modern lines with numerical control can be quickly reconfigured for different products. For example, within a few hours, a factory can switch from manufacturing body parts to producing components for armored vehicles or drones. Such flexibility makes automatic lines indispensable in the military industry. It is also important that automation helps reduce metal waste. Precise machining allows materials to be used as efficiently as possible, which is especially relevant during raw material shortages. Moreover, automatic systems monitor the condition of equipment, preventing breakdowns that could lead to production downtime [2].

In the future, the development of automatic metal processing lines will become one of the key directions in modernizing Ukrainian industry. Further implementation of digital technologies will provide even greater precision, energy efficiency, and production speed. This will not only meet the needs of the defense complex during wartime but also create a strong technological foundation for postwar economic recovery.

References

1. Automated Metal Processing Lines: Advantages and Disadvantages. Metalloobrabotka.org.ua. URL: https://metalloobrabotka.org.ua/ua/avtomatyzovani-liniyi-dlya-obrobky/?utm_source
2. Plan Ukraine Facility (2024). URL: <https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/plan-ukraine-facility.pdf>

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF IRON CARBURIZATION BY CO GAS DURING REDUCTION FROM WÜSTITE

S. P. Panteikov Cand. Sc. (Engin.), A. A. Romanenko, Ya. I. Bondarenko

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The reduction of iron from its oxides (iron ore materials) occurs step by step – through the successive removal of oxygen from both the initial and intermediate oxides formed during the reduction process. The reduced iron is always carburized to the state of cast iron. It is generally considered that the carburization process takes place due to the reactions of iron with both CO gas and solid carbon from coke (or coal). These scientific principles are also presented in various literature sources and on internet resources.

The inevitability of carburization of reduced iron, both in the blast furnace and in other reduction units, excludes the possibility of obtaining the final product in the form of pure (carbon-free) or low-carbon iron (steel). In this regard, the issues of thermodynamic analysis of the carburization processes of iron during its reduction from wüstite, primarily by CO gas, become particularly relevant. Thermodynamic studies of the conditions under which chemical reactions of carburization of reduced iron by CO gas occur will contribute to a proper understanding of the process of direct reduction of iron from iron ore raw materials (by CO gas and solid carbon), followed by its carburization in metallurgical reduction furnaces, with the aim of creating a reliable physico-chemical model of this process. This is also necessary for the further theoretical justification and industrial development of innovative technologies for the one-stage production of liquid steel directly from iron-containing raw materials, instead of liquid pig iron (or its granulated analogue). In other words, to eliminate – just as it occurred in various ancient bloomery furnaces – the intermediate stage of obtaining pig iron, which modern reduction furnaces have so far failed to accomplish, despite the existence of a large number of different direct reduction technologies in global metallurgical production.

The results of the conducted thermodynamic analysis, using the derived expressions [1] for calculating the Gibbs free energy for the chemical reactions of indirect reduction of iron from wüstite and carburization of iron by CO gas, made it possible to establish that the carburization of reduced iron by CO gas (along with the previously established [2, 3] impossibility of reducing iron from wüstite by CO gas above 765 °C) practically does not occur, or the degree of carburization is negligibly small, which correlates well with data from some literature sources. A preliminary conclusion has been made (which requires further confirmation) about the possibility of carburizing reduced iron during its reduction from wüstite exclusively due to solid carbon.

References

1. Panteikov S. P. Termodynamichniy analiz umov perebihu khimichnykh reaktsii navuhletsivannia zaliza hazom CO pry vidnovlenni z vjustytu [Thermodynamic analysis of chemical reactions conditions of iron carbonization by CO gas during reduction from wustite]/ *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Tekhnichni nauky*. Dnipro: DVNZ «Pryazov. derzh. tekhn. un-t», 2024. Vol. 49. Iss. 1. P. 175–183. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243> (in Ukrainian).
2. Panteikov S. P. Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupin-chastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za isnuiuchymy formulamy i za standartnymy znachenniamy entalpii ta entropii rechovyn [Calculation of the temperatures of the chemical reactions of the iron stepped recovery from hematite with co gas and gasification of solid carbon according existing formulas and by standard values of enthalpy and entropy of substances]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU: (tekhnichni nauky)*. Kamianske: DDTU, 2021. Vol. 2. Iss.39. P. 16–26. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2> (in Ukrainian).
3. Panteikov S. P. Rozrakhunok temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rechovyn do kysniu [Calculation of chemical reaction temperatures of stepwise iron reduction from hematite with CO gas and gasification of solid carbon by degrees of chemical affinities of substances with oxygen]. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1. Iss. 2. P. 1–8. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220102.1> (in Ukrainian).

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF MANGANESE CARBURIZATION BY CO GAS DURING REDUCTION FROM MANGANESE MONOXIDE

S. P. Panteikov Cand. Sc. (Engin.), Ya. I. Bondarenko, A. A. Romanenko

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

The reduction of manganese from its oxides, which are present in both iron-containing and manganese-containing raw materials, is a stepwise process accompanied by a decrease in the oxidation state of manganese as a result of the successive removal of oxygen from its oxides (initial and intermediate ones formed during the reduction process).

Under industrial conditions, the main method for obtaining manganese is its thermal reduction using gaseous carbon monoxide (CO gas) and solid carbon C (coke or coal). As in the case of iron, it is considered that during the reduction process, manganese interacts with the reducing agents (CO and C), which leads to the formation of manganese carbides or dissolution of carbon in manganese. Literature sources and modern scientific Internet resources also provide information about the mechanisms of manganese reduction and the accompanying carburization reactions.

The high affinity of manganese for oxygen and the difficulty of its complete reduction without accompanying carburization complicate the reduction of pure manganese (without the formation of its carbides) in iron or the production of manganese-containing low-carbon alloys (Fe-Mn and Si-Mn) without further purification stages. This necessitates a deep thermodynamic analysis of the processes associated with the reduction of manganese from its oxides, particularly from MnO, involving CO gas and solid carbon C. In this regard, the thermodynamic analysis of manganese carburization processes during its reduction from manganese monoxide, primarily by CO gas, becomes relevant in order to clarify the possibility of this process occurring.

Thermodynamic studies of the chemical reactions involved in the indirect reduction of Mn from Mn compounds and the carburization of manganese by CO gas, using original expressions for calculating changes in the numerical values of Gibbs free energy, make it possible to assess the likelihood of the manganese carburization process by CO gas under specific temperature conditions. Based on the calculations, it has been established that at certain temperatures of the actual reduction process, the carburization of manganese in the gas phase involving CO is unlikely and practically does not occur (alongside the previously established impossibility of reducing Mn from MnO compound by CO gas [1, 2]). This conclusion is consistent with certain literature data and provides grounds to suggest (this assumption requires further confirmation) that the main mechanism of carburization is the interaction of reduced manganese with solid carbon.

The obtained results are important for constructing a reliable physico-chemical model of the direct manganese reduction process. This is also necessary for the development and improvement of single-stage technologies for the production of low-carbon manganese alloys without further refining, as well as for the development of new technologies for the direct reduction of iron aimed at producing steel.

References

1. Panteikov S. P., Bondarenko Ya. I., Romanenko A. A., Uzunov I. I. Analiz protsesiv stupinchastoho vidnovlennia marhantsiu z yoho dioksydu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu z pozytsii termodynamiky [Analysis of the processes of manganese step restoration from its dioxide by co gas and gasification of solid carbon from the position of thermodynamics]. *Modern problems of metallurgy*. 2024. Vol. 27. P. 141–158. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2024.01.10> (in Ukrainian).
2. Panteikov S. P., Bondarenko Ya. I., Romanenko A. A., Uzunov I. I. Rozrakhunok termodynamichnykh temperatur perebihu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia marhantsiu z yoho dioksydu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rehovyn do kysniu [Calculation of thermodynamic temperatures of chemical reactions of stepwise manganese reduction process from its dioxide by co gas and gasification of solid carbon by degrees of chemical affinity of substances to oxygen]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU: (tematychnyi vypusk) «Do 95-richchia kafedry metalurhii im. prof. V.I. Lohinova DDTU»*. Kamianske: DDTU. 2024. P. 63–75. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.6> (in Ukrainian).