



Kam legirlangan po‘lat qotishmalari tarkibidagi Metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning tahlili

¹Nozimjon Xolmirzayev, ¹Nodir Turaxodjayev, ²Shaxzodjon Turdiyev,

¹Chorshanbiyeva Lobar, ¹Rustam Parpiyev, ¹Farxad Maksumov,

¹Dilshod Sartibayev, ¹Jaloliddin Egamshukurov, ¹Nargiza Sadikova

¹Toshkent davlat texnika universiteti, Metallar texnologiyalari kafedrası

²Toshkent davlat transport universiteti, Materialshunoslik va mashinasozlik kafedrası

xolmirzayev_nozimjon@mail.ru

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada kam legirlangan po‘lat qotishmalari tarkibidagi metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning morfologik, kimyoviy va fazaviy tarkibi tadqiq etilgan. Tadqiqotda an‘anaviy va taklif etilgan texnologiyalar asosida olingan po‘lat namunalarining qiyosiy tahlili amalga oshirilgan. Metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning miqdori, o‘lchami, shakli va morfologik xususiyatlari metallografik usul yordamida baholangan, ularning elementar tarkibi esa mikrorentgen-spektral tahlil asosida aniqlangan. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, po‘lat tarkibidagi qo‘shimchalar asosan Ca–Al–Mg–O–S tizimiga mansub murakkab oksid-sulfid fazalardan tashkil topishi aniqlandi. Qo‘shimchalarning asosiy qismini kalsiy alyuminatlari tashkil etib, ularda $MgO \cdot Al_2O_3$ tipidagi magniyli shpinel, CaS va MnS kabi fazalar ham mavjudligi qayd etildi. Qo‘shimchalarning morfologiyasi va fazaviy tarkibi o‘rtasidagi bog‘liqlik aniqlanib, ularning issiq deformatsiyalanish jarayonidagi xatti-harakatiga ta‘siri baholandi. Olingan natijalar asosida metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning fazaviy tarkibini boshqarish uchun $3CaO \cdot Al_2O_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlarini shakllantirishga yo‘naltirilgan texnologik yondashuv taklif etildi.

Kalit so‘zlar:

Kam legirlangan po‘lat, metall bo‘lmagan qo‘shimchalar, metallografiya, mikrorentgen-spektral tahlil, kalsiy alyuminatlar, magniyli shpinel, oksid-sulfid fazalar, oksidsizlantirish, morfologiya, fazaviy tarkib

Анализ неметаллических включений в составе низколегированных стальных сплавов

АННОТАЦИЯ

В статье исследованы морфологический, химический и фазовый состав неметаллических включений в низколегированных сталях. Проведен сравнительный анализ образцов стали, полученных по традиционной и предлагаемой технологиям. Количество, размеры, форма и морфологические особенности неметаллических включений оценивались методом металлографического анализа, а их элементный состав определялся методом микрорентгеноспектрального анализа. Установлено, что исследованные неметаллические включения в основном представлены сложными оксидно-сульфидными фазами системы Ca–Al–Mg–O–S. Основную часть включений составляют кальциевые алюминаты, в составе которых также выявлены магниевые шпинели типа $MgO \cdot Al_2O_3$, а также сульфидные фазы CaS и MnS. Установлена взаимосвязь между морфологией и фазовым составом включений и оценено их влияние на поведение стали в

Ключевые слова:

Низколегированная сталь, неметаллические включения, металлографический анализ, микрорентгеноспектральный анализ, кальциевые алюминаты, магниевая шпинель, оксидно-сульфидные фазы, раскисление,



процессе горячей деформации. На основании экспериментальных результатов и термодинамических расчетов предложен технологический подход, направленный на формирование кальциевых алюминатов типа $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ для управления фазовым составом неметаллических включений. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования процессов раскисления и модифицирования стали, а также целенаправленного регулирования размеров, морфологии и фазового состава неметаллических включений.

морфология,
фазовый состав.

Analysis of non-metallic inclusions in low-alloy steels

ABSTRACT

This paper investigates the morphological, chemical, and phase composition of non-metallic inclusions in low-alloy steel. A comparative analysis was carried out for steel samples produced using conventional and proposed technologies. The amount, size, shape, and morphological characteristics of non-metallic inclusions were evaluated by metallographic analysis, while their elemental composition was determined using micro-X-ray spectral analysis. The results showed that the non-metallic inclusions in the investigated steel are mainly represented by complex oxide-sulfide phases belonging to the Ca–Al–Mg–O–S system. Calcium aluminates constitute the major part of the inclusions, while $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -type magnesium spinel and sulfide phases such as CaS and MnS were also identified. A relationship between the morphology and phase composition of the inclusions was established, and their influence on the behavior of inclusions during hot deformation was evaluated. Based on the experimental results and thermodynamic calculations, a technological approach aimed at promoting the formation of $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -type calcium aluminates was proposed to control the phase composition of non-metallic inclusions. The obtained results provide a scientific basis for improving steel deoxidation and modification processes and for targeted control of the size, morphology, and phase composition of non-metallic inclusions.

Keywords:

Low-alloy steel, non-metallic inclusions, metallographic analysis, micro-X-ray spectral analysis, calcium aluminates, magnesium spinel, oxide-sulfide phases, deoxidation, morphology, phase composition.

Kirish. Bugungi kunda mashinasozlik, metallurgiya, qurilish va boshqa sanoat tarmoqlarida foydalaniladigan po‘lat mahsulotlarning ekspluatatsion ko‘rsatkichlariga qo‘yiladigan talablarning ortib borishi ularning kimyoviy tarkibi va strukturaviy holatini takomillashtirishni taqozo etmoqda. Po‘latning mexanik xossalari, mustahkamligi, plastikligi, charchashga chidamliligi va ishlov berish qobiliyati nafaqat uning kimyoviy tarkibi va metall matritsasining mikrostrukturasi, balki tarkibidagi metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning miqdori, o‘lchami, morfologiyasi va kimyoviy tarkibiga ham bog‘liq [1, 2].

Metall bo‘lmagan qo‘shimchalar po‘lat ishlab chiqarish jarayonida oksidsizlantirish, legirlash, ikkilamchi metallurgik ishlov berish hamda qotishmaning kristallanishi jarayonlarida shakllanadi. Ularning hosil bo‘lishi va yakuniy tarkibiga po‘latning kimyoviy tarkibi, harorat, kislorod va oltingugurt miqdori, shlakning tarkibi hamda texnologik jarayonlarning parametrlari sezilarli ta‘sir ko‘rsatadi. Ayrim qo‘shimchalar po‘latning mexanik xossalari salbiy ta‘sir ko‘rsatishi, metall matritsada kuchlanishlar konsentratsiyasini yuzaga keltirishi va ekspluatatsiya jarayonida darzlar hosil bo‘lishiga sabab bo‘lishi mumkin [3-5].

Ayniqsa, kam legirlangan po‘latlarda metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning tarkibi va morfologiyasini nazorat qilish muhim ahamiyatga ega. Bunday po‘latlarni ishlab chiqarishda



alyuminiy yordamida oksidsizlantirish natijasida hosil bo'ladigan alyuminiy oksidi va kalsiy alyuminatlari, shuningdek, magniyli shpinellar hamda sulfidli birikmalar po'latning strukturaviy bir jinsliligiga ta'sir ko'rsatishi mumkin [6]. Ushbu qo'shimchalarning o'lchami va fazaviy tarkibi ularning issiq deformatsiyalanish jarayonidagi xatti-harakatini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi.

Metall bo'lmagan qo'shimchalarning zararli ta'sirini kamaytirish va ularning xossalarini boshqarishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri qo'shimchalarni modifikatsiyalash hisoblanadi. Xususan, kalsiy bilan ishlov berish orqali alyuminiy oksididan tashkil topgan qattiq qo'shimchalarni kalsiy alyuminatlarga aylantirish, ularning erish harorati va deformatsiyalanish xossalarini o'zgartirish mumkin. Bunda kalsiyni sarfi, po'latdagi kislorod va oltingugurt miqdori hamda oksidsizlantirish sharoitlarini o'zaro muvofiqlashtirish talab etiladi [7-9].

Shu bilan birga, metall bo'lmagan qo'shimchalarning faqat umumiy miqdorini kamaytirish ularning po'lat xossalariga ta'sirini to'liq bartaraf etmaydi. Qo'shimchalarning kimyoviy va fazaviy tarkibini, o'lchamlarini hamda metall matritsasida taqsimlanishini kompleks ravishda o'rganish zarur. Ayniqsa, yirik globulyar, geterogen va prokatlash jarayonida deformatsiyalangan qo'shimchalarning tarkibini aniqlash ularning shakllanish mexanizmlarini tushunish va texnologik jarayonlarni takomillashtirish uchun muhimdir [10].

Metall bo'lmagan qo'shimchalarning xossalarini o'rganishda optik metallografiya va mikrorentgen-spektral tahlil usullaridan kompleks foydalanish alohida ahamiyatga ega. Optik metallografiya qo'shimchalarning shakli, o'lchami, morfologiyasi va metall matritsasida joylashishini baholash imkonini bersa, mikrorentgen-spektral tahlil ularning elementar tarkibini aniqlashga xizmat qiladi. Ushbu usullarni birgalikda qo'llash qo'shimchalarning ehtimoliy fazaviy tarkibini baholash va ularning hosil bo'lish sharoitlarini tahlil qilish imkonini beradi.

Po'lat tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning hosil bo'lishi, tasnifi va xossalarini boshqarish masalalari metallurgiya sohasidagi muhim ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. So'nggi yillarda olib borilgan tadqiqotlarda qo'shimchalarning nafaqat kimyoviy tarkibi, balki ularning o'lchami, shakli, taqsimlanishi va fazaviy holatining po'lat sifatiga ta'sirini o'rganishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Costa e Silva [11] tomonidan 2018-yilda chop etilgan "Non-metallic inclusions in steels – origin and control" nomli sharh maqolasida po'lat tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning kelib chiqishi, tasnifi va shakllanishiga ta'sir etuvchi omillar batafsil tahlil qilingan. Muallif qo'shimchalarning tarkibi va miqdori po'latni ishlab chiqarish jarayonidagi termodinamik sharoitlar, shlak tarkibi hamda texnologik parametrlar bilan uzviy bog'liqligini ta'kidlagan. Shuningdek, qo'shimchalarning xossalarini maqsadli boshqarish orqali po'latning sifatini oshirishga qaratilgan «inclusion engineering» konsepsiyasining ahamiyati yoritilgan. Mazkur tadqiqot metall bo'lmagan qo'shimchalarni faqat nuqson sifatida emas, balki po'latning xossalarini boshqarish mumkin bo'lgan strukturaviy komponent sifatida o'rganish zarurligini asoslaydi. Ren va hammualliflar [12] tomonidan 2023-yilda chop etilgan "Modification of Non-metallic Inclusions in Steel by Calcium Treatment: A Review" nomli sharh maqolasida po'lat tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarni kalsiy bilan modifikatsiyalash jarayonlari o'rganilgan. Mualliflar kalsiy bilan ishlov berish alyuminiy oksidi qo'shimchalarni kalsiy alyuminatlarga aylantirish imkonini berishini ko'rsatgan. Bunda po'lat tarkibidagi umumiy kalsiy, kislorod, oltingugurt va alyuminiy miqdorlari hosil bo'ladigan qo'shimchalarning tarkibiga ta'sir etuvchi muhim omillar sifatida ko'rib chiqilgan. Tadqiqotda kalsiy bilan modifikatsiyalash jarayonida suyuq kalsiy alyuminatlari hosil bo'lishining ahamiyati, shuningdek, qattiq qo'shimchalarning quyish jarayonidagi muammolar bilan bog'liqligi yoritilgan. Mualliflar kalsiy bilan ishlov berish sharoitlari o'zgarganda sulfidlarning shakllanishi va ularning prokatlash jarayonidagi deformatsiyalanish xossalari ham o'zgarishini qayd etgan. Mazkur ish kalsiy alyuminatlarining tarkibi va shakllanish sharoitlarini o'rganish uchun muhim ilmiy asos hisoblanadi. Metall bo'lmagan qo'shimchalarning tarkibi va morfologiyasini aniqlashda tahlil usullarining imkoniyatlari ham muhim ahamiyatga ega. Ramesh Babu va Michelic [13] tomonidan 2024-yilda chop etilgan "Overview of application of automated



SEM/EDS measurements for inclusion characterization in steelmaking” nomli maqolada metall bo‘lmagan qo‘shimchalarni o‘rganishda skanerlovchi elektron mikroskop va energiya-dispersiv rentgen spektroskopiya (SEM/EDS) usullarining qo‘llanilishi tahlil qilingan. Mualliflar ushbu usullar yordamida qo‘shimchalarning o‘lchami, shakli, joylashuvi va kimyoviy tarkibi haqida batafsil ma’lumot olish mumkinligini ko‘rsatgan. Shuningdek, avtomatlashtirilgan tahlil usullarining ko‘p sonli qo‘shimchalarni statistik jihatdan o‘rganishdagi imkoniyatlari yoritilgan. Ushbu tadqiqotlar metallografik kuzatuvlarni elementar tahlil bilan to‘ldirish qo‘shimchalarning xossalarini chuqurroq tushunish imkonini berishini ko‘rsatadi.

Yuqorida ko‘rib chiqilgan ilmiy ishlar metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning shakllanishi va ularni modifikatsiyalash jarayonlari bo‘yicha muhim nazariy va amaliy natijalarni o‘z ichiga oladi. Biroq qo‘shimchalarning morfologik xossalari, elementar tarkibi va ehtimoliy fazaviy tarkibini o‘zaro bog‘liq holda tahlil qilish, ayniqsa, yirik globulyar va murakkab geterogen qo‘shimchalarning tuzilishini o‘rganish dolzarb masalalardan biri bo‘lib qolmoqda.

Shu sababli mazkur tadqiqotda kam legirlangan po‘lat tarkibidagi metall bo‘lmagan qo‘shimchalarni optik metallografiya va mikrorentgen-spektral tahlil usullari yordamida kompleks o‘rganishga alohida e’tibor qaratildi. Qo‘shimchalarning morfologiyasi va elementar tarkibi asosida ularning ehtimoliy fazaviy tarkibini aniqlash hamda oksidsizlantirish texnologiyasi bilan bog‘liqligini baholash tadqiqotning asosiy ilmiy yo‘nalishini tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. Po‘lat qotishmalari tarkibida mavjud bo‘lgan metall bo‘lmagan fazalar bilan bog‘liq xossalarni yaxshilash maqsadida tadqiqot doirasida ikki xil usul asosida olingan po‘lat qotishmalarining qiyosiy tahlili amalga oshirildi. Tadqiqot uchun an’anaviy texnologiya asosida olingan I-seriya hamda taklif etilayotgan texnologiya asosida olingan II-seriya qotishmalar tanlab olindi.

Tadqiqotning asosiy maqsadi, po‘lat qotishmalarini ishlab chiqarish jarayonida oksidsizlantirish rejimlarining o‘zgarishi metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning shakllanishi, tarkibi, morfologiyasi va miqdoriy ko‘rsatkichlariga qanday ta’sir ko‘rsatishini aniqlashdan iborat. Shu bilan birga, metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning xossalarini miqdoriy jihatdan baholashga alohida e’tibor qaratildi.

An’anaviy texnologiya asosida o‘tkazilgan birinchi seriyadagi tadqiqotlar jami 9 ta namunadan iborat. Namunalarining metallografik tahlili yarim miqdoriy, ya’ni ballik baholash usulida amalga oshirildi.

Tahlil natijalari an’anaviy usulda olingan namunalar tarkibida nisbatan yirik o‘lchamdagi metall bo‘lmagan qo‘shimchalar mavjudligini ko‘rsatdi. Ularning maksimal baholangan qiymati 5 ballgacha yetgan (1-jadval). Amaldagi metallografik tasniflash metodikasiga muvofiq, kuzatilgan qo‘shimchalarning katta qismi silikatlar guruhiga mansub. Biroq mazkur turdagi po‘latlarni ishlab chiqarishda qo‘llaniladigan oksidsizlantiruvchilar tarkibi va texnologik jarayon xossalari po‘lat tarkibida silikat tabiatli qo‘shimchalarning bunday miqdorda mavjud bo‘lishini to‘liq izohlab bermaydi. Shu sababli kuzatilgan metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning tabiatini aniqlash va ularning haqiqiy tarkibini chuqurroq o‘rganish dolzarb xisoblanadi.

Keyingi tadqiqotlar uchun an’anaviy usulda olingan namunalar orasidan 1donasi tanlab olinib, mazkur namuna metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning miqdori, o‘lchami va morfologik xossalari jihatidan ushbu usulda olingan namunalar uchun eng yomon namuna sifatida qabul qilindi. Tanlab olingan namunaning kimyoviy tarkibi 2-jadvalda keltirilgan. Metall bo‘lmagan qo‘shimchalarning optik tahlili ularning tabiatini aniqlash, identifikatsiya qilish va mavjud tasniflash mezonlari asosida guruhlariga ajratish maqsadida amalga oshirildi.

Tadqiqot davomida qo‘shimchalarning tuzilish xossalari, o‘lchami, geometrik shakli, morfologiyasi, optik xossalari va metallografik kesimdagi joylashuvi asosiy identifikatsiya belgilari sifatida qabul qilindi.

Natijalar va muhokama.

Metallografik kuzatuvlar natijasida aniqlangan metall bo‘lmagan qo‘shimchalar shakli va tuzilishiga ko‘ra bir necha turga ajratildi. Jumladan, nuqtasimon, satrsimon, plastik, guruhli va



deformatsiyalanmagan qo'shimchalar alohida qayd etildi. Mazkur tasnif keyingi miqdoriy tahlil natijalarini tizimlashtirish uchun ham asos bo'lib xizmat qiladi. An'anaviy uslda olingan namunalarining metall bo'lmagan qo'shimchalar bilan ifloslanganlik darajasi metallografik usul yordamida ballik tizimda baholandi. Olingan natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

An'anaviy usulda olingan namunalar ifloslanganligini baholash natijalari

Na mu na №	Oksidl ar: nuqta simon	Oksid lar: satsim on	Silik at lar: plas tik	Silik at lar: gu ruhl i	Silikatl ar: deform at siylan magan	Oksidl ar bo'yic ha max. ball	Silikat lar bo'yic ha max. ball	Barcha turda gi qo'shimch alar bo'yicha max. ball
1	1.0	0.4	0	0.4	1.6	1.5	2.5	2.5
2	1.0	1.0	1.8	3.3	1.5	1.5	3.5	3.5
3	1.0	0.8	0	0.8	1.8	2.0	3.5	3.5
4	0.7	0.3	0	0.4	1.4	1.5	3.0	3.0
5	1.1	1.1	0	0	1.6	2.0	2.5	2.5
6	0.7	0.7	0	1.7	1.7	2.0	3.0	3.0
7	0.8	1.0	0.2	0.8	1.5	2.5	4.0	4.0
8	1.2	0.8	0	0.7	2.0	2.0	4.0	4.0
9	1.3	1.4	0	0.7	3.4	2.5	5.0	5.0

Birinchi seriya bo'yicha metall bo'lmagan qo'shimchalarning barcha turlari hisobga olingan holda o'rtacha maksimal ball 3.44 ni tashkil etdi.

Jadval ma'lumotlaridan ko'rinib turibdiki, namunalar orasida metall bo'lmagan qo'shimchalar miqdori va o'lchamlari sezilarli darajada farqlanadi. Xususan, 9- namunada deformatsiyalanmagan silikat tipidagi qo'shimchalarning o'rtacha ball qiymati 3.4, maksimal qiymati esa 5 ballga yetgan. Mazkur natija ushbu namunani batafsil mikrostruktura va optik tahlil uchun tanlashga asos bo'ldi.

2-jadval.

An'anaviy texnologiya asosida olingan namuna (1) hamda taklif etilgan texnologiyasi asosida olingan namuna (2) ning kimyoviy tarkibi

№	Elementlar													
	C	Si	M n	P	S	Cr	Ni	C u	Al	N	V	Ti	N b	O
1.	0. 07 7	0. 21 0	1. 35 1	0. 01 1	0. 00 3	0. 03 9	0. 01 2	0. 01 7	0. 03 7	-	0. 04 4	0. 00 4	0. 03 3	0.0 03
2.	0. 09 4	0. 27 5	1. 42 1	0. 01 2	0. 00 4	0. 02 0	0. 01 0	0. 01 5	0. 04 1	0. 00 8	0. 04 4	0. 00 3	0. 03 2	0.0 03

2-jadvalga ko'ra, 1 va 2 namunalarning kimyoviy tarkibi asosiy legirlovchi elementlar bo'yicha bir-biriga yaqin bo'lsa-da, ayrim elementlarning miqdorida farqlar mavjud. Mazkur kimyoviy tarkib ma'lumotlari metall bo'lmagan qo'shimchalarning shakllanish tabiatini tahlil qilishda muhim ahamiyatga ega bo'lib, keyingi bosqichlarda ularning morfologik va optik xossalari bilan birgalikda ko'rib chiqilgan.

Metall bo'lmagan qo'shimchalarning tabiatini aniqlashda ularning faqat o'lchami va miqdorini baholash bilan cheklanib qolmasdan, morfologik va optik xossalari kompleks tahlil qilish zarur. Shu sababli tadqiqot davomida har bir qo'shimchaning tashqi ko'rinishi, shakli, o'lchami, metall matritsasida joylashish xossasi va optik mikroskop ostidagi ko'rinishi hisobga olindi.

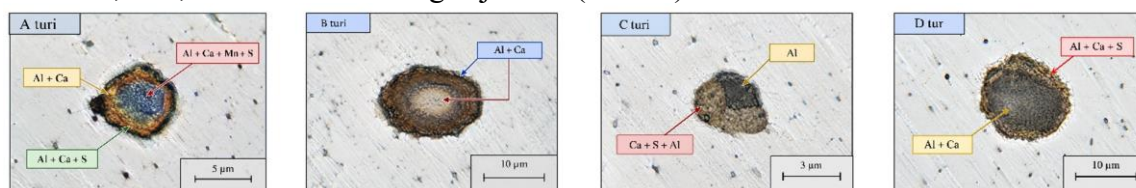
Qo'shimchalarning morfologik belgilariga asoslangan tasniflash natijalari ularning hosil bo'lish mexanizmi va po'latni oksidsizlantirish jarayoni bilan bog'liq bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Ayniqsa, yirik va deformatsiyalanmagan qo'shimchalarning mavjudligi ularning metall tarkibida shakllanganidan keyin to'liq chiqarib tashlanmaganligini ko'rsatishi mumkin.

Shu nuqtai nazardan, an'anaviy texnologiya asosida olingan 1 namunada aniqlangan metall bo'lmagan qo'shimchalarni chuqurroq o'rganish keyingi tadqiqot bosqichlari uchun muhim ahamiyatga ega. Bunda qo'shimchalarning kimyoviy tabiati, morfologiyasi, o'lcham taqsimoti va po'latning oksidsizlantirish rejimi bilan o'zaro bog'liqligi asosiy tadqiqot yo'nalishlari sifatida qabul qilinadi.

Tadqiqotning navbatdagi bosqichida 1 namuna tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning morfologik va optik xossalarini aniqlash maqsadida metallografik tahlil amalga oshirildi. Tahlil jarayonida qo'shimchalarning shakli, o'lchami, ichki tuzilishi, optik ko'rinishi hamda tarkibiy qismlarining o'zaro joylashuvi asosiy identifikatsiya mezonlari sifatida qabul qilindi.

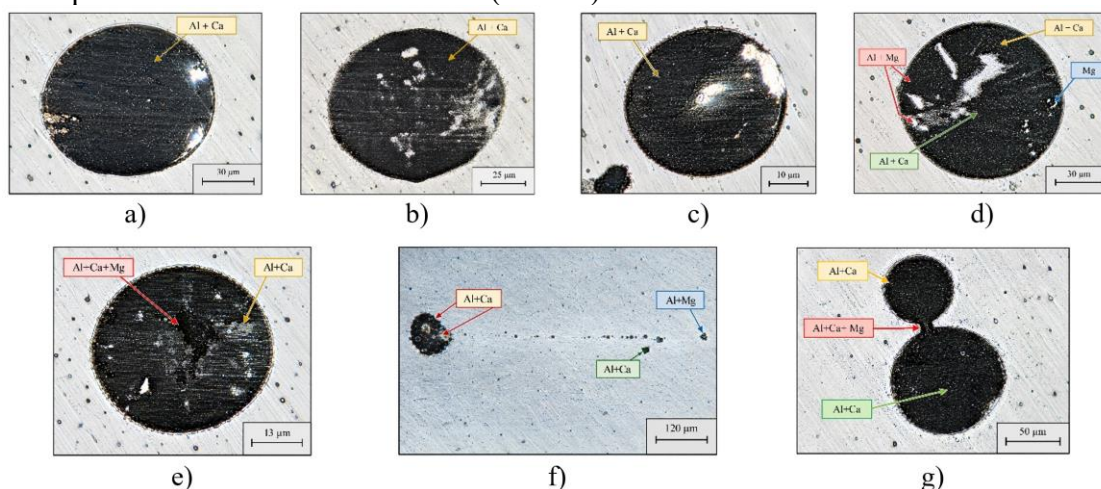
Metallografik kuzatuvlar natijasida tadqiq etilgan po'lat tarkibida morfologiyasi va optik xossalari bilan farqlanuvchi bir necha turdagi metall bo'lmagan qo'shimchalar mavjudligi aniqlandi. Ularni umumiy morfologik belgilariga ko'ra quyidagi guruhlariga ajratish mumkin.

Birinchi guruhni globulyar shakldagi metall bo'lmagan qo'shimchalar tashkil etadi. Ushbu qo'shimchalar tarkibida alyuminiy va kalsiy oksidlari hamda oksisulfidlar turli nisbatlarda mavjud bo'lishi mumkin. Ularning o'lchami, odatda, 12 mkm gacha yetadi. Miqdoriy jihatdan eng ko'p uchragan ushbu qo'shimchalar optik mikroskop ostidagi xarakterli belgilariga asoslanib shartli ravishda "A", "B", "C" va "D" turlariga ajratildi (1-rasm).



1-rasm. Qotishma tarkibidagi metal bo'lmagan qo'shimchalarning turlarga ajratilishi

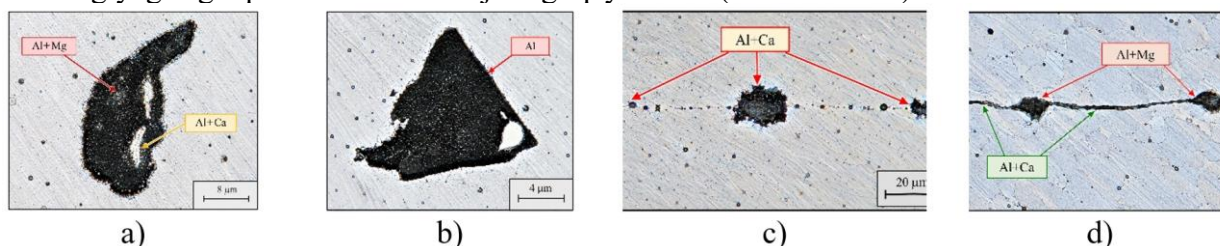
Ikkinchi guruhga yakka holda uchraydigan yirik globulyar metall bo'lmagan qo'shimchalar kiradi. Ularning diametri 150 mkm gacha yetishi mumkin. Morfologik jihatdan bunday qo'shimchalar ikki xil ko'rinishda namoyon bo'ladi: ayrimlari "D" tipidagi, yuzasi nisbatan silliq yoki g'adir-budur bo'lgan, biroq aniq ifodalangan kulrang qobiq bilan o'ralmagan qo'shimchalar ko'rinishida; boshqalari esa globulyar shakldagi geterogen, ya'ni tarkibi bir jinsli bo'lmagan murakkab qo'shimchalar sifatida kuzatiladi (2-rasm).



2-rasm. Qo'shimchalar turlari. a-b-c-yirik bir jinsli qo'shimcha; d-e-f-yirik geterogen kiritma; g-qo'sh yirik geterogen qo'shimcha.

Shuningdek, tadqiq etilgan qotishma tarkibida o'lchami 15 mkm gacha bo'lgan noodatiy geometrik shakldagi metall bo'lmagan qo'shimchalar ham aniqlandi (3 a-b-rasmlar). Shu bilan

birga, uzunligi 0,9 mm gacha bo'lgan satrsimon-guruhli, plastik deformatsiyalangan hamda aralash morfologiyaga ega qo'shimchalar mavjudligi qayd etildi (3 c-d-rasmlar).



3-rasm. Qo'shimchalar turlari. A-noodatiy shakldagi alumokalsiyli qo'shimcha; b-korund qo'shimchasi; c-guruhli satrsimon qo'shimcha; d-guruhli va plastik satrsimon qo'shimcha.

Optik metallografik kuzatuvlar natijalariga ko'ra, "A" turdagi qo'shimchalar tadqiq etilgan namunada eng ko'p uchraydigan qo'shimchalar hisoblanadi. Ular asosan kulrang globulyar zarrachalardan tashkil topib, tarkibida och va nisbatan to'q rangda ko'rinishdagi tarkibiy qismlar mavjud. To'qroq tarkibiy qism umumiy qo'shimcha maydonining taxminan 1/3–2/3 qismini egallaydi (1-rasm A tur). Bunday morfologik tuzilish qo'shimchani ko'p komponentli tabiatga ega ekanligini ko'rsatadi.

"B" turdagi qo'shimchalar kulrang va to'q-kulrang tarkibiy qismlarning birikmasidan tashkil topgan. Ularning markaziy qismida optik jihatdan yorqinroq ko'rinishdagi soha kuzatiladi. Ushbu soha qo'shimchani sezilarli qismini egallab, dumaloq yoki noodatiy shaklga ega bo'ladi. Optik belgilariga asoslanib, mazkur tarkibiy qism alyumosilikat tabiatli faza bo'lishi mumkinligi taxmin qilinadi (1-rasm B tur).

"C" turidagi qo'shimchalar "A" turga nisbatan kamroq uchraydi. Ularning asosiy massasini kulrang globulyar tarkibiy qism tashkil etadi, shu bilan birga qo'shimcha ichida noto'g'ri shaklga ega bo'lgan mayda to'q-kulrang zarrachalar ham kuzatiladi. Ushbu zarrachalar optik belgilariga ko'ra Al_2O_3 fazasi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Mazkur turdagi qo'shimchalarda to'q-kulrang tarkibiy qism umumiy hajmning kichik qismini tashkil etadi (1-rasm C tur).

"D" turdagi qo'shimchalar nisbatan mayda va yirikroq globulyar zarrachalar ko'rinishida kuzatilib, ularning o'lchami 25 mkm gacha yetadi. Ushbu qo'shimchalarning markaziy qismi to'q-kulrang rangda bo'lib, optik jihatdan bo'shroq va nisbatan bir jinsli tuzilishga ega. Ayrim hollarda markaziy qism yupqa kulrang yoki och rangli qobiq bilan o'ralganligi kuzatiladi (1-rasm D tur).

Yirik globulyar qo'shimchalar morfologik tuzilishiga ko'ra oddiy va murakkab guruhlariga ajratilishi mumkin. Oddiy qo'shimchalar asosan bir yoki ikki xil optik kontrastga ega tarkibiy qismlardan tashkil topgan bo'lsa, murakkab qo'shimchalarda bir nechta turdagi fazalarning o'zaro birikishi kuzatiladi. Ularning tarkibida kulrang, to'q-kulrang va yanada to'q rangli sohalar mavjud. Ayrim murakkab qo'shimchalarda o'tkir burchakli shaklga ega bo'lgan alohida zarrachalar ham kuzatildi (2-rasm).

O'tkazilgan metallografik tahlil natijalari 1 namuna tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning aksariyati murakkab tuzilishga ega ekanligini ko'rsatdi. Ularning morfologik va optik xossalari umumlashtirish asosida tadqiq etilgan namunada globulyar shakldagi, tartibsiz joylashgan va ko'p komponentli qo'shimchalar ustunlik qilishi aniqlandi.

Mazkur qo'shimchalarning optik belgilariga ko'ra, ularning asosiy qismini kalsiy alyuminatlari tashkil etishi mumkin. Shu bilan birga, ularning tarkibida Al, Ca va Mg oksidlari, shuningdek, oltingugurtning kalsiy sulfidi (CaS) ko'rinishidagi birikmalari mavjud bo'lishi ehtimoli mavjud. Qo'shimchalarning murakkab tuzilishi ularning shakllanishida bir nechta komponentlarning o'zaro ta'siri ishtirok etganligini ko'rsatadi.

Qo'shimchalarning asosiy qismi metallografik kuzatuvlarda sezilarli plastik deformatsiyaga uchramaganligi bilan tavsiflanadi. Ularning o'lchami, asosan, 10–25 mkm oralig'ida bo'lib, yirik globulyar qo'shimchalar bundan mustasno hisoblanadi.

Metall bo'lmagan qo'shimchalarning rentgen-spektral tahlili. 1 namunada aniqlangan metall bo'lmagan qo'shimchalarning kimyoviy va fazaviy tarkibini aniqlash maqsadida rentgen-spektral



tahlil o'tkazildi. Tadqiqotda morfologik jihatdan bir xil asosiy turga mansub, biroq optik xossalari va ichki tuzilishi bilan farqlanuvchi qo'shimchalar alohida o'rganildi.

Elementar tahlil natijalari I namunada metall bo'lmagan qo'shimchalarning asosiy qismini o'lchami 1–17 mkm bo'lgan globulyar yoki yumaloq shakldagi kalsiy alyuminatlari tashkil etishini ko'rsatdi. Bundan tashqari, kam hollarda korund (Al_2O_3) va noodatiy shakldagi kalsiy alyuminatlari ham kuzatildi. Yirik globulyar qo'shimchalarning ayrimlari 155 mkm gacha, satrsimon kalsiy alyuminatlari esa 300 mkm gacha bo'lgan uzunlikka ega.

Mikrorentgen-spektral tahlil natijalariga ko'ra, qo'shimchalarning turli tarkibiy qismlarida elementlarning taqsimlanishi sezilarli farq qiladi. Qo'shimchalarning to'q rangli qismlarida Al miqdori 5–80 %, Ca miqdori 0–55 %, Mg miqdori esa 90 % gacha yetadi. Och rangli qismlarda Al miqdori, odatda, pastroq bo'lib, 0–35 % oralig'ida o'zgaradi. Shu bilan birga, ushbu qismlarda Ca miqdori nisbatan yuqori bo'lib, o'rtacha 30–40 % ni tashkil etadi. Globulyar qo'shimchalarning och rangli qismlarida Mg miqdori juda past bo'lib, 3 % gacha yetadi.

Mn miqdori "A", "B", "C" va "D" tipidagi qo'shimchalarda 0–20 % oralig'ida o'zgaradi va uning nisbatan yuqori qiymatlari, asosan, qo'shimchalarning och rangli qismlarida qayd etiladi. Yirik globulyar qo'shimchalarda Mn aniqlanmadi. Oltingugurt esa asosan qo'shimchalarning och rangli tarkibiy qismlarida to'planib, uning miqdori qo'shimcha turiga qarab 20–35 % ni tashkil etadi. To'q rangli qismlarda S miqdori nisbatan kam bo'lib, 10 % gacha yetadi.

Olingan elementar tarkib ma'lumotlari asosida metall bo'lmagan qo'shimchalarning ehtimoliy fazaviy tarkibi aniqlandi. Buning uchun aniqlangan elementlar miqdori tegishli termodinamik jihatdan barqaror oksid va sulfidlariga qayta hisoblandi.

Elementning oksidga mos keluvchi massasi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$m_{MeO} = \frac{M_{MeO} \cdot m_{Me}}{M_{Me}}$$

bu yerda, m_{Me} - element massasi, g; m_{MeO} - mos keluvchi oksid massasi, g; M_{Me} - elementning molyar massasi; M_{MeO} - oksidning molyar massasi.

Oksidlarning nisbiy miqdori esa quyidagi tenglama yordamida hisoblandi:

$$m_{MeO} = \frac{m_{MeO} \cdot 100}{\sum m_{MeO}}$$

Keyingi bosqichda oksidlarning massa nisbatlari aniqlanib, olingan natijalar ikki va uch komponentli holat diagrammalari yordamida tahlil qilindi. Shu asosda metall bo'lmagan qo'shimchalarni tashkil etuvchi eng ehtimoliy kimyoviy birikmalar aniqlandi.

"A" tipidagi qo'shimchaning 1-nuqtasi uchun dastlabki elementar tarkibi Al = 59.3 %; Ca = 26.1 %; Mg = 3.1 %; Mn = 3.2 %; S = 7.9 % ga teng bo'lgan.

Boshqa turdagi qo'shimchalar ham shu ketma ketlikda xisoblashlar orqali aniqlanagan.

O'tkazilgan tadqiqotlar natijalari po'lat tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning shakllanishi va ularning yakuniy morfologik xossalari oksidsizlantirish jarayonining sharoitlari hamda qo'shimchalarning kimyoviy tarkibi bilan chambarchas bog'liqligini ko'rsatdi. Xususan, an'anaviy texnologiya asosida olingan I namunada kalsiy alyuminatlari, magniyli shpinellar va sulfidli fazalarning birgalikda mavjudligi qo'shimchalarning murakkab ko'p komponentli tuzilishga ega bo'lishiga olib kelgan.

Metallografik va mikrorentgen-spektral tahlil natijalarini taqqoslash orqali qo'shimchalarning o'lchami va morfologiyasi bilan ularning fazaviy tarkibi o'rtasidagi bog'liqlik aniqlandi. Jumladan, yirik globulyar qo'shimchalarda $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlari va $MgO \cdot Al_2O_3$ tipidagi magniyli shpinel fazalarining mavjudligi qayd etildi. Bunday qo'shimchalarning ayrimlari issiq prokatlash jarayonida deformatsiyalanib, cho'zilgan satrsimon shaklga kelgan. Bu holat qo'shimchalarning dastlabki o'lchami va fazaviy tarkibi ularning keyingi mexanik ishlov berish jarayonidagi xatti-harakatiga ta'sir ko'rsatishini tasdiqlaydi.

Mayda globulyar qo'shimchalarda esa, asosan, $CaO \cdot Al_2O_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlari aniqlangan. Ularning nisbatan yuqori erish harorati issiq prokatlash jarayonida deformatsiyalanishga chidamliligini ta'minlashi mumkin. Shu bilan birga, qo'shimchalarning



o'lchami kichik bo'lishiga qaramay, ularning metall matritsasi bilan chegarasida mahalliy kuchlanishlar yuzaga kelishi ehtimoli mavjud. Demak, po'latning ekspluatatsion xossalarini yaxshilashda nafaqat qo'shimchalarning umumiy miqdorini kamaytirish, balki ularning o'lchami, shakli va fazaviy tarkibini ham nazorat qilish muhim hisoblanadi.

Tadqiqot davomida aniqlangan yana bir muhim jihat - ayrim metall bo'lmagan qo'shimchalarning tarkibida kalsiy va magniy oksidlari bilan bir qatorda oltingugurtning ham mavjudligidir. Mikrorentgen-spektral tahlil natijalariga ko'ra, oltingugurt asosan qo'shimchalarning och rangli tarkibiy qismlarida to'plangan. Bu esa oksidli va sulfidli fazalarning birgalikda shakllanishi hamda ularning qo'shimchalarning ichki tuzilishiga ta'sirini ko'rsatadi. Xususan, CaS va MnS fazalarining mavjudligi qo'shimchalarning shakllanish jarayonida oltingugurtning taqsimlanishi muhim ahamiyatga ega ekanligini anglatadi.

Olingan natijalar asosida metall bo'lmagan qo'shimchalarning fazaviy tarkibini boshqarishda po'lat tarkibidagi alyuminiy va kalsiy nisbatini tartibga solish muhim texnologik omil sifatida qaralishi mumkin. Xususan, $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi nisbatan past erish haroratiga ega kalsiy alyuminatlarining hosil bo'lishini cheklash va yuqoriroq erish haroratiga ega fazalarning shakllanishiga sharoit yaratish orqali qo'shimchalarning issiq deformatsiyalanish xossalarini o'zgartirish mumkin. Bunda kalsiy sarfi, alyuminiyning qoldiq miqdori va oksidsizlantirish jarayonining ketma-ketligi o'zaro bog'liq holda baholanishi lozim.

Shu nuqtayi nazardan, tadqiqotda taklif etilgan $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlarini shakllantirishga yo'naltirilgan texnologik yondashuv alohida ahamiyatga ega. Bunday fazalarning hosil bo'lishi qo'shimchalarning erish harorati va deformatsiyalanish xossalarini o'zgartirish imkonini berishi mumkin. Biroq mazkur yondashuvning samaradorligini baholashda nafaqat qo'shimchalarning fazaviy tarkibi, balki ularning metall matritsada taqsimlanishi, o'lchamlari va miqdoriy ko'rsatkichlarini ham hisobga olish zarur.

Shuni ta'kidlash kerakki, metall bo'lmagan qo'shimchalarning optik va elementar tahlil natijalari ularning fazaviy tarkibini baholash imkonini bergan bo'lsa-da, aniqlangan ayrim fazalar tegishli elementar tarkib va termodinamik hisoblashlar asosida identifikatsiya qilingan. Shu sababli qo'shimchalarning aniq fazaviy tarkibini yanada chuqurroq o'rganish va ularning hosil bo'lish mexanizmlarini to'liq tavsiflash uchun qo'shimcha tadqiqotlar o'tkazish maqsadga muvofiq.

Xulosa. O'tkazilgan tadqiqotlar natijasida kam legirlangan po'lat qotishmalari tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning morfologik, kimyoviy va fazaviy tarkibi o'rganildi. Metallografik va mikrorentgen-spektral tahlillar asosida quyidagi xulosalarga qilindi:

An'anaviy texnologiya asosida olingan po'lat namunalarida metall bo'lmagan qo'shimchalarning miqdori, o'lchami va morfologiyasi sezilarli darajada farqlanishi aniqlandi. To'qqizta namunada o'tkazilgan metallografik baholash natijalariga ko'ra, qo'shimchalarning barcha turlari bo'yicha o'rtacha maksimal ball 3,44 ni tashkil etdi. Eng yuqori ifloslanganlik darajasi 9-namunada kuzatilib, maksimal baho 5 ballga teng bo'ldi.

Metallografik va mikrorentgen-spektral tahlil natijalariga ko'ra, tadqiq etilgan po'lat tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalar asosan Ca-Al-Mg-O-S tizimiga mansub murakkab oksid-sulfid fazalardan tashkil topganligi aniqlandi. Qo'shimchalarning asosiy qismini kalsiy alyuminatlari tashkil etib, ularning tarkibida $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi magniyli shpinel va CaS hamda MnS kabi sulfidli fazalar ham mavjudligi qayd etildi.

Qo'shimchalarning morfologik xossalari va fazaviy tarkibi o'rtasidagi bog'liqlik aniqlandi. Yirik globulyar qo'shimchalarda, asosan, $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlari va magniyli shpinel fazalari, mayda globulyar qo'shimchalarda esa $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi birikmalar ustunlik qilishi kuzatildi. Ayrim yirik qo'shimchalarning murakkab geterogen tuzilishga ega ekanligi va ularning prokatlash jarayonida qisman deformatsiyalanishi aniqlandi.

Qo'shimchalarning fazaviy tarkibi ularning issiq deformatsiyalanish jarayonidagi xossalariga ta'sir ko'rsatishi asoslandi. Xususan, nisbatan past erish haroratiga ega $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlari prokatlash jarayonida cho'zilgan satrsimon shaklga kelishi mumkin.



Yuqoriroq erish haroratiga ega $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi qo'shimchalar esa deformatsiyalanmagan holda saqlanib qolishi mumkin.

Olingan eksperimental natijalar va termodinamik hisoblashlar asosida po'lat tarkibidagi metall bo'lmagan qo'shimchalarning fazaviy tarkibini boshqarish uchun $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ tipidagi kalsiy alyuminatlarini shakllantirishga yo'naltirilgan texnologik yondashuv taklif etildi. Bunda alyuminiy va kalsiy sarfi nisbatini, shuningdek, qo'shimchalardagi Al/Ca nisbatini boshqarish muhim texnologik omillar sifatida belgilandi.

Tadqiqot natijalari po'latni oksidsizlantirish va modifikatsiyalash jarayonlarini takomillashtirish orqali metall bo'lmagan qo'shimchalarning kimyoviy va fazaviy tarkibi, o'lchami hamda morfologiyasini maqsadli ravishda boshqarish imkoniyati mavjudligini ko'rsatdi. Bunday yondashuv qo'shimchalarning issiq deformatsiyalanish xossalarini tartibga solish va po'latning ekspluatatsion xossalarini yaxshilash uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. EEIMVR-UFF, V. R. (2019). The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. *J Mater Res Technol*, 8(2), 2408.
2. Liu, H., Zhang, S., Zhang, J., Ren, Q., Zhang, L., & Ge, Y. (2023). Properties of typical non-metallic inclusions in steel: First-principles calculations. *Materials Today Communications*, 34, 105118.
3. Zhang, L., & Ren, Y. (2025). *Handbook of non-metallic inclusions in steels*. Springer Nature.
4. Kholmiraev, N., Turakhodjaev, N., Khasanov, J., Bektemirov, A., Saidmakhamadov, N., Nurdinov, Z., ... Khasanov, K. (2026). Thermodynamic mechanism of non-metallic inclusions modification in recycled low-alloyed cast steel using CaCO_3 – CaSiO_3 composite mineral fluxes. *Acta Metallurgica Slovaca*, 32(3), 241–250.
5. Kholmiraev, N., Turakhodjaev, N., Khasanov, J., Yang, C., Yusupov, B., Saidkhodjaeva, S., ... & Nurmurodov, B. (2026). Formation and characterization of non-metallic inclusions in steel produced by melting secondary ferrous scrap in an electric arc furnace: A case study of AISI 1066 steel. *Acta Metallurgica Slovaca*, 32(2), 116-123.
6. Turakhodjaev, N., Kholmiraev, N., Nargiza, S., Kamola, T., & Abdullayev, B. (2022). Technology for cleaning non-metallic inclusions and gaseous pores in the process of liquefaction of steels in an electric arc furnace. *European Multidisciplinary Journal of Modern Science*, 4, 77-82.
7. Saidmakhamadov, N., Kholmiraev, N., Bekchanova, V., Odilov, F., Karimov, B., Tadjiev, N., ... & Mukhammadaliev, B. (2026, March). Analysis of technologies for improving steel purity by controlling slag content. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3390, No. 1, p. 020014). AIP Publishing LLC.
8. Peela, A., Mikitisin, A., Steinweg, F., Janitzky, T., Schwedt, A., Broeckmann, C., & Mayer, J. (2025). Influence of subsurface non-metallic inclusions on rolling contact fatigue behavior in bearing steels - Experimental and numerical investigations. *Wear*, 566–567. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205767>
9. Wang, J., Guo, B., Lyu, B., & Zhang, L. (2024). Thermodynamic modelling on the reaction between steel and slag. *Journal of Materials Research and Technology*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.005>
10. Calderon Hurtado, F. A., Govro, J., Emdadi, A., & O'Malley, R. J. (2024). The Melting Behavior of Hydrogen Direct Reduced Iron in Molten Steel and Slag: An Integrated Computational and Experimental Study. *Metals*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/met14070821>
11. Luiz, A., & Costa e Silva, V. (2018). Non-metallic inclusions in steels—Origin and control. *J. Mater. Res. Technol*, 7(3), 283-299.
12. Ren, Y., Wang, W., Yang, W., & Zhang, L. (2023). Modification of non-metallic inclusions in steel by calcium treatment: a review. *ISIJ International*, 63(12), 1927-1940.
13. Babu, S. R., & Michelic, S. K. (2024). Overview of application of automated SEM/EDS measurements for inclusion characterization in steelmaking. *MetalMat*, 1(2), e18.