

3. Li J.Y., Cheng G.G., Ruan Q., Pan J.X., Chen X.R. Evolution behaviour of nonmetallic inclusions in Ti-bearing 11Cr stainless steel with calcium treatment. 2020. – Ironmak Steelmak. – Vol. 47 (1). – P. 31-39.
4. Nishimoto M., Muto I., Sugawara Y. Review-understanding and controlling the electrochemical properties of sulfide inclusions for improving the pitting corrosion resistance of stainless steels.– 2023.– Mater Trans.– Vol. 50 (5). – P. 712-720.
5. Li S., Hu J.Z., Zhang J., Ren Y., Zhang L.F. Pitting corrosion initiated by Al_2O_3 -CaO-CaS inclusions in a 304 stainless steel. 2023. – Metall Mater Trans B. – Vol. 54 (2). – P. 1784-1797.
6. Park J.S., Park J.H. Effect of slag composition on the concentration of Al_2O_3 in the inclusions in Si-Mn-killed steel. 2014. – Metall Mater Trans B. – Vol. 45 (3). – P. 953-960.

Єфімова В. Г.¹, Тимошенко Д. О.²

(¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ; ²ТОВ «Технічний університет Метінвест політехніка», м. Запоріжжя)

**АДСОРБЦІЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ З РОЗПЛАВУ СТАЛІ У
ПРОМІЖНИХ КОВШАХ МБРЗ**

E-mail: yefimovavg@gmail.com

Відомо, що в процесі виробництва сталі відбувається побічний процес утворення неметалевих включень. Якщо його не контролювати належним чином, це може призвести до зниження якості готової продукції. Одним з доступних методів контролю вмісту неметалевих включень у розплаві сталі є шлак, який за законом розподілу поглинає неметалеві включення у процесі їх флотації за рахунок абсорбції. Відомо, що процес видалення неметалевої фази включає в себе три кроки: флотація включень до межі поділу фаз розплав сталі – шлаку, поглинання включень шлаковою фазою та розчинення.

Основні дослідження видалення неметалевої фази з розплаву сталі присвячені оптимізації траєкторії гідродинамічних потоків у металургійних

реакторах та транспортуванню неметалевих включень до межі поділу фаз метал – шлак [1, 2].

Найменш вивченою стадією видалення неметалевих включень з розплаву є поглинання неметалевого включення шлаковою фазою. Термодинаміка цього процесу детально представлена у роботах [3-7]. У відповідності цих досліджень перехід неметалевого включення в шлак відбувається при мінімальному значенню вільної енергії системи. Але ця модель дуже спрощена і не враховує той факт, що вільна енергія системи змінюється безперервно на межі поділу фаз метал – включення, включення – шлак.

У дослідженнях [8, 9] показано, що теорія видалення неметалевих включень не враховує утворення тонкої рідкої металевої плівки на поверхні неметалевого включення, що призводить до збільшення часу перебування неметалевих включень на границі поділу фаз.

Дані роботи [10] свідчать, що основні типи включень мають більшу густину ніж металургійні шлаки, а тому вони будуть спинятися на межі поділу фаз метал – шлак, що може призвести до їх вторинного захоплення металевим розплавом.

Отже, робота що спрямована на з'ясування механізму адсорбції включень шлаковою фазою після того як вони досягли міжфазної поверхні поділу метал – шлак та впливу на цей процес розплаву шлаку є актуальною.

Метою даного дослідження було встановлення механізму видалення неметалевих включень за рахунок адсорбції шлаковою фазою.

Реалізація поставленої мети здійснювалась шляхом вирішення наступних завдань:

- фізико-хімічний аналіз адсорбції неметалевих включень шлаком у проміжному ковші;
- моделювання процесу адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, з використанням скуючого електронного мікроскопу;
- визначення часу адсорбції неметалевих включень шлаком.

Розглянемо наближення твердої сферичної частинки до хімічно інертної статичної поверхні шлакової фази. Швидкість руху включення залежить від числа

Рейнольдса і в момент його зіткнення зі шлаковою поверхнею утворюється плівка довільної товщини, яка дренується дією потоку до моменту входу включення у контакт зі шлаковою фазою.

Отже, швидкість спливання частинки неметалевого включення можна представити:

$$U_{\text{кін.}} = \frac{2}{9} R_{\text{в}}^2 (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{с}}) \frac{9}{\eta_{\text{м}}}, \quad (1)$$

де $R_{\text{в}}^2$ – радіус неметалевого включення, м;

$\rho_{\text{м}}$ – густина розплаву металу, кг/м³;

$\rho_{\text{с}}$ – густина неметалевого включення, м;

$\eta_{\text{м}}$ – в'язкість розплаву металу, Па·с.

Число Рейнольдса, для частинки, що видаляється:

$$\text{Re} = U \cdot 2R_{\text{в}} \cdot \frac{\rho_{\text{м}}}{\eta_{\text{м}}}, \quad (2)$$

де U – швидкість руху включення, що дорівнює $U_{\text{кін.}}$ та вище та визначається розміром включення, що спливає.

В обох випадках на рух частинок впливають сила капілярної взаємодії $F_{\sigma,z}$, сила виштовхування – F_b , сила опору F_d та сила маси металу, що приєдналася F_m .

У випадку формування металевієї плівки на поверхні неметалевого включення рівняння для сили капілярної взаємодії залежить від властивостей розплаву металу та природи неметалевих включень:

$$F_{\sigma,z} = 4\pi R_1 \left[\frac{\sigma_{\text{м-ш}}}{2(R_1 + S)^3} ((2R_1 + S - Z)) + \frac{dZ}{dt} \cdot \frac{\eta_s}{3} \cdot \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_1 + 2S} - \frac{1}{R_1 + 4S} \right) \left(1 - \left(\frac{R_1 - Z}{R} \right) \right) \right] \quad (3)$$

$$F_b = \frac{4}{3} \pi R_{\text{в}}^3 (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{с}}) g \quad (4)$$

$$F_d = 6\pi R_\epsilon \eta_m \frac{dZ}{dT} \quad (5)$$

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi R_\epsilon^3 \rho_m \frac{d^2 Z}{dt^2} \quad (6)$$

де σ_{m-u} – поверхневий натяг на межі поділу фаз, Н/м²;

$\frac{dZ}{dT}$ та $\frac{d^2 Z}{dt^2}$ – швидкість та прискорення включення, коли воно досягає шлакової фази, м/с та м/с²;

S – товщина плівки металу на поверхні неметалевого включення, що спливає з початковою товщиною $0,002 \cdot R_b$ та при значенні $0,001 \cdot R_b$ відбувається її розрив у м;

g – прискорення сили тяжіння м/с² [7].

Капілярні сили будуть намагатися виштовхнути включення за рахунок утворення нової області між металом та шлаком. Оскільки металевий розплав являє собою мало в'язку рідину, то злив металевої плівки відбувається швидко та його можна не враховувати. При цьому важливу роль буде відігравати змочування включення шлаком.

При взаємодії неметалевого включення з шлаковою фазою і металевим розплавом діють наступні сили:

$$F_{\sigma,Z} = (-2\pi R_\epsilon + 2\pi Z) \sigma_{m-u} + 2\pi R_\epsilon \sigma_{u-\epsilon} - 2\pi R_\epsilon \sigma_{m-\epsilon} \quad (7)$$

$$F_b = \frac{4}{3} \pi R_\epsilon^3 (\rho_u \Delta_b - \rho_\epsilon) g \quad (8)$$

$$F_d = 6\pi R_\epsilon \eta_u B_2 \frac{dZ}{dt} \quad (9)$$

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R_\epsilon^3 \rho_u \Delta_b \frac{d^2 Z}{dt^2} \quad (10)$$

де ρ_ϵ та ρ_u – густина неметалевих включень та шлаку, відповідно у кг/м³;

$\sigma_{u-\epsilon}$ та $\sigma_{m-\epsilon}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз шлак – неметалеве включення та розплав металу – шлак, Н/м²;

B_2 та Δ_b – коефіцієнти пропорційності.

$$\Delta_b = \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_m}{\rho_{ш}} - 1 \right) \left(\frac{Z}{R_g} \right)^3 - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_m}{\rho_{ш}} - 1 \right) \left(\frac{Z}{R_g} \right)^2 + \frac{\rho_m}{\rho_{ш}} \quad (11)$$

$B_2 = 1$ у випадку, коли $\frac{Z}{R_g} \geq 1$.

За умови, що $0 \leq \frac{Z}{R_g} \leq 1$:

$$B_2 = \left(\frac{\eta_m}{\eta_{ш}} - 1 \right) \left(\frac{Z}{R_g} \right)^2 - 2 \left(\frac{\eta_m}{\eta_{ш}} - 1 \right) \left(\frac{Z}{R_g} \right) + \frac{\eta_m}{\eta_{ш}} \quad (12)$$

З наведених рівнянь випливає, що сила капілярної взаємодії домінує над силою відділення неметалевих включень від поверхні металу. Це пояснюється тим, що оксидні включення краще будуть взаємодіяти з розплавом оксидів у шлаку ніж з розплавом металу.

Сила виштовхування залежить від різниці густини розплаву металу та неметалевого включення. Отже, неметалеві включення, що спливали з об'єму металу, однією своєю частиною залишаються у металевому розплаві, іншою – у шлаковій фазі.

Отже, коли неметалеві включення перебувають на поверхні шлакової фази існує ризик їх повторного захоплення у глибину розплаву металу.

Для того щоб розглянути класичну модель абсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, нами було проведено моделювання процесу адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, при цьому вважалось, що адсорбційний процес перебігає у мономолекулярному шарі та може контролюється дифузією та контролюються константою швидкості хімічного процесу.

В цих дослідженнях було зроблено наступні припущення:

- 1) форма частинок має бути максимально наближеною до сферичної форми;
- 2) процес розчинення відбувається до тих пір, поки частинка повністю не розчиниться;
- 3) у процесі розчинення не відбувається процесу обертання частинки;
- 4) об'єм шлаку залишається сталим.

У дослідженнях для вивчення розчинення частинок неметалевих включень ми застосовували скануючий електронний мікроскоп РЕМ-106И, основними перевагами якого є можливість спостереження процесу розчинення індивідуальної частинки неметалевого включення у шлаку.

У цьому дослідженні у якості включення, що переходить міжфазну границю метал – шлак, використовувався глинозем. При цьому всі твердження, що отримані для частинок глинозема можуть бути застосовані і до інших найпоширеніших включень, а саме Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 і MgAl_2O_4 .

Було прийнято, що розплав сталі являв собою розплав чистого заліза, тому в'язкість металу і переважна частина поверхневих натягів на межі поділу фаз була відома. Початкова швидкість включення була різною в залежності від розміру включень, до максимальна очікувана швидкість течії в металі 0,3 м/с.

Для аналізу було обрано фазу шлаку проміжного ковша. Основні характеристики розплаву металу, шлаку та неметалевих включень наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості розплаву металу, шлаку та неметалевих включень

	Густина, кг/м^3	В'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$	Поверхневий натяг, Н/м	Склад, масові %			
Включення Al_2O_3	3990	—	$\sigma_{ш-в}$ 0,01-0,2	Al_2O_3 , 100 %			
Розплав Fe	7000	0,006	$\sigma_{м-в}$ 1,504	Fe, 100 %			
Шлак проміжного ковша	2560	2,308	$\sigma_{м-ш}$ 1,16	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO
				39,5	33	19,5	7,3

Для аналізу результатів експерименту швидкості розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі, яка контролюється дифузією, можна представити рівнянням:

$$\tau = \frac{\rho_s \cdot R_s^2 \cdot 3\pi\eta_{ш}}{2kT\Delta C} \quad (13)$$

де k – константа Больцмана;

ΔC – зміна концентрації в процесі розчинення неметалевого включення, мас. %.

Одною з основних цілей фізичного моделювання було виявлення умов, коли включення залишається однією своєю частиною у розплаві металу, а іншою у шлаковій фазі і не асимілюється шлаковою фазою.

Отже метою досліджень було встановлення умов, що призводять до даної ситуації, а також знаходження межі тих властивостей, коли неметалеві включення концентруються на границі поділу метал-шлак, а саме розмір частинок та швидкість їх спливання, значення поверхневого натягу на межі поділу фаз неметалевого включення – шлак, а також в'язкість шлаку.

Дослідження було проведено для чотирьох різних розмірів включень – 10, 20, 50 та 100 мкм. Поверхневий натяг на межі поділу фаз неметалевого включення – шлак було обрано в межах 0,01-0,6 Н/м з припущенням, що при розчиненні включень призводить до зміни складу шлакової фази.

Дані розрахунків свідчать, що при малих значеннях поверхневого натягу на межі поділу фаз неметалевого включення – шлак, рушійною силою процесу адсорбції неметалевих включень буде капілярна сила, що відноситься до розмірів включень, що розглядаються.

Зміна початкової швидкості спливання мало впливає на процес адсорбції неметалевої фази. Як показують розрахунки, початкова швидкість впливає на асиміляцію частинок, розмір яких більше 50 мкм, за рахунок утворення металевої плівки чи шлаків, що мають підвищену в'язкість.

Отже, оскільки рушійною силою процесу відокремлення неметалевих включень від фази металу і перехід їх у шлак є капілярна сила. Для проміжного ковша поверхневий натяг на межі поділу неметалевого включення – шлак повинен бути не більше 0,4 Н/м, що сприяє видаленню 90-95 % неметалевих включень з радіусом від 10 до 100 мкм, з початковою швидкістю спливання – 0,3 м/с.

Слід зауважити, що при розчиненні у шлаку частинки неметалевих включень змінюють свою форму. Оскільки процес розчинення має тенденцію до зменшення площі включень, що контактують зі шлаком, то розчинення буде мати тенденцію до зменшення поверхневого натягу на межі поділу фаз шлак – неметалевого включення, тому частинка буде рухатися в шлак під час розчинення.

Дані розрахунків свідчать, що час адсорбції неметалевих включень лежить в межах від $2 \cdot 10^{-4}$ до $7 \cdot 10^{-4}$ с, в залежності від розміру включення. Зростання часу адсорбції неметалевих включень великих розмірів спостерігається за рахунок більш тривалого відокремлення металевих плівок від поверхні неметалевого включення.

В результаті проведених досліджень встановлено механізм адсорбції неметалевих включень, визначено умови які краще впливають на процес адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, а також встановлено час асиміляції шлаком включень різного розміру.

Наступним етапом наших досліджень буде вивчення впливу природи неметалевих включень на їх асиміляцію шлаковою фазою.

Література:

1. Zhao S., Zushu L., Renze X., Darbaz K., Gaoyang S. Dissolution Behavior of Different Inclusions in High Al Steel Reacted with Refining Slags. 2021. – Metals. – Vol.11. – P. 56-71.
2. Xu, J.F., Wang K.P., Wang Y., Qu Z.D., Tu X.K. Effects of ferrosilicon alloy, Si content of steel, and slag basicity on compositions of inclusions during ladle furnace refining of Al-killed steel. 2020. – J. Iron Steel Res. Int. – Vol. 27. – P. 1011–1017.

3. Wang, G.C., Zhao, Y., Xiao Y.Y., Jin, P.L., Li S.L., Sridhar, S. Diversified aggregated patterns of alumina inclusions in high-Al iron melt. 2020. – Met. Mater. Trans. – Vol. 51. – P. 3051–3066.
4. Yang, J., Chen D.F., Zhu M.Y., Crystallization and heat transfer of CaO–SiO₂-based slag for high-Mn–high-Al steel. 2020. – J. Iron Steel Res. Int. – Vol. 27. – P. 788–795.
5. Chen G.J., He, S.P., Wang Q. Dissolution behavior of Al₂O₃ into tundish slag for high-Al steel. 2020. – J. Mater. Res. Technol. – Vol. 9. – P. 11311–11318.
6. Dewangan S., Behera S., Chowrasia M.K. Comparative analysis into mechanical properties and microstructural attributes of quenched and tempered 0.2 %-C steel. 2020. – World J. Eng. – Vol. – P. 17, 127–133.

Жовтобрюх В. О., Поліщук Д. В., Алтухов П. М.

(Філія КПУ в м. Кременчук)

**ВПЛИВ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ
ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

E-mail: kpudmytro@gmail.com

Знос є ключовим фактором, що обмежує довговічність, надійність та паливну ефективність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Застосування навантажуваних матеріалів представляє собою перспективний напрямок для вирішення цієї проблеми, пропонуючи фундаментально нові механізми захисту поверхонь. У дослідженні розглянуто вплив навантажуваних матеріалів, які застосовуються у формі захисних покриттів та присадок до мастильних матеріалів, на підвищення зносостійкості критично важливих деталей ДВЗ. Аналіз показує, що навантажуваних матеріалів значно знижують коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу, підвищують механічні властивості компонентів та, як наслідок, суттєво продовжують їхній ресурс. Ключовим аспектом їхньої ефективності є здатність модифікувати трибологічну систему, зокрема, шляхом формування стабільних трибоплівок, які виступають у ролі «третього тіла».

Довговічність та надійна робота двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ)