УДК 669.77/.78-043.2:[669.14-02+669.15-194.5
Воденнікова О.С.[1], Воденніков С.А.[2]
[1] канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний університет, Запоріжжя
[2] д-р техн. наук, професор, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

ВПЛИВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКРАПЛЕНЬ НА ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРУ СТАЛІ

На сьогодні одним з головних показників якості металу та відповідно якості готової продукції є вміст в них неметалевих вкраплень, при чому значний вплив має не тільки кількість вкраплень, але і їх природа та хімічний склад. Знаючи хімічно-мінералогічний склад неметалевих вкраплень та механізм їх утворення, можна більш грамотно прогнозовано управляти процесами формування вкраплень, науково-обґрунтовано проводити технологічні процеси плавки та розкислення металу [1].

Неметалеві вкраплення приймають участь в усіх структурних та фазових змінах в сталях при термомеханічному впливі. Для практичних умов часто важливим є дотримання малої забрудненості сталі вкрапленнями та отримання вкраплень, які мінімально впливають на технологічні та механічні властивості сталі [2]. Для отримання глобулярної форми неметалевих

вкраплень у литому металі та металі, що деформується, застосовують для кінцевого розкислення та модифікування лужноземельні (барій, кальцій, магній) та рідкоземельні елементи у вигляді різного виду лігатур, дротів, дрібнодисперсних та ультродисперсних порошків [3].

Неметалеві вкраплення є дуже небезпечними концентраторами напружень та сприяють зародженню тріщин. Дія неметалевих вкраплень, як концентраторів напружень, значно підсилюється у випадках, коли вкраплення розташовані на межах зерен. Саме тому сульфіди другого типу суттєво знижують пластичні властивості та ударну в'язкість сталі. Більшість неметалевих вкраплень утворюється або в рідкій сталі, або в двофазній зоні. При охолодженні сталі, внаслідок різниці коефіцієнтів теплового розширення неметалевих вкраплень і металу, в останньому виникають значні розтягуючи напруження [4].

Особливу увагу звертає роль дрібнодисперсних неметалевих вкраплень у процесі формування мікроструктури сталі в рідкому та твердому станах. Показано, що вплив дрібнодисперсних неметалевих вкраплень на формування первинної та вторинної мікроструктури сталі обумовлений їх взаємодією в рідкому металевому розплаві з кластерами, а також дією у якості зародків кристалізації та інгібіторів росту первинних кристалів. Поведінка неметалевих вкраплень у твердому металі пов'язана з взаємодією їх з дислокаціями, вакансіями, участю в процесах рекристалізації, впливом на вторинну мікроструктуру сталі [5].

Неметалеві вкраплення істотно знижують технологічні та механічні властивості сталей, сприяючи утворення різного роду дефектів. Одним із шляхів рішення важливого завдання підвищення міцності та пластичних властивостей сталей є зменшення забрудненості неметалевими вкрапленнями, зниження їх розмірів і забезпечення їх рівномірного розподілу. В процесі різних впливів в неметалевих вкрапленнях відбуваються різного роду фазові та структурні перебудови, що сприяє зміні розмірів вкраплень, їх фазового й структурного стану та безумовно впливає на локальні зони сталевої матриці поблизу неметалевих вкраплень. Характер цих змін можуть істотно змінити адгезійні зв'язки на міжфазних межах вкраплення-матриця [6, 7]. Зокрема у роботі [6] проаналізовано структурні, кількісні та морфологічні характеристики неметалічних вкраплень по ходу виробництва прокату.

Проблема контролю неметалевих вкраплень заснована передусім на оцінці не тільки загальної кількості вкраплень, а і впливу критичного розміру вкраплень та оцінці впливу складу і розподілу вкраплень за розмірами [8].

Однією з невирішених проблем теорії металургійних процесів залишається надійний розрахунок маси, розмірів та складу неметалевих вкраплень в сталі. Існує великий масив експериментальних даних по цій тематиці, проте наявні теоретичні розробки можуть претендувати лише на

рішення окремих аспектів проблеми для небагатьох класів неметалевих вкраплень [9]. Так у роботах [10, 11] приведено огляд систем неметалевих вкраплень $FeO\text{-}MnO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$, які найбільше зустрічаються в практиці сталеплавильного виробництва.

У роботі [7] проаналізовано процеси руйнування сталей поблизу неметалевих вкраплень та обговорюються особливості будови вкраплень як фаз впровадження та їх вплив на виникнення термічних і деформаційних напружень. Автором показано вплив природи неметалевих вкраплень на механізм утворення мікроруйнування в сталях при різних умовах деформації, а також в активних середовищах.

У дослідженнях [12-14] встановлено зв'язок між параметрами стійкості металу проти корозії та морфологією неметалічних вкраплень. Зокрема показано, що найважливішу роль в підвищеному експлуатаційному зношенні низьколегованих сталей грають саме локальні види корозії, і причиною їх розвитку є неметалеві вкраплення.

На основі методу хімічних потенціалів Гіббса у роботі [15] отримано термодинамічні співвідношення, що описують зародження та зростання неметалевих вкраплень в сталі.

Вплив неметалевих вкраплень на властивості, структуру різних видів сталей описано в роботах [16, 17]. Зокрема вплив морфології неметалевих вкраплень на руйнування високоміцної корозійностійкої сталі проведено в роботі [18]. У роботі [19] розглянуто умови зменшення вмісту неметалевих вкраплень (оксидних та сульфідних) в корозійностійкій азотовмісній сталі. Авторами робити [20] запропоновано заходи для зменшення розмірів та кількості неметалевих вкраплень в кордовій сталі, використовуючи методику оцінки неметалевих вкраплень [21], при чому одним з критеріїв оцінки є доля площі, яку займають неметалеві вкраплення.

Авторами роботи [22] розглянуто природу утворення та еволюцію дефекту «полону» за ходом всього металургійного переділу від розливки сталі до холодного прокату листа та розроблено методику препарування дефектів холоднокатаного листа, що дозволяє спостерігати їх первозданну морфологію.

У дослідженні [23] показано, що вміст та розподіл у зливку неметалевих вкраплень залежать від процесів плавлення, розкислення та модифікування сталі, умов розливки та кристалізації металу. При підвищеному вмісті газів у сталі вкраплення можуть концентруватися на межі розплав – газовий пузир. Небезпечними для властивостей сталевих виробів є легкоплавкі вкраплення оксисульфідів, які виділяються при кристалізації зливка. Такі включення знижують міцність міжзеренних зв’язків, особливо при підвищених температурах (червоноламкість). Велику небезпеку представляють також тугоплавкі вкраплення, що плавляться при температурі вище, ніж температура рідкої сталі. Ці вкраплення мають гострі грані та створюють

концентрації напруг у металі, які є джерелами початку процесів його руйнування. Вкраплення, що мають компактну (сферичну) форму, менш шкідливі для властивостей сталі. Такі вкраплення утворюються у зливках в тому випадку, коли температура їх плавлення невисока і вони погано змочуються металом. Авторами в роботі досліджено вміст, дисперсність та склад неметалевих вкраплень, що утворюються в 142-тонному зливку, який відливали у вакуумі зі сталі 25ХН3МФА.

Мають місце дослідження впливу неметалевих вкраплень на зміцнення матриці металу при пластичній деформації [24], в яких авторами виконано аналіз розподілу мікротвердості в металевій матриці поблизу неметалевого вкраплення та показано, що при поступовій зміні напряму пластичної деформації від нормального до дотичного, по відношенню до поверхні вкраплення, спостерігається зростання ефекту пом'якшення.

Оцінка великих одиночних неметалевих вкраплень в сталі за допомогою статистики екстремальних значень приведена у роботі [25]. Авторами розглянуто сучасні методи металографічної оцінки неметалевих вкраплень в колісних сталях. Показано, що великі поодинокі неметалеві вкраплення не можуть бути оцінені використовуваними в даний час в промисловості стереологічними методами при аналізі тільки однієї площини шліфа. Для оцінки таких вкраплень в стандарті ASTM E 2283 запропоновано досліджувати чотири різні площини шліфа, а отримані результати обробляти за допомогою математичного апарату статистики екстремальних значень.

Аналіз впливу неметалевих вкраплень у вигляді корунду на механічні та технологічні властивості сталі показує суперечливий характер досліджень. Так автори роботи [26] стверджують, що вкраплення корунду погіршують технологічні властивості сталі, особливо якщо вони утворюють скупчення. А в роботі [2] зазначено, що корунд не робить негативного впливу на технологічну пластичність, а навпаки, навіть підвищує її, тоді як тріщини зароджуються зазвичай у силікатах.

У роботі [27] розглядаються механізми руйнування сталі під час різних операцій механічної обробки та поведінка різних неметалевих вкраплень в зоні різання. Авторами розглянуто вплив хімічного складу, розміру, кількості та морфології неметалевих вкраплень на фактори оброблюваності (зокрема зношування ріжучого інструменту, потужності, що споживається, та інших). Також розглядаються деякі методи модифікації неметалевих вкраплень в рідкій сталі для досягнення бажаного балансу між механічними властивостями та оброблюваністю різних марок сталі.

Саме тому в сталеплавильному виробництві залишається досить актуальним питання розширення досліджень в області вивчення впливу неметалевих вкраплень на технологічні та механічні властивості сталі та її структуроутворення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лунёв В. В. Природа неметаллических включений и свойства метала. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIII міжнародної науково-технічної конференції (м. Запоріжжя, 9–12 жовтня 2012 р.). Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. С. 7–8.

2. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Неметаллические включения и качество стали. Киев: Техніка, 1980. 168 с.

3. Лунёв В. В. Неметаллические включения – качественное и количественное эффективное описание. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XV міжнародної науково-технічної конференції (м. Запоріжжя, 11–12 жовтня 2018 р.). Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. С. 7.

4. Бялік Г. А., Гонтаренко В. І., Василевська Я. А. Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Теорія ливарних сплавів» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Обладнання та технології ливарного виробництва» усіх форм навчання. Частина 2. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. 69 с.

6. Титова Т. М., Полетаев В. П., Бешкенадзе М. С. Роль неметаллических включений в стали. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIII міжнародної науково-технічної конференції (м. Запоріжжя, 9–12 жовтня 2012 р.). Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. С. 19–20.

6. Губенко С. И., Парусов В. В., Деревянченко И. В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.

7. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей. *Palmarium Academic Publishing*. 2015. 468 с.

8. Григорович К. В., Красовский П. В., Трушникова А. С. Анализ неметаллических включений – основа контроля качества стали и сплавов. *Анатилика и контроль*. 2002. Т 6. №2. С. 133–142.

9. Харченко А. В., Синяков Р. В. Физико-химические закономерности формирования неметаллических включений в стали. *Металургія*. 2017. Вип. 1 (37). С. 17–23.

10. Kiessling R., Lange N. Non-metallic Inclusions in Steel. Parts I-IV. London : The Institute of Metals, 1978. 465 p.

11. Kiessling R., Pickering F. B. Non-metallic Inclusions in Steel. Part V. London : The Institute of Metals, 1989. 208 p.

12. Управление процессами образования неметаллических включений при производстве конвертерной стали/ А. А. Казаков и др. *Цветные металлы. Черные металлы. Специальный выпуск*. 2014. С. 91–96.

13. Родионова И. Г., Бакланова О. Н., Зайцев А. И. О роли неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии нефтепромысловых трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей. *Металлы*. 2004. №5. С. 13–18.

14. Роль неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии металлоизделий из углеродистых и низколегированных сталей / И.Г. Родионова и др. *Металлург*. 2005. №4. С. 58–61.

15. Харченко А. В., Синяков Р. В. Термодинамика неметаллических включений в стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С. 15–21.

16. Влияние раскисления на состав неметаллических включений низколегированной стали / Г. В. Серов и др. *Новые огнеупоры*. 2018. №12. С. 3-8.

17. Неметаллические включения в высокоуглеродистой стали/ А.Б. Сычков и др. *Литье и металлургия*. 2012. №4. С. 7482.

18. Влияние морфологии неметаллических включений на разрушение перспективной высокопрочной коррозионностойкой стали 04Х20Н6Г11М2АФБ / Л. А. Смирнов и др. *Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020. №76(4). С. 372–381. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-4-372-381

19. Снижение содержания неметаллических включений в коррозионностойкой азотсодержащей стали / Крылов С. А., Щербаков А. И., Макаров А. А., Тонышева О. А. *Труды ВИАМ*. 2017. №5(53). С. 3–13.

20. Вплив технологічних чинників на утворення неметалевих включень вуглецевої сталі та технологічні рекомендації по зниженню їх кількості / Л. В. Камкіна та ін. *Сучасні проблеми металургії*. 2014. № 17. С. 106–115.

21. Губенко С. И., Парусов В. В., Деревянченко И. В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск: Арт-прес, 2005. 536 с.

22. Влияние неметаллических включений в низколегированной углеродистой стали на ресурс трудоброводов АЭС / Л. С. Ожигов и др. *Вопросы атомной науки и техники*. 2017. №4(110). С. 59–64.

23. Неметалеві включення у великому ковальському злитку зі сталі 25ХН3МФА / А.В. Нарівський та ін. *Метал та лиття України*. 2020. №4(28) С. 14–18. https://doi.org/10.15407/steelcast2020.04.014.

24. Вакуленко Л. И., Чайковский О. А., Пройдак С.В. Влияние неметаллических включений на упрочнение матрицы металла при пластическом деформировании. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2013. №1 (60). С. 28–33.

25. Казаков А. А., Житенев А. И., Салынова М. А. Оценка крупных одиночных неметаллических включений в стали с помощью статистики экстремальных значений. *Черные металлы*. 2018. №11. С. 70–74.

26. Шпис Х. И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации; пер. с нем. Москва: Металлургия, 1971. 125 с.

27. Ånmark N., Karasev A., Jönsson P.G. The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels. *Materials*. 2015. vol. 8(2). pp. 751–783.