

**Девиз: флокеночутливість сталі**

**ФОРМИ ПОШКОДЖЕННЯ ВОДНЕМ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ  
ФЛОКЕНОЧУТЛИВИХ СТАЛЕЙ**

## Анотація

наукової роботи під шифром «флокеночутливість сталей»

Актуальність 4роботи. Серед точок зору на масообмінні процеси оклюзії водня сталлю та його видалення з неї при перебігу безперервної розливки сталі відсутній єдиний підхід, наявні розбіжності, не визначені лімітуючі ланки процесів рафінування рідкого розплаву. Практика безперервної розливки високоміцних сталей зустрічається з несподіваними відхиленнями за межі вимог до низького вмісту водню, не зважаючи на вакуумування сталі перед розливкою, і це призводить до втрат придатної заготовки, до зниження якості металопродукції.

Таким чином, системні дослідження теоретичних і практичних передумов рафінування сталі при безперервній розливці легованих сталей від водню є вельми актуальними.

Мета роботи – визначити граничний рівень розчинності водню в безперервно литих флокеночутливих високоміцних сталях, перевищення якого призводить до відбраковки продукції.

Завдання наукової роботи і методика дослідження. На основі фундаментальних металургійних положень і розрахунків автор оцінив рівні граничного вмісту водню в рідкому і твердому залізі стосовно виробництва флокеночутливих високоміцних сталей. Промислові експерименти показали, що вміст водню в металі [H] знижується при його позапічній обробці в ковші-печі і вакуумуванні стабільно до  $\leq 1$  ppm. Однак протягом безперервного розливання в проковші можуть мати місце значно більш високі значення [H], і слід розробити заходи з тим, щоб у прокатаній стрічці концентрація [H] знижувалася до рівня  $\leq 1$  ppm.

Обсяг роботи 16 сторінок, 8 рисунків, 1 таблиця, 10 використаних наукових джерел.

Ключові слова: водень, безперервна розливка, високоміцна сталь, флокени, тріщини.

## Зміст

1. Форми пошкодження воднем безперервнолитих флокеночутливих сталей.....	4
2. Дефекти флокеночутливих сталевих заготовок.....	5
3. Про граничний рівень вмісту водню в високоміцних сталях.....	9
4. Висновки.....	18

## 1. ФОРМИ ПОШКОДЖЕННЯ ВОДНЕМ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ ФЛОКЕНОЧУТЛИВИХ СТАЛЕЙ

Флокени можуть бути у всіх сталях, але найбільш часто вони зустрічаються в високоміцних сталях, що містять хром [1], тобто в хромистих, хромомарганцевих, хромокременистих, хромонікелевих, хромонікельвольфрам-ових, і значимість проблеми зниження вмісту водню, особливо в таких сталях, відповідно з вимогами ринку постійно зростає.

Водень може проникати в рідку і тверду сталь на різних виробничих етапах, наприклад, протягом плавки, позапічної обробки, розливання, травлення і відпалу, тому що молекула водню дисоціює на поверхні металу, і як атомне ядро (протон  $H^+$ ), на кілька порядків менше за розмірами, ніж атом водню, розчиняється в металі з властивим йому виключно високим коефіцієнтом дифузії (табл. 1). При перевищенні межі розчинності в даній модифікації заліза при даній температурі водень виділяється з розчину і при затвердінні сталі створює сильні внутрішні напруги, які призводять до утворення флокенів.

Таблиця 1

Коефіцієнти дифузії  $D$  деяких елементів в рідкому залізі і його сплавах з вуглецем [2]

Дифундований елемент	Середовище	$t, ^\circ C$	$D, \text{см}^2/\text{с}$
N	$Fe_{\text{жидк.}}$	1600	$3,77 \cdot 10^{-5}$
C	$Fe_{\text{жидк.}}$	1600	$3,20 \cdot 10^{-5}$
C	$Fe + 0,03\% C$	1590	$7,20 \cdot 10^{-5}$
S	$Fe_{\text{нас.}}$	1570	$3,8 \cdot 10^{-5}$
B	$Fe_{\text{жидк.}}$	1600	$5,0 \cdot 10^{-6}$
O	$Fe_{\text{жидк.}}$	1600	$0,9 \cdot 10^{-9}$
H	$Fe_{\text{жидк.}}$	1600	$(8-9) 10^{-3}$

Дослідженнями автора встановлено, що вже при проникненні в сталь водню можлива пластична деформація і бере свій початок докритичне

зростання тріщин. У високоміцних сталях з вмістом  $[H] > 2,5$  ppm навантаження величиною, набагато меншої межі розтягування, вже здатні викликати розлом з малою деформацією. Розлом при цьому може статися через години або дні після прикладення навантаження. Високий вміст водню призводить до індукційного їм окрихчення, причому інтеркісталічні розломи, тріщини зі специфічним розташуванням «воронячі лапки» і пори не виключені на поверхні поодиноких зерен навіть у виробів найпростішої форми з високоміцних хромо-кременистих сталей.

Актуальність даного дослідження викликана істотною в ряді випадків відбраковкою на заводі «А» продукції з високоміцних легованих сталей, виплавлених в конвертерах і розлитих безперервнолитим способом. Продукція направляється на виготовлення поршневих пальців, кулачкових валів, частин коробок передач для автомобілебудування.

Причини втрат металу викликані підвищеним вмістом в ньому водню, оскільки вони виявилися в:

- 1) кореляції вмісту водню в сталі і частоти виявлення флокенів за результатами ультразвукового контролю;
- 2) тріщинах сортових заготовок в штовхальних печах прокатних станів при виявленні в заготовках флокенів.

Рекламації споживачів, отримані після випробувань ними виготовлених автомобільних деталей, змусили вивчити внутрішню будову сталевих безперервнолитих заготовок і намітити заходи щодо зниження браку. Флокени виявились тим більш небезпечні, чим більш високу міцність мала сталь.

## **1. Дефекти флокеночутливих сталевих заготовок**

Автором за допомогою співробітників заводу виявлені наступні види дефектів безперервнолитих заготовок сталей марок 20Х2ГА, 25ХМА, 42ХМА, 54С2ХГА.

**Флокени.** У відбитому світлі під мікроскопом вони виглядають як прояснені сфероїдальні обсяги металу, збагаченого воднем і у високому ступені

відновленого. Відомо, що атоми металу в результаті проникнення протонів водню набувають іншу структуру електронних оболонок, ніж навколишня маса.

При охолодженні відлитої заготовки відбувається збагачення аустеніту воднем, тому що розчинність його в аустеніті більше, ніж в фериті. При подальшому охолодженні мають місце все збільшуючі напруги в пересиченій воднем феритній решітці. Виявляються обмежені щілинні тріщини в кубічній просторово-центрованій решітці - по суті, небезпечні внутрішні надриви в металі (рис.1). В принципі, виникнення тріщин - це кінцевий етап розвитку флокенів, який може настати через години і навіть дні після докладень до виробу навантаження. Флокени необов'язково прив'язані до неметалевих включень.

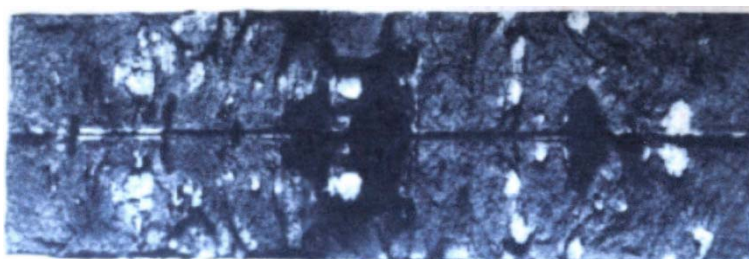


Рисунок 1. Внутрішній надрив в зразку сталі 54ХГСА, викликаний перенасиченням водню феритної решітки

### **Дефект, відомий більше 100 років [3] під назвою «риб'яче око».**

Являє собою тендітні округлі зони, в центрі яких спостерігаються газові бульбашки. У другому варіанті виділення водню відбувається на неметалевих включеннях або біля них, і візуально теж виправдовує таку назву (рис. 2). Для дефектів характерні утворення пустот навколо неметалевих включень при повільному випробуванні на розтяг при, в цілому, пластичному матеріалі на поверхні розлому. «Риб'ячі очі» утворюються лише через деякий час. Їх не знаходили при миттєвому розломі або при високих швидкостях деформації, наприклад, під час випробувань на ударну в'язкість зразка з надрізом або залом.

**Бульбашки при травленні металу.** Виникають при електрохімічному процесі (кислотна корозія або електролітичний заряд), є наслідком оклюзії

атомарного водню поверхнею матеріалу. Відбувається рекомбінація ( $2\text{H} \rightarrow \text{H}_2$ ) у внутрішніх обсягах дефектів, супроводжується розривом або розломом матеріалу. З'являються біля поверхні і також без зовнішнього розтягування або напруги.

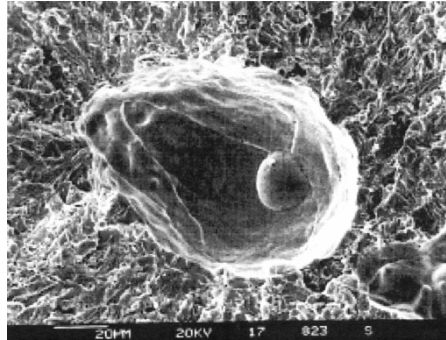


Рисунок 2. Дефект в високоміцній сталі навкруги неметалевого включення

**Пори.** Виникають внаслідок виділення газів і в тому числі водню при зниженні розчинності в сталі. При підвищенні тиску і температури відбувається розпад карбідів і утворення метану по реакції:  $\text{Fe}_3\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{Fe}$ . Нагнітається високий внутрішній тиск. Стадії пошкодження: виникнення одиничних пор, зрощення пор в поля, утворення рубців поміж поодинокими порами, закінчення росту дефектів як результат утворення тріщин, спрямованих до поверхні. Відразу зрозуміла і «перша допомога»: забезпечити стійкість карбідів до впливу водню шляхом легування сталей хромом.

**Уповільнений розлом (або корозія напруги).** Є наслідком виділення водню поблизу або безпосередньо в місці майбутнього розлому. Останній відбувається при дуже маленькому ступеню деформації, незважаючи на те, що сусідні з розломом ділянки матеріалу не виявляють ознак окрихчення. Протікає дифузія атомів водню до місць локального розширення (основа зарубки / насічки, кінець тріщини, первинна зарубка через дірочну корозію). Мають місце локальний розпад решітки, об'єднання нової тріщини з вихідною. Все це - на тлі поступальної дифузії водню в цей регіон з

повторенням описаного процесу. Виявлено, перш за все, у високоміцних оцинкованих гвинтах і шурупах.

Виявлені нами механізми утворення дефектів флокеночутливих сталей підтверджуються аналізом результатів фундаментальних експериментальних досліджень авторів [4-7], котрі намагаються відстояти наступні теорії порушення цілісності сталевих продукції, яке викликає присутність в ній водню. Підкреслимо, що адекватність отриманих результатів підтверджена нами у відповідних розрахунках.

Відповідно до теорії тисків Цаппфе і Сімса скупчення і рекомбінація водню у внутрішніх пустотах, таких як пори, усадочні раковини, мікротріщини, призводить до нагнітання високого внутрішнього тиску газу. Це, в свою чергу, викликає високі внутрішні напруги. На останні накладаються власні напруги, наявні в сталі і виникаючі внаслідок зовнішнього впливу. В результаті перевищуються сили, що зв'язують сусідні атоми, з'являються тріщини або спостерігається їх зростання. Картина ушкоджень - це описані нами флокени і «риб'ячі очі» (див. рис. 1, 2).

Відповідно до декогезійної моделі тих же авторів в разі наявності в сталі водню послаблюються атомарні сили металевої решітки. Має місце додаткова підвищена розчинність водню в поле напруги від розтягування, особливо в закінченнях тріщин (ефект Горського [8]). Картина ушкоджень – інтер- або транскристалічний злам, схема його приведена на рис. 3.

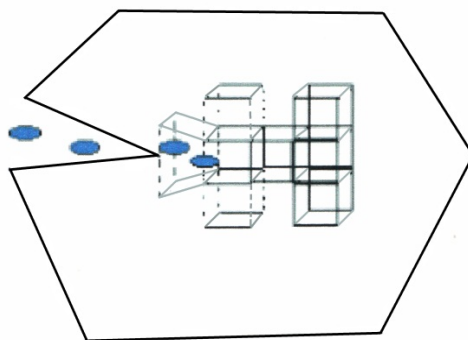


Рисунок 3. Схема інтер- або транскристалічного включення



Згідно Бічому [9] має місце механізм (Hydrogen enhanced local plasticity) - «водневе збільшення локальної пластичності». Передумовами дефекту є скупчення водню в місцях напружень від розтягування і ініціювання ними зміщення мікрооб'ємів металу відносно один одного. Водень полегшує рухливість зсувів, екрануючи поля напружень. Мікротріщини утворюються тільки в області зменшення межі текучості, де ковзання локалізовано. Картиною ушкодження є так звані «воронячі лапки» ("Crowfoots") рис. 4.

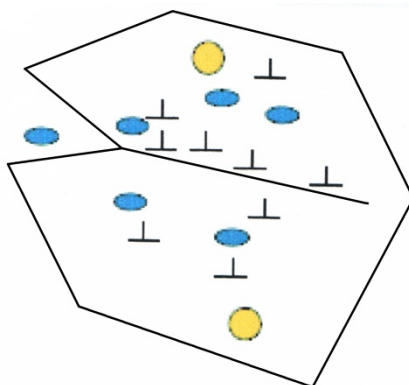


Рисунок 4. Схема пошкодження сталі при збільшенні локальної пластичності, викликаного перебуванням водню

Поширеним поясненням дефектів флокеночутливих сталей є також теорія адсорбції Гріффіта, що стоїть виключно на термодинамічній позиції: адсорбція водню зменшує поверхневу енергію металу. Прискорення утворення тріщин в цьому випадку викликано тією обставиною, що напруга при розриві пропорційна квадратному кореню з енергії поверхні.

У металофізиці використовують і менш поширені моделі порушень суцільності сталевих продукцій: викликане воднем фазове перетворення, блокування ковзання внаслідок деформації кристалічної решітки або утворення гідридів металу.

## 1.2 Про граничний рівень вмісту водню в високоміцних сталях

Стосовно до виробництва флокеночутливих сталей для пружин марок 20X2ГА і 54С2ХГА виконані розрахунки граничного рівня розчинності в них водню, перевищення якого може (з великою часткою ймовірності)

викликати описані види браку. Ці сталі, як виявлено під час відбраковування продукції заводу «А», найбільш схильні до індукованих воднем дефектів. Результати розрахунків співставлені з даними попередньої промислової серії, де автором на кожному етапі виробництва визначені фактичні концентрації [H].

У сталеплавильному цеху заводу «А», обладнаному кисневими конвертерами, установками «ківш-піч», камерним вакууматором, машинами безперервного розливання, відбирали проби сталі по завершенні кожної ланки переділу. Вміст [H] в затверділому металі визначали витримкою проби при 650 ° С в газі-носії з наступним виміром в вимірювальному елементі.

Інформацію про вміст [H] в рідкій сталі в сталеразливному і проміжному ковшах отримували за допомогою установки «Hydris».

Фактичний рівень [H] проаналізовано із залученням термодинамічних закономірностей поведінки водню в залізовуглецевих розплавах.

Розчинність (або оклюзія - обидва терміни підсумовують всі ланки попадання водню з газової фази в обсяг металу) визначається реакцією



Константа рівноваги реакції (2) має вигляд

$$K_{\text{H}} = \frac{a_{\text{H}}}{\sqrt{P_{\text{H}_2}}} = \frac{[\% \text{H}]}{\sqrt{P_{\text{H}_2}}}. \quad (1)$$

$$\lg[\% \text{H}] = \lg K_{\text{H}} + \frac{1}{2} \lg P_{\text{H}_2}, \quad (2)$$

де  $K_{\text{H}}$  - константа рівноваги;

$a_{\text{H}}$  - активність водню;

$P_{\text{H}_2}$  - парціальний тиск водню в газовій фазі;

[% Н] - вміст водню в металі.

Для подальшого розгляду теоретичних вмістів водню в металі необхідно врахувати наступне. Величина  $K_H$  зростає з підвищенням температури від кімнатної до звичайної для процесів виробництва сталі (1550-1700 °С). В межах температур існування модифікацій заліза б, г і д, і в області рідкого стану заліза це наростання відбувається монотонно (рис. 5) відповідно до рівняння [9]:

$$\lg K = -\frac{\sum \Delta H_S}{2RT} + \sum \Delta S, \quad (3)$$

де  $\sum \Delta H_S$  - сумарна зміна ентальпії при дисоціації молекул і розчиненні атомів газу; R - газова постійна; T - абсолютна температура металу, К;

$\sum \Delta S$  - сумарна зміна ентропії системи при розчиненні газу.

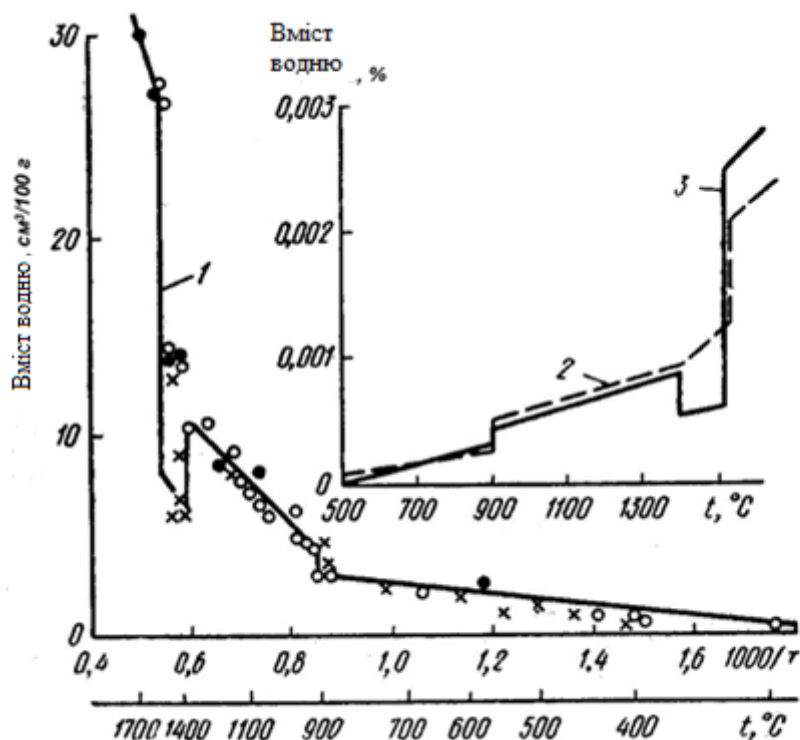


Рисунок 5. Вплив температури на розчинність водню в чистому залізі за даними: 1 - Гудремона; 2 - О.М. Морозова; 3 – Сівертса

Для практики велике значення має зміна розчинності водню в залізі під впливом присадок різних елементів, які є звичайними компонентами і легованих, і вуглецевих сталей. Добре досліджена розчинність водню майже у всіх бінарних сплавах заліза, що мають практичне значення. На рис. 6 приведена діаграма розчинності водню в бінарних сплавах заліза при 1600 °С.

Як видно з діаграми, всі досліджені компоненти бінарних сплавів заліза можуть бути розбиті на три групи:

- 1) Ce, La, Ti, Ta, V, Nb - гідроутворюючі елементи, що значно збільшують розчинність водню, принаймні до тих значень їх концентрації, поки гідрати Ce, Ti і т.п. не виділяються в окрему фазу;
- 2) Cr, Cu, Mn, Ni, Co, Sn - елементи, що мало впливають на розчинність водню в залізі. Розчинність водню в сплавах цих елементів з залізом наближено визначається як середньозважена по розчинності в чистому залізі і доданому компоненті (за правилом адитивності);
- 3) Ge, Al, Si, B, C (і не показані на рис. 6 O, S і P) - елементи, що різко знижують розчинність водню. Вони підвищують ближній порядок в металі і утворюють з атомами заліза угруповання, близькі в середньому за складом до стехіометричного карбіду, силіцидів заліза і т.д., зменшують сорбційну ємність залишився поза межами цих угруповань обсягів (атомів) заліза по відношенню до водню.

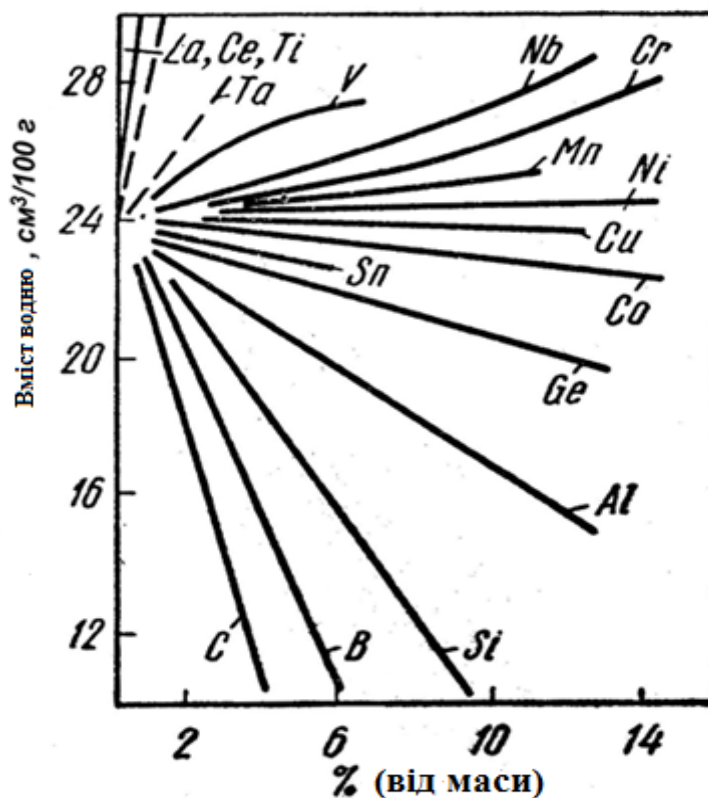


Рисунок 6. Вплив третього компонента на розчинність водню в сплавах Fe-i-N при 1600 ° С [11]

Залежність (4) для кубічної об'ємно центрованої решітки д- і б-заліза приймає наступний вигляд:

$$\lg K = -1418/T - 2,369, \quad (4)$$

Наявні в літературі [1, 7] дані про константи рівноваги  $K$  відрізняються для д-Fe більшим, а для б-Fe меншим розсіюванням, і залежність (5) нами обрана як середньозважена.

Відповідні константи рівноваги розчинення водню в кубічній гранецентрованій решітці г-заліза описуються рівнянням [8]

$$\lg K = -1182/T - 2,369, \quad (5)$$

і майже не відрізняються від даних інших авторів [7].

Для рідкого заліза, за даними Шенка [9]:

$$\lg K = -1662/T - 2,269. \quad (6)$$

Константи рівноваги в рідкому залізі у інших авторів [3-8] дещо більше і у всіх випадках так само зростають з підвищенням температури.

У названих хімічних формулах важливу роль відіграє, відповідно до закону Сівертса, газова фаза:

$$[H] = K \sqrt{P_{H_2}}. \quad (7)$$

Вмісту водню в б- і г-Fe автором визначені за допомогою названих вище формул для різних парціальних тисків і представлені на рис. 7. З підвищенням температури, як і очікувалося, зростає вміст водню, причому при переході від кубічної об'ємноцентрованої решітки б-заліза в кубічну гранецентрову г-заліза спостерігається стрибок розчинності. Найвищий вміст водню в металі досягається під чистою водневою атмосферою (крива 1), він майже на шість порядків менше в технічному вакуумі (крива 5). Вміст водню в залізі на повітрі відображає крива 4.

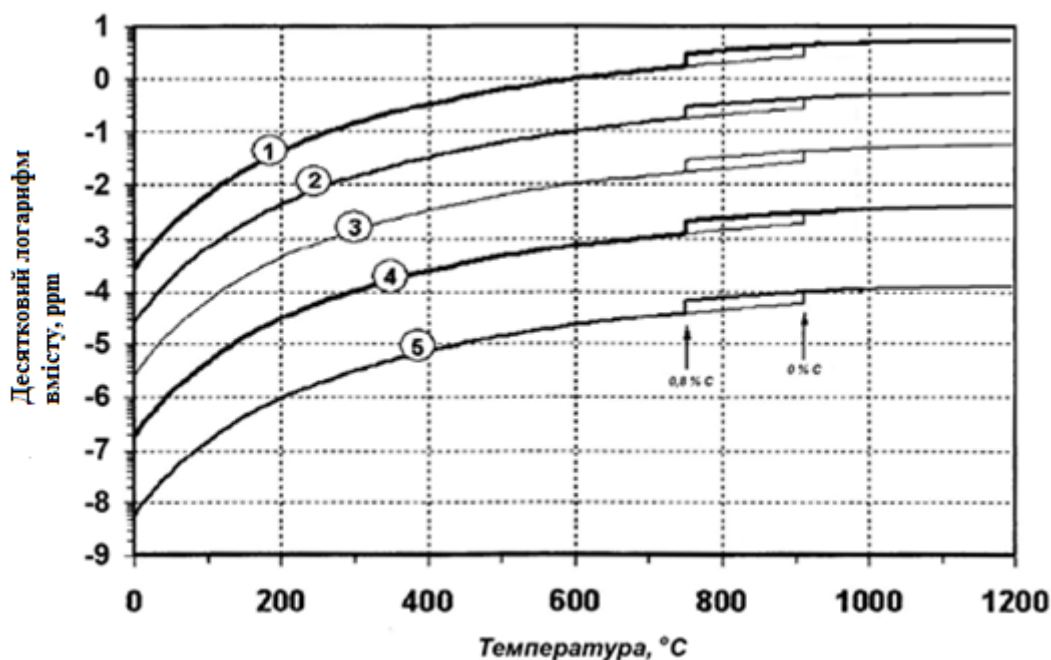


Рисунок 7. Вплив температури і парціального тиску водню в газовій фазі (цифри у кривих, Па) на його концентрацію в твердому залізі: 1 -

$10^2$  (чиста воднева атмосфера); 2 -  $10^3$ ; 3 - 10; 4 -  $5 \cdot 10^{-2}$  (повітряна атмосфера); 5 -  $5 \cdot 10^{-2}$  (вакуум)

Вміст водню в  $\delta$ - і  $\gamma$ - залізі більш точно представлено на рис. 8. за рівновагою між  $\delta$ - і  $\gamma$ -Fe відповідно до лінії GS на діаграмі Fe-C [1] температура переходу знижується в залежності від вмісту вуглецю з 910 до 738 ° C. Таким чином, перехід відбувається у сталей 20X2ГА при 840 ° C, в той час як у сталей марки 54С2ХГА ця температура становить 780 ° C. Рисунок 8 також дозволяє оцінити вплив парціального тиску водню в газовій фазі: так, при зміні атмосфери з 0,5 на 40% об'ємних водню при 900 ° C зростає теоретичний рівноважний вміст у металі у сталей марки 54С2ХГА з 0,3 до 2,7 ppm , тобто різниця вмістів водню в  $\delta$ - і  $\gamma$ - залізі збільшується зі зростанням концентрації в ньому вуглецю.

Аналізуючи склади шлаків для позапічної обробки сталі, слід враховувати, що вони можуть бути джерелами внесення водню в метал перед його розливанням, якщо шлаки формують з непрокалених оксидів. І, навпаки, водневопоглинаюча здатність шлаків може з'явитися серйозним засобом зниження вмісту [H], якщо при внесенні в сталеплавильну систему вони не містили вологи і водяної пари. Встановлено, що водневопоглинаюча здатність лужних шлаків системи CaO- $Al_2O_3$  становить 1000 ppm, але з підвищенням частки кислих оксидів вона знижується до 100-600 ppm, чому є підтвердження в роботі [10].

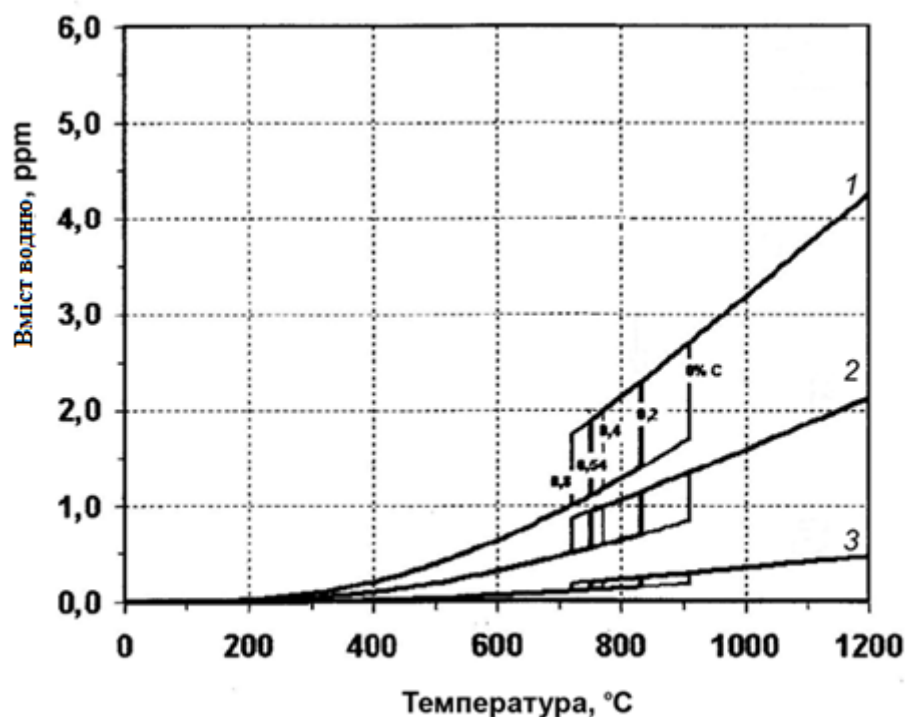


Рисунок 8. Теоретичний вміст водню в б- і г-залізі при різному парціальному тиску і об'єму водню в газовій фазі: 1 -  $4 \cdot 10^{-4}$  Па (40% об.); 2 -  $10^{-4}$  Па (10% об.); 3 - 500 Па (0,5% об.)

На підставі розглянутих теоретичних положень і виконаних розрахунків граничної розчинності водню в твердій сталі, при перевищенні якої в ній будуть з'являтися флокени і тріщини, в технологію позапічної обробки і прокату виплавлених, перш за все, пружинних сталей марок 20X2ГА і 54С2ХГА, а також інших флокочутливих необхідно вносити корективи. Вони повинні наблизити вміст водню в рідкому розплаві до розрахункової граничної його розчинності в твердій металопродукції, що покликане виключити виділення зайвого водню при затвердінні з інспірацією описаних вище дефектів.

Вміст водню в розплаві після випуску з конвертера зазвичай становить 5-8 ppm. Застосовувана технологія обробки сталі на установці "ківш-піч» беззалістим і вапняно-глиноземистими шлаками з продувкою через донні пористі пробки аргонном зменшує [H] до 3-4 ppm.



Подальша дегазація пружинних сталей в вакууматорі при тиску  $<0,5$  кПа протікає з низькими величинами  $K$  і  $P_{H_2}$  в рівнянні (8), що відповідають ефективним дифузійним процесам в цих умовах відповідно до закону Фіка, і забезпечує  $[H] < 1$  ppm.

Після завершення вторинної металургії ківш зі сталлю транспортується на машину безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Протягом безперервного розливання сталь надходить з ковша через попередньо нагрітий промковш в заглибні (в кристалізатор) дозатори.

Однак перші 4-5 плавок при литті «плавка на плавку» характеризуються, як виявилось, підвищенням  $[H]$  протягом перших хвилин до 3 ч 5 ppm, і це викликало необхідність окремого дослідження. Після цієї первинної фази вміст водню знижується і досягає до кінця серії рівня 2 ppm. Варто згадати, що частина плавок з підвищеним вмістом водню піддається витримці, щоб досягти подальшого зниження рівня  $[H]$  завдяки сповільненому охолодженню.

У рамки описуваного дослідження включили і не дегазовану (без вакуумування) плавку сталі сорту 54С2ХГА. Вміст водню в промковші протягом розливання становив 4 ppm і відповідав рівню  $[H]$  перед дегазацією.

Визначено значення  $[H]$  в пружинної стрічці зі сталі 54С2ХГА. У прокатному стані рівень  $[H]$  в стрічці у вакуумованих плавок другої половини серії «плавка на плавку» дорівнював 0,4 ppm. Низького рівня  $[H]$  не досягали в стрічці невакумованої плавки незважаючи на те, що протягом нагрівання в печі прокатного цеху і процесу прокатки водень дефундує зі сталі.

У подальшому виробничому ланцюжку вміст водню в сталі після травлення незначно збільшується - до 0,8 ppm, а потім при подальшому термічному поліпшенні сталі в бідній воднем атмосфері вдається знову досягти значень в 0,5 ppm внаслідок процесів ефузії.

Проте у плавок першої половини секвенції «плавка на плавку» спостерігали високі значення  $[H]$  в промковші, що в ряді випадків призводило до істотного відбракування готової продукції.

Дослідження технологічних режимів для виключення таких «провалів» в якості флокеночутливих сталей заплановано в подальших дослідженнях автора.

## ВИСНОВКИ

1. Описано види і схеми утворення дефектів відбракованої продукції з безперервнолитих високоміцних сталей. Основні дефекти індуковані розчинившимся в металі воднем, що призводить до локального окрихчення мікроб'ємів сталі, причому інтеркристалічні розломи, тріщини зі специфічним розташуванням, пори та інші мікроскопічні недосконалості їх структури не виключені на поверхні поодиноких зерен навіть у виробках найпростішої форми.
2. На основі фундаментальних металургійних положень і розрахунків автор оцінив рівні граничного вмісту водню в рідкому і твердому залізі стосовно виробництва флокеночутливих високоміцних сталей. Промислові експерименти показали, що вміст водню в металі  $[H]$  знижується при його позапічній обробці в ковші-печі і вакуумуванні стабільно до  $\leq 1$  ppm. Однак протягом безперервного розливання в промковші можуть мати місце значно більш високі значення  $[H]$ , і слід розробити заходи з тим, щоб у прокатаної стрічці концентрація  $[H]$  знижувалася до рівня  $\leq 1$  ppm.
3. Завдяки низьким значенням  $[H]$  можна виключити викликані воднем дефекти металопродукції. При подальшій обробці або протягом служби виробка необхідно виключати контакт протонів з його поверхнею, щоб уникнути їх проникнення в сталь, особливо, в стані її напруги, і появи тріщин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. – М.: *Металлургия*. – 1978. – 648 с.
2. *Металлургия стали* / В.И. Явойский, С.Л. Левин, В.И. Баптизманский, П.В. Умрихин [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1973. – 816 с.
3. Галактионова Н.А. *Водород в металлах и сплавах* / Н.А. Галактионова. – М.: *Государственное научно-техническое издательство по чёрной и цветной металлургии*, 1959. – 255 с.
4. Zapffe G. Recommended Equilibrium Values for the Reactions of Steelmaking / G. Zapffe, C. Sims // *AIME*. – 1949. – Vol. 32. – P. 236-240.
5. Grabke H.J. Absorption and Diffusion of Hydrogen in Steels / H.J. Grabke, E. Riecke // *Materials and Technology*. – 2000. – Vol. 34 (6). – P. 331-342.
6. Чучмарёв С.К. Влияние неметаллических включений на окклюзию водорода сталью в напряжённом состоянии / С.К. Чучмарёв, В.Г. Сторчак, Л.Г. Барг // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1972. – №1. – С. 42-44.
7. *Steelmaking Data Sourcebook. Revised Edition. The Japan Society for the Promotion of Science / The 19<sup>th</sup> Committee on Steelmaking*. – New York: *Gordon and Breach Science Publishers*, 1988. – 598 p.
8. Geller W. Grundlagen der Wirkung von Wasserstoff und die Rissbildung in Stählen // W. Geller, Tak-Ho Sun. – *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 1950. – No. 21. – S. 423-428.
9. Schenk H. Untersuchungen über Wasserstofflöslichkeit in Eisen, Nickel, Cobalt, Kupfer und deren binären Nickellegierungen / H. Schenk, K.W. Lange. – *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. – 1966. – No. 37. – S. 739-748.
10. Mausbach K. Structural Statements, Coordination Numbers and Water Vapour Solubility in aluminate Slags / K. Mausbach, N. Nowack, F. Schlegelmilch // *Steel Research*, 1993. – No. 64. – P. 239-245.