

Ю. Петрина, докт. техн. наук; Л. Пітулей; Д. Феденчук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ВИНИКНЕННЯ ЗАРОДКІВ ГАЗОВИХ ПУХИРЦІВ І ДЕГАЗАЦІЇ АРМОВАНОВОГО РОЗПЛАВУ ЗУБКА ШАРОШКИ БУРОВОГО ДОЛОТА ЗА ДОПОМОГОЮ ВІБРАЦІЇ

У роботі досліджено залежність тиску вуглеводню в порах у зародках пухирців, концентрація вуглеводню в зародках пухирців. Показано, що насиченість газу в сплаві, що містить сталеві домішки, хром і нікель, призводить до утворення різних пор у композиційному матеріалі і погіршує його механічні характеристики, що скорочують термін експлуатації бурового долота. Встановлено роль технологічних і частотних параметрів розрядного сталевого сплаву в процесі його дезактивації і виробництва чистих композиційних матеріалів з мінімальним вмістом домішок вуглеводню, водню і азоту для того, щоб збільшити ресурс роботи бурового долота.

Y. Petruna, L. Pituley, D. Fedenchuk

INTENSIFICATION OF INITIATION OF EMBRYOS OF GASEOUS BLISTERS AND DEGASSING OF THE INSET FUSION OF TOOTH OF THE ROLLING CUTTER OF BORING BIT BY A JARRING ACTION

Dependence of the hydrocarbon's pressure in pores on curve of the cavern, concentration of hydrocarbon and on the radius of the pit is depicted in the research work. It is shown that the gas saturation in the alloy, containing steel fittings, chromium and nickel, leads to formation of different caverns and pits in a compositional material and deteriorates its mechanical characteristics reducing the life of a milling bit. The role of technological amplitude and frequency parameters of the bit's steel alloy in the process of alloy's decontamination and of production the pure compositional materials with minimal content of hydrocarbon, hydrogen and nitrogen admixtures in order to increase the life of the drilling bit was studied.

Умовні позначення

p^{H_2} і c^H – відповідно тиск і концентрація водню;

r_n – радіус пори;

A_{12} – константа, близька до числа Авогадро;

$r_{кр}$ – критичний радіус флуктацій;

σ_{23} – поверхневий натяг на межі розділу розплав-газ;

K_B – коефіцієнт Больцмана;

T – температура розплаву;

M_T – молекулярна маса газу;

R – газова постійна;

ρ_3 – густина газу;

c/c_0 – критична величина перенасичення;

c_i^0 – деяка рівнодіна концентрація газу при температурі T_i і тиску p_i^0 ;

$p_{сз}$ – сумарний тиск газів;

h_8 – висота неармованого об'єму розплаву;

γ_1 – питома маса розплаву;

r_{34} – радіус поверхні зчеплення газового пухирця з поверхнею V твердої частинки;

σ_2 – поверхневий натяг;

L_2 і d_{cp} – довжина і середній діаметр газового пухирця;

v_k – швидкість розплаву в капілярі;

$f(\theta)$ – функція крайового кута змочування поверхні розділу;

r_c – радіус сферичного дефекту;

r_0 – радіус основи сферичного дефекту;

N_0 та N_T – кількість зустрічей пухирця r_0 з пухирцем r_i у результаті гравітаційної і неупорядкованої коалесценції відповідно;

c_i – концентрація пухирців у розплаві;

Δt_0 – час спливання пухирця;

$f(r_i)$ – функція розподілу пухирців за розмірами;

ρ_3 – густина газу;
 $\varepsilon_0 = \varepsilon / \rho_1$ – константа порядку 10^4 , яка характеризує потік;
 ρ_1 – густина розплаву сталі;
 φ_m – масова доля матричної сталі в ЛКМ;
 ρ_2 – густина армітора;
 c_p – теплоємність розплаву;
 $T_3, T_{пл}, T_k$ – відповідно температура заливання, плавлення, кімнатна;
 α_T – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні форми в навколишнє середовище;
 Δm_1 – доля незастиглої розплаву;
 m_2 – маса пухирця;
 a_r – пришивдення пухирця у відносному русі;
 F_A – архімедова сила;
 F_B – вібраційна сила;
 P_e – вага газового пухирця;
 $F_{оп}$ – сила опору газового пухирця течії розплаву в капілярі;
 $F_{зч}$ – сила зчеплення газового пухирця з твердою частинкою;
 Q_s – адсорбційна ємність поверхні дефекту;
 S_0 – площа поверхні дефекту;
 σ_{T-g} – величина поверхневого натягу рідкого розплаву.

Постановка проблеми. Одним із найбільш поширених шкідливих дефектів, які виникають при виготовленні литих композиційних матеріалів (ЛКМ), є макроскопічні газові пори, що приводить до зменшення довговічності деталей бурового озброєння. Фізико-механічні характеристики ЛКМ залежать від вмісту в розплаві шкідливих домішок, до яких належать і гази. Насичення рідких металів у процесі їх виплавки азотом, воднем та іншими газами може приводити до утворення пустот та раковин у виливках і до інших дефектів готової продукції. Водень є одним із основних газів, який міститься у порах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гіпотеза про існування значних внутрішніх тисків водню в пустотах металу використовується для пояснення явища водневого окрихчування [1]. Аналіз загальних принципів та технологічних положень інтенсифікації виникнення зародків газових пухирців і дегазації авмованого розплаву здійснений і розглянутий у роботах [2-6] вчених Гиббса Д., Френкеля Я.И., Редчица В.В., Овчинникова В.В. та інших. Отримано рівняння термодинамічної рівноваги, яке враховує залежність тиску водню в порах від кривизни поверхні порожнини, концентрації водню, радіуса пори та інші питання.

$$\ln(p^{H_2}) = 2 \ln(c^H) + \frac{30,96 + 2,2 \times 10^{-5}}{r_n \sqrt{p^{H_2}} (1 + 4,31 \times 10^{-5} \sqrt{p^{H_2}})} \quad (1)$$

Отже, згідно з рівнянням (1), для зменшення тиску водню в порах необхідно зменшувати його концентрацію.

Мета роботи. Метою роботи є обґрунтування найбільш ймовірних механізмів виникнення газової пористості і джерел формування зародків пухирців газу, що частково вирішить проблему попередження пороутворення в армованому розплаві за допомогою дії на нього низькочастотних коливань.

Робота виконується згідно з постановою Кабінету Міністрів України "Про розвиток сільськогосподарського машинобудування і забезпечення агропромислового комплексу конкурентноспроможною технікою" на 2004...2008 роки.

Результати досліджень. Утворення газових пор - це багатофакторний гетерофазний фізико-хімічний процес, який протікає в декілька етапів. Основні етапи пороутворення: виникнення зародків газових пухирців, їх ріст, пухирцева дегазація розплаву металу і утворення пор при кристалізації (рис.1).

1 Стадія виникнення зародків газових пухирців

Утворення пухирців газу в розплаві лімітується наявністю термодинамічно стійких флуктацій газу, які здатні до спонтанного росту [2]. Статистична ймовірність появи флуктацій критичного розміру може бути оцінена як [2,3]

$$I = A_{12} \exp\left(-\frac{4\pi r_{кр}^2 \sigma_{23}}{3K_B T}\right). \quad (2)$$

Проведені за формулою (2) розрахунки показали, що утворення стійких зародків пухирців за рахунок статистичних флуктацій не реалізується через їх надзвичайно малі розміри.

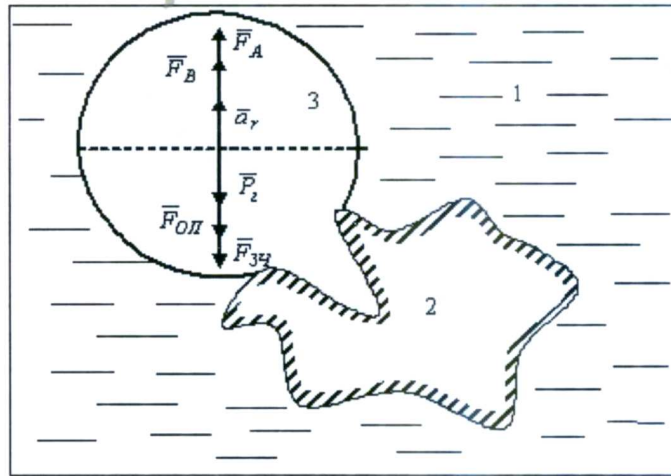


Рисунок 1 - Схема утворення пор при ендогенному механізмі виникнення зародків газових пухирців:
1 - розплав сталі; 2 - армітор; 3 - зародок газового пухирця

На основі рівняння Томсона (Кельвіна) і закону Сівертса отримано новий вираз для оцінки критичного радіуса зародка газового пухирця $r_{кр}$ при його гомогенному утворенні в об'ємі рідкого металу [4]:

$$r_{кр} = \frac{2\sigma_{23}M_{\Gamma}}{RT\rho_3 \ln\left|\frac{c}{c_0}\right|^2 K_B}. \quad (3)$$

Рівняння (3) відображає стан двокомпонентної системи “розчинний газ - рідкий метал”. Для багатоконпонентної системи [5] з врахуванням тиску, зумовленого вібрацією розплаву, і металостатичного тиску рівняння (3) набуває вигляду:

$$r_{кр} = \frac{2\sigma_{23}V_m}{RT\rho_3 \ln\left|\frac{c}{c_0}\right|^2 - (p_{ce} + h_6\gamma_1 + p_e)}, \quad (4)$$

де $\frac{M_{\Gamma}}{\rho_3} = V_m$ – мольний об'єм газу.

Кількісна оцінка $r_{кр}$ згідно з рівняннями (3) і (4) свідчить про те, що ймовірність самовільного утворення зародків пухирців в гомогенному середовищі за рахунок гетерофазних статистичних флуктацій винятково мала.

Тому для інтенсифікації процесу виникнення зародків газових пухирців у капілярах армованого об'єму і в неармованому об'ємі доцільно, згідно з рівнянням (4) діяти на розплав низькочастотними коливаннями.

Наявність у розплаві твердих включень карбїду вольфраму, поверхні яких на початку процесу розплавляються, дозволяє процес армування змодельювати сукупністю зварних швів змінної довжини і висотою, рівною висоті армованого об'єму. Ширина зварного шва визначається віддаллю між частинками твердої фази і їх формою. Вид поверхні розділу тверде тіло - розплав визначається формою арміторів.

Наявність у розплаві сталі твердих частинок зменшує енергію утворення зародка газового пухирця.

У роботах [6,7] була встановлена залежність критичного радіусу пухирця при гомогенному r_a та гетерогенному r_e зародженні:

$$r_s = \frac{r_e}{f(\theta)}. \quad (5)$$

Величина, обернена $f(\theta)$, названа критерієм стимулюючої дії поверхні розділу на зародження пухирців [8].

Вона залежить від геометрії поверхні розділу і наявності в ній дефектів механічного походження.

Для поверхні, яка має дефекти у вигляді сфер, отримано такий вираз [8,9]:

$$f(\theta, \gamma_2) = \left[\frac{2 - 2 \sin(\theta - \gamma_2) - \cos^2(\theta - \gamma_2) \sin(\theta - \gamma_2) + \cos^3(\theta - \gamma_2)(2 - 2 \sin \gamma_2 - \sin^2 \gamma_2)}{4 \cos^3 \gamma_2} \right], \quad (6)$$

де $\gamma_2 = \arccos(r_c / r_0)$.

Розв'язуючи рівняння (4-6), отримаємо значення критичного радіуса пухирця при його гетерогенному зародженні і дії вібрації на розплав.

Розрахунки показали, що наявність дефектів на поверхні розділу сприяє значній стимулюючій дії на процес зародження газових пухирців [4], так як критерій стимулюючої дії є функцією кута змочування і геометричного параметра, який залежить від форми арміторів. Як наслідок, при певних кутах змочування і значеннях геометричних параметрів твердих частинок утворення зародка відбувається з меншими витратами зовнішньої енергії, тобто в цьому випадку самі дефекти є готовими зародками газової фази.

Аналіз літературних джерел [6,10-12] з дослідження пороутворення дозволяють поділити механізми утворення зародків газових пухирців на ендогенний (в об'ємі розплаву на тугоплавких частинках) і екзогенний (поза розплавом на дефектах поверхні з'єднань арміторів).

Найбільш ймовірними джерелами газу для формування пухирців є кисень, який міститься в гідратованих оксидах, адсорбований на поверхні волозі і розчинених у сталі домішках, які містять вуглець.

Залізо і нікель, які містяться в сталі, належать до групи металів, які поглинають водень з поглинанням тепла. Метали цієї групи не утворюють гідридів. Для цих металів характерний як ендогенний, так і екзогенний механізм утворення газових пухирців. Ендогенний механізм є переважаючим, так як для його реалізації в розплаві завжди є велика кількість готових зародків газових пухирців.

При армуванні сталі готовими зародками газових пухирців є погано змочувані тугоплавні оксидні включення вольфраму, які утворюються при руйнуванні поверхневих оксидних плівок. Капілярні дефекти в цих плівках містять гази, вологу та інші газоутворюючі речовини.

Оскільки взаємодія водню із нікелем та залізом проходить за ендотермічною реакцією, то його виділення з розплаву і розвиток пухирців у результаті дифузії найбільш ймовірні на стадії кристалізації сталі.

Особливо важливу роль в якості ініціатора зародження пухирців і найбільш ймовірного джерела газу відіграють продукти реакції при нагріванні вологи адсорбованої на поверхнях арміторів або з концентрованої в об'ємі дефектів.

Дегазація розплаву сталі можлива, в результаті виділення газу у вигляді атомів і переважно пухирців через поверхню рідкої сталі. Подальший їх ріст можливий як за рахунок дифузії водню, так і в результаті об'єднання газових пухирців. При обмеженій кількості розчиненого в розплаві водню основну роль відіграє механізм об'єднання, рушійною силою якого є намагання системи "розплав-газ" зменшити вільну поверхневу енергію.

Укрупнення газових пухирців може відбуватися шляхом їхньої коалесценції, а в полідисперсних системах, крім того, за рахунок дифузії газу з пухирця меншого розміру в значно більший пухирець з меншим тиском газу. Між контактуючими пухирцями утворюються тонкі плівки (трикутники Гіббса), з яких під дією сил поверхневого натягу витікає розплав і відбувається процес коалесценції. При

дифузійному механізмі об'єднання пухирців рушійною силою процесу є різниця тисків в середині пухирця, яка створює градієнт концентрації газу в рідкій пливці, яка розділяє пухирці. При ендогенному механізмі зародження газових пухирців можна допустити, що в об'ємі розплаву існують пухирці розміром r_0 , кількість яких приблизно рівна кількості погано змочуваних тугоплавких включень.

Для оцінки росту газових пухирців при їх рухові в об'ємі розплаву розглянемо полідисперсну систему пухирців $r_0, r_1, r_2, \dots, r_i$, в якій пухирці розмірами r_1, r_2, \dots, r_i послідовно зазнають коалесценції з пухирцем r_0 . Тоді через N послідовних актів коалесценції пухирця r_i на пухирцеві r_0 останні збільшуються до розмірів [13].

$$r^3 = r_0^3 + Nr_i^3.$$

Таким чином, задача зводиться до визначення кількості послідовних актів коалесценції N пухирців r_i , з пухирцями r_0 у віброуючому розплаві за час Δt .

До зустрічі газових пухирців у ванні приводять два фактори: різниця швидкостей спливання пухирців різного розміру і неупорядкованість руху пухирців при турбулентній течії розплаву.

Загальна кількість зустрічей N виділеного пухирця r_0 буде рівною

$$N = N_o + N_T. \quad (7)$$

Згідно з [14], вираз (7) набуде вигляду:

$$N = \frac{\pi g c_i}{9\nu} \Delta t_o \int_0^{r_0} (r_0 - r_i)^2 (r_0^2 - r_i^2) f(r_i) dr_i + \frac{\pi \rho_3}{\rho_1} \left(\frac{\varepsilon_0}{\nu} \right)^{3/4} c_i \Delta t_o \int_0^{r_0} (r_0 + r_i)^2 (r_0^2 - r_i^2) f(r_i) dr_i.$$

При екзогенному механізмі виникнення зародків газових пухирців, їх ріст, в більшій мірі, залежить від чистоти механічної обробки ТЧЗФ і стану дисперсної системи (різниця між r_0 і r_i).

2 Механізм і кінетика пухирцевої дегазації розплаву сталі при віброармуванні

Дегазія розплаву матриці можлива в результаті видалення газу у вигляді атомів і переважно пухирців через поверхню неармованого розплаву. Пухирцева дегазія протікає протягом усього часу існування рідкого металу матриці. Таким чином, повнота дегазації залежить, в основному, від тривалості процесу кристалізації і часу, необхідного пухирцеві для підняття з об'єму розплаву до його поверхні. Від співвідношення цих двох параметрів залежить і ймовірність появи газових пор в закристалізованому металі.

Час, необхідний для затверднення розплавленого матричного металу, який знаходиться в проміжках між арміторами, можна визначити за формулою [15]

$$t_3 = \frac{\pi \varphi_M R^2 \rho_2 c_p (T_3 - T_{nl})}{(T_3 - T_{nl}) \alpha_T} + \frac{\Delta m_1 \pi R^2 \varphi_M \rho_1 \lambda_{nl}}{(T_3 - T_{nl}) \alpha_T}.$$

Для визначення часу, необхідного пухирцеві для підйому з армованого об'єму до поверхні розплаву, розглянемо динаміку руху пухирців у капілярах і в неармованому об'ємі розплаву під дією вібрації.

Час знаходження пухирців в об'ємі розплаву залежить від швидкості їх спливання в капілярах і в неармованому об'ємі в полі сили тяжіння, тобто від їх розмірів, гідродинаміки розплаву і від його просторового розширення.

Процес пухирцевої дегазації можна поділити на три основні стадії: відрив пухирця від поверхні арміторів, його спливання і перехід через міжфазну поверхню.

Час існування пухирця у зафіксованому на поверхні ТЧЗФ стані визначається швидкістю v_n росту зародка пухирця радіусом r_n , який утворився на дефектах твердої частинки, до деякого критичного розміру r_{kp} [16]

$$t_0 = \frac{r_{kp} - r_n}{v_n}.$$

Радіус r_{kp} можна визначити з умов відриву пухирця від поверхні твердої частинки карбиду вольфраму, яка рухається. Для цього розглянемо взаємодію пухирця з твердою частинкою при коливанні системи тверда частинка – газовий пухирець.

При дії вібрації на розплав відрив пухирця від основи "подложки" можливий після того, як він виросте до критичного розміру за рахунок кінетичної енергії потоку рідкого металу. Запишемо диференційне рівняння відносно руху пухирця

$$m_2 a_r = F_A + F_B - P_r - F_{on} - F_{3ч}.$$

Використовуючи умову відриву пухирця від армітора (рис.1)

$$F_{3ч} \leq F_A + F_B - P_2 - F_{on} - m_2 a_e,$$

визначимо критичний радіус пухирця $r_{кр} \leq \sqrt[3]{\frac{3(F_{3ч} + F_{on} - F_6)}{4\pi(\alpha_r \rho_r - g(\rho_1 - \rho_2))}}$.

Результуюча поверхневих сил дорівнює $F_{3ч} = \pi r_{3ч}^2 \sigma_2$.

Сила опору газового пухирця течії розплаву в капілярі при $Re=100$ виражається формулою [1] $F_{on} = L_2 d_{cp} \rho_1 v_k^2$.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено, що головними силовими параметрами, які впливають на відрив газового пухирця від твердої частинки, є амплітуда і частота коливань, швидкість поширення поздовжніх хвиль і густина розплаву.

Швидкість росту пухирця на поверхні твердої частинки, згідно з [10] і з врахуванням коливання розплаву, виражається рівнянням

$$v_r = \frac{r_{кр} - r_o}{\eta} \left[\frac{3P_a Q_s S}{4\pi r_{кр}^2} \left(1 + \frac{T}{273} \right) - P_a - \frac{2\sigma_{l-g}}{r_{кр}} + P_6 \right]. \quad (8)$$

Отже, згідно з рівнянням (8), вібраційний тиск прискорює ріст пухирця, його відрив від основи та інтенсифікацію дегазації розплаву сталі.

Література

1. Скрипник Д.І. До питання про надмірний тиск водню в пустотах металу //Доп. НАН України. - 1998. -№5. - СІ 12-117.
2. Гиббс Д. Термодинамические работы. Пер. с англ. – Л.: Госхимиздат, 1950. -415 с.
3. Френкель Я.И. Кинематическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1967. - 388 с.
4. Редчиц В.В., Редчиц А.В., Овчинников В.В. и др. Физико-химические закономерности процесса образования зародышей газовых пор в металлах в условиях их соединения локальным расплавлением / Физика и химия обработки материалов. - 1977, №6. - С. 81-86.
5. Редчиц В.В., Никифоров Г.Д. Аналитическая оценка вероятности возникновения пузырьков газа, выделяющегося из расплава при сварке // Автоматическая сварка. - 1983. - №9. - С. 32-35.
6. Редчиц В.В. Повышение технологической надежности сварных конструкций летательных аппаратов, выполненных из титановых сплавов. Дис. докт. физ.-мат. наук.-М.: МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1984.- 487 с.
7. Никифоров Г.Д. Влияние дефектов поверхности раздела на выделение пузырьков растворенного газа // Сварочное производство. - 1974. - №2. - С. 50-52.
8. Редчиц В.В., Никифоров Г.Д. Сравнительная оценка склонности к образованию пор при сварке плавлением различных активных металлов // Автоматическая сварка . - 1983 - №2. - С. 30-33.
9. Редчиц В.В., Никифоров Г.Д. Механизм зарождения в сварочной ванне пузырьков газа при сварке активных металлов // Сварочное производство. - 1977. - №8. - С. 53-57.
10. Редчиц В.В. Предупреждение пор при сварке цветных металлов плавлением //Автоматическая сварка-1991. -№6.- С. 34-35.
11. Редчиц В.В., Никифоров Г.Д. Механизм образования зародышей пузырьков при сварке плавлением активных металлов. //Физика и химия обработки материалов . - 1982. - №6. - С. 69-75.
12. Редчиц В.В., Никифоров Г.Д., Фролов В.В. и др. Основные закономерности образования пор при сварке плавлением титанам / Сварочное производство. – 1987.- №5. - С. 28-30.
13. Редчиц В.В., Редчиц А.В., Фролов В.А. и др. Физико-химические закономерности процесса развития пузырьков газа в объеме динамически подвижной волны металла // Физика и химия обработки материалов. - 1998. -№2.-С. 71-76.
14. Шелудько А. Коллоидная химия.–М.: ИЛ, 1960.-332с.
15. Затуловский С.С. Литые композиционные материалы. - Киев.: Техника, 1990. -240 с.
16. Редчиц В.В., Фролов В.А., Овчинников В.В. и др. Механизм и кинетика пузырьковой дегазации ванны металла // Физика и химия обработки материалов. - 1998. - №3. - С. 70-77.