

<https://doi.org/10.15407/plit2023.04.003>

УДК: 669.715: 621.74: 669.788

В.І. Бєлік, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., e-mail: belikvi@ukr.net;
ORCID 0000-0001-8212-3159

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СПЛАВУ АМ4,5 КД (ВАЛ10). Повідомлення 3: ВПЛИВ ВОДНЕВОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ

Розглянуто вплив водневої обробки (ВО) розплаву АМ4,5 Кд (ВАЛ10) на схильність виливка, що твердне в умовах гальмування лінійної усадки, локалізації деформацій та утрудненого живлення, до формування гарячих тріщин і запропоновано уточнений механізм позитивного впливу ВО на тріщиностійкість. Використано спеціально розроблену пробу на тріщиностійкість, контрольні виливки тверділи з утворенням тріщини. Позитивним результатом ВО вважали повну відсутність тріщини. ВО розплаву здійснювано його газонасиченням парами води шляхом занурення під рівень розплаву тампона з вологої мінеральної вати. Досліджено показники міцності та щільності отриманих виливків. Установлено, що в умовах експерименту ефективність ВО складала 60 %, причому міцність металу зразків, отриманих після ВО розплаву, перевищувала міцність металу контрольних зразків унаслідок заміни гострокутних пор, що формуються в умовах утрудненого живлення, округлими газовими порами. Аналіз результатів дає змогу зробити висновок, що позитивний ефект водневої обробки досягається шляхом запобігання переходу тиску у вилівок до від'ємних значень із подальшим розривом розплаву та утворенням тріщини, зниженню ступеня локалізації деформацій (що є основною причиною утворення тріщини) і «заліковуванню» тріщини розплавом, який видавлюють у неї буюбашки водню.

Ключові слова: тріщиностійкість, воднева обробка розплаву, сплав АМ4,5 Кд (ВАЛ10).

Вступ

Утворення гарячих тріщин у процесі тверднення виливка в умовах гальмування усадки тією чи іншою мірою властиве багатьом ливарним сплавам, особливо з широким інтервалом тверднення, яскравим представником яких є сплав АМ4,5 Кд (ВАЛ10).

У роботі [1], яка є однією з найповніших монографій, присвячених проблемам гарячеламкості кольорових металів та сплавів, водневу обробку (ВО) розплаву розглянуто як один із методів підвищення тріщиностійкості; там же вказано, що пропозицію про підвищення тріщиностійкості сплаву шляхом введення водню ще в 1954 році висловили німецькі вчені Schtuer E., Williams J. та Wood J. Вони звернули увагу на те, що кількість водню, який вводиться, має бути достатньою для зниження гарячеламкості, але мінімальною для досягнення бажаного ефекту, оскільки очікувалося збільшення пористості виливка, адже, мовляв, підвищений газовміст розплаву призведе до зниження міцності й пластичних характеристик виливка.

Аналогічні дослідження впливу водню на гарячеламкість було проведено через кілька років і в нашій країні. Так, у роботі [2] відзначено позитивний вплив газонасичення розплаву $\text{Al}+4\% \text{Cu}$ на тріщиностійкість виливка, причиною чого названо зменшення лінійної усадки в ефективному інтервалі кристалізації. Підвищення тріщиностійкості в результаті ВО досягнуто і в роботі [3], проведений на сплавах Д16, В95, АМц, алюмінії марки А00 і сплаві алюмінію з $4,5\% \text{Cu}$ та $0,8\% \text{Si}$. Було показано, що позитивний ефект ВО тим більший, чим ширший інтервал кристалізації сплаву, причому вплив величини лінійної усадки сплаву на тріщиностійкість підтверджено результатами експериментів із вакуумної дегазації сплавів, унаслідок якої гарячеламкість збільшувалася.

Незважаючи на те що позитивний ефект ВО було відзначено в лабораторних умовах і перевірено на виробництві, у [1] висловлено слушну думку, що ВО навряд чи набуде помітного поширення, оскільки, згідно з тогочасними уявленнями про негативний вплив водню на механічні властивості відливка та його герметичність (що збереглися й дотепер, попри переконливі результати численних досліджень стосовно позитивного впливу ВО на властивості виливків), розплав зазвичай дегазують.

Постановка задачі

Незважаючи на технологічну простоту газонасичення розплаву, цей метод не набув широкого застосування, оскільки досі немає відомостей про одночасний вплив ВО розплаву на тріщиностійкість, пористість і, головне, на властивості литого металу. Не виключено, що ще однією причиною стало недостатньо повні уявлення про механізм позитивного впливу ВО.

Механізм підвищення тріщиностійкості за рахунок газонасичення розплаву, згідно з [1], спирається на описане там явище т. зв. «передусадкового розширення», тобто збільшення розмірів виливка в рідко-твердому й твердо-рідкому стані під дією бульбашок газу, що ростуть між кристалами і розсувають їх, завдяки чому зменшується, як і було показано раніше [2, 3], лінійна усадка, і зазвичай низький в інтервалі тверднення рівень пластичності стає достатнім для запобігання утворенню тріщини.

У роботі [1] зроблено висновок про те, що утворенню гарячої тріщини сприяє нерівномірність охолодження виливка по її довжині, оскільки це призводить до локалізації деформацій, тобто їх реалізації на певній обмеженій ділянці виливка, абсолютна величина пластичного подовження якого недостатня для компенсації сумарної лінійної усадки по всій довжини виливка. Пізніші дослідження [4] встановили, що локалізація деформацій не тільки сприяє виникненню тріщин у реальних виливках, але і є його головною причиною, оскільки «деформаційна здатність сплавів у температурному інтервалі крихкості визначається не їхньою пластичністю (відносним подовженням), а в основному їхньою граничною пружною деформацією, що значно, «на порядок», перевищує пластичність та лінійну усадку сплавів, і тому «при однорідних деформаціях гарячі тріщини у виливках не повинні виникати взагалі». «Вони формуються в гарячих, і тому менш міцних зонах виливка, утворення яких викликано нерівномірністю охолодження, і лише в тому випадку, коли ступінь локалізації (концентрації) деформацій в елементах їхнього тіла перевищує запас міцності сплаву». Аналогічний висновок з урахуванням аналізу даних, наведених у [5, 6], зроблено й у роботі [7]. Дійсно, величини передусадкового розширення, викликаного ВО розплаву та лінійної усадки в інтервалі крихкості зіставні, [3] чим і обґрунтовується припущення, що причиною підвищення тріщиностійкості є передусадкове розширення. Звісно, однак, що і в реальних виливках (тобто за умови концентрації деформацій) ВО підвищує тріщиностійкість, хоча, якщо довжина зони концентрації деформацій менша за загальну довжину виливка в кілька разів (що може бути при твердінні реальних виливків), то і передусадкове розширення в цій зоні має бути в кілька разів більшим за лінійну усадку в ній. Але, як показано вище, ці величини близькі, і тому незрозуміло, яким чином передусадкове розширення на ділянці концентрації деформацій може компенсувати розтягнення цієї ділянки лінійною усадкою всієї довжини виливка.

При оцінці валідності запропонованого [1] механізму позитивного впливу ВО на тріщиностійкість слід враховувати як значення, що надається величині відносного подовження в інтервалі крихкості, так і наведену вище думку [4], що вирішальне значення має не величина відносного подовження, а гранична пружна деформація, а також те, що вплив передусадкового розширення на величину граничної пружної деформації в цих дослідженнях не зафіксовано. Потрібно з'ясувати, чому один і той самий ступінь збільшення розмірів вилівка за рахунок його розтягування в умовах відсутності передусадкового розширення призводить до утворення тріщини, тоді як при його наявності тріщина усувається, тобто чому при розтягуванні кристалічного каркаса бульбашками газу не відбувається його розриву на будь-якій одній бульбашці з утворенням тріщини. Крім того, потрібно звернути увагу на роль ВО в «заліковуванні» тріщин — цей процес описано докладно в [1], але поза зв'язком із водневою обробкою.

Мета роботи

У цій роботі отримано дані про вплив ВО на тріщиностійкість, пористість і властивості литого металу, завдяки чому здійснено уточнення механізму впливу ВО на тріщиностійкість. Це дозволить провести оптимізацію режимів ВО і має сприяти впровадженню метода ВО у промисловості.

Методика дослідження

Для аналізу впливу ВО на схильність сплаву АМ4,5 Кд (ВАЛ10) до утворення гарячих тріщин використано показники міцності та пористості литого металу зразків, виготовлених із виливків спеціально розробленої [8] проби на тріщиностійкість. Такий виливок являє собою призму із заплічками, при твердінні розплаву в яких виникають напруження, що розтягують. Його властивості порівнювано з властивостями контрольних зразків, отриманих у кокілі цієї самої проби, але затверділих в умовах відсутності напружень розтягування, тобто без утворення гарячої тріщини, а також зразків, що тверділи при достатньому живленні.

Для вибору оптимальної технології газонасичення було проведено дві серії експериментів з дослідження характеру впливу тривалості ВО і тривалості витримки розплаву після ВО на тріщиностійкість та величину пористості. В обох серіях для газонасичення використовували вологий тампон із мінеральної вати.

У першій серії розплав масою 1700–1800 г газонасичували в плавильному тиглі. При цьому використовувався ливарний дзвіночок із тампоном з мінеральної вати вагою 20 г; вага води становила 25 г. Температура початку газонасичення становила 770 °С, під час газонасичення вона знизилася до 725 °С. Тривалість ВО становила 1,5 хв, а тривалість витримки, у процесі якої проводили відбір розплаву для заливки проби, змінювали від 1,5 хв до 118 хв. Температурі заливки становила близько 730 °С. Величини пористості проби залежно від тривалості ВО та витримки представлено на рис. 1.

У другій серії експериментів проводили водневу обробку розплаву масою 250 г, що відповідало об'єму металу, достатнього для заповнення кокілю проби; вага вати становила 5 г, води — від 5 г до 7 г, тривалість газонасичення — від 5 с до 30 с, а тривалість витримки змінювали від 10 с до 180 с. Вологий тампон закріплювали в кільці з ніхромового дроту, опускали під рівень розплаву в мірному заливному ковшику, зануреному, у свою чергу, в розплав у плавильному тиглі для зменшення падіння температури під час газонасичення. Температура розплаву на початку газонасичення підтримувалася в межах від 760 °С до 780 °С. Після завершення газонасичення заливний ковшик виймали з розплаву печі і витримували на повітрі для охолодження до температури заливки 730 °С.

Пористість зразків розраховували з урахуванням максимальної щільності сплаву. Її визначали при гідростатичному зважуванні виливків, отриманих у спеціальному кокілі із забезпеченням достатнього живлення, [9]. Ті самі виливки використовували для вимірювання міцності та пластичності сплаву, затверділого в умовах достатнього живлення. Партію таких виливків отримували послідовними заливками в один і той самий кокіль, температура якого від заливки до заливки зростала від 20 °С до 180 °С.

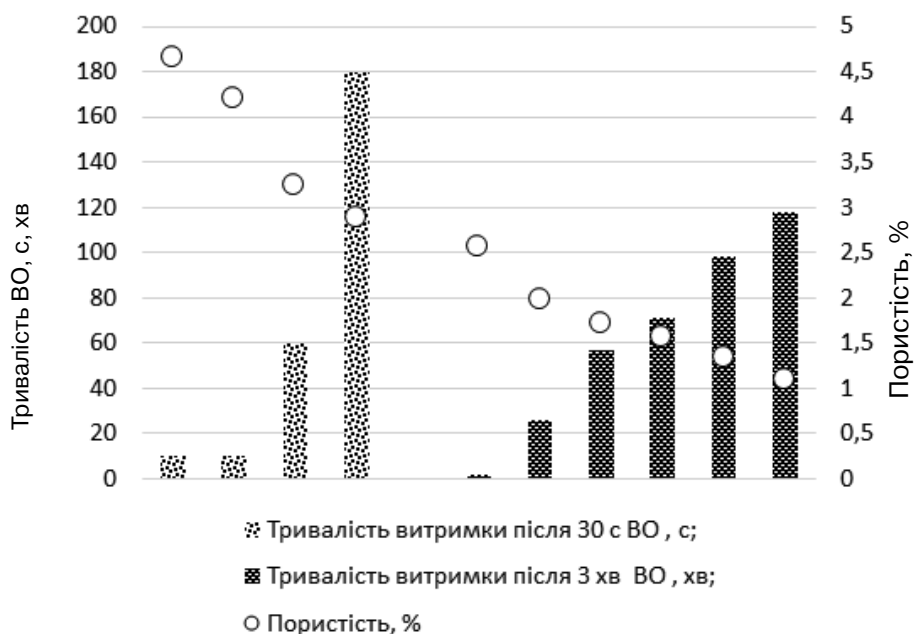


Рис. 1. Вплив тривалості витримки розплаву AM4,5 Кд (ВАЛ10) після ВО впродовж 30 с та ВО впродовж 3 хв на пористість виливків

Результати дослідження

Аналіз отриманих результатів показує, що в процесі витримки газонасиченого розплаву відбувається зниження ступеня його газонасиченості: пересичений у процесі ВО розчин водню розпадається із виділенням газоподібного водню. Як видно з представлених даних (рис. 1), зі зростанням тривалості витримки величина пористості зменшується. Зазначимо, що всі отримані в цих експериментах виливки затверділи з утворенням тріщини, тобто досліджені режими ВО, при яких досягнуто, судячи з величини пористості виливків, значного ступеня газонасичення, виявилися неефективними, а ВО кількох доз розплаву з подальшою витримкою — нетехнологічною через значне падіння рівня газонасичення в часі.

Подальші експерименти, проведені з ВО дози розплаву, достатньої для заповнення проби, ступінь газонасичення регулювалася тривалістю ВО (від 5 с до 30 с). Дані з впливу тривалості ВО та пористості виливка, отримані в подальших експериментах описаної вище другої серії, представлено на рис. 2. На осі абсцис розміщено номери досліджених виливків, над кожним із них — точки, що показують значення тривалості ВО і пористість відповідних виливків. Лінії 1 і 2 визначають діапазон значень пористості виливків із вихідного розплаву без ВО (дані щодо пористості отримано в попередньому дослідженні, [8]).

Як видно з рис. 2, ВО із тривалістю газонасичення в межах від 7 с до 10 с призвело до усунення тріщини. Пористість виливків при цьому складала від 1,84 % до 3,58 %. Слід, однак, відзначити, що усунення тріщини досягнуто лише в 6 виливках із 10, тобто ефективність ВО складала 60 %. Збільшення тривалості газонасичення від 10 с до 30 с супроводжувалося значним збільшенням пористості виливків (її максимальне значення — 4,64 %), але це не сприяло усуненню тріщини. Зниження тривалості від 7 с до 5 с призвело до зменшення пористості; її мінімальне значення складало 1,5 %, що ледве перевищує визначене вище максимальне значення пористості вихідного розплаву — 1,43 % (рис. 2, лінія 1).

Зауважимо, що, незважаючи на явну тенденцію збільшення пористості зі зростанням тривалості газонасичення, чіткої залежності між ними не виявлено. Імовірною причиною цього могла бути як недостатня відтворюваність процесу газонасичення у використаному діапазоні тривалостей газонасичення, що може

бути пов'язано з малою масою розплаву, який наводнювався, — близько 250 г, так і відмінність у тривалості витримки розплаву перед його заливкою (витримка була потрібна для зниження температури розплаву до температури заливки — 730 °C), у різних експериментах вона перебувала в діапазоні від 5 с до 30 с, — звісно, що в процесі витримки газонасиченого розплаву його газовміст знижується.

Оскільки ВО розплаву, підвищуючи тріщиностійкість виливка, одночасно підвищує і її пористість, природно очікувати, що ВО позначиться на зміні міцнісних властивостей, що й було досліджено. Як контрольні було використано виливки із вихідного сплаву, отримані в умовах достатнього живлення, використані для визначення максимальної щільності сплаву.

Як було показано вище, виливок проби на тріщиностійкість твердне в умовах утрудненого живлення, що характерно для більшої частини реальних виливків. Утруднене живлення виливка стає причиною утворення зовнішніх і внутрішніх газоусадкових дефектів — утяжин та пор. Внутрішні газоусадкові дефекти знижують міцність щодо величини міцності зразків, отриманих в умовах достатнього живлення. Як показано вище (рис. 1 і 2), ВО підвищує пористість вихідного металу. Для того щоб розділити внесок умов живлення, зумовлений конструкцією кокілю, та внесок утворення тріщини у величину пористості виливка, відлито й досліджено кілька виливків, отриманих у тому самому кокілі, але при цьому без заплічків у далекому від надливу кінці кокілю. Для цього відповідні порожнини в тілі кокілю було заповнено мінеральною ватою. Цей прийом дозволив як вирішити поставлене завдання, так і виготовити з виливків зразки для випробувань на міцність, оскільки тріщина була відсутня. На рис. 3 представлено дані за величиною міцності виливків залежно від їхньої пористості та наявності ВО розплаву.

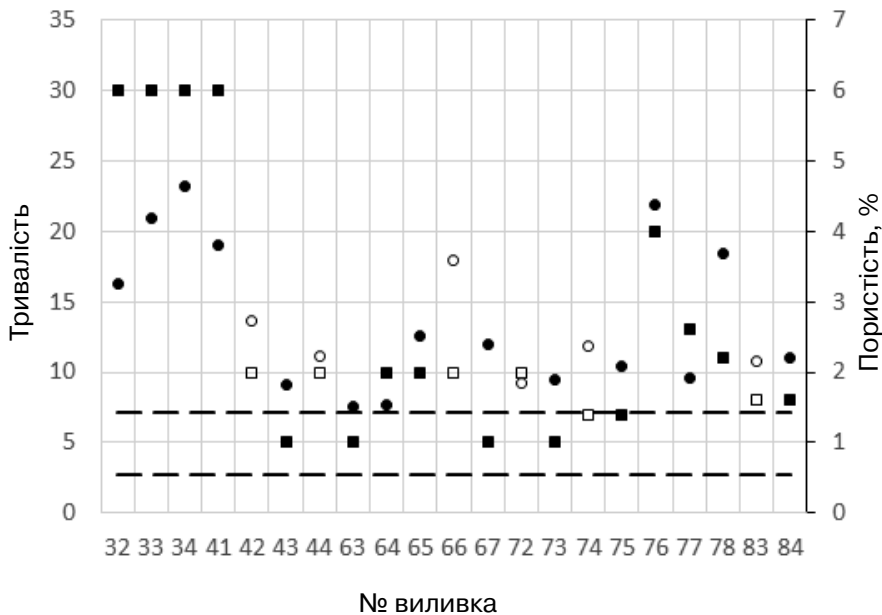


Рис. 2. Тріщиностійкість виливків зі сплаву АМ4,5 Кд (ВАЛ10) залежно від тривалості ВО та пористості: 1, 2, — максимальне та мінімальне значення діапазону пористості виливків без ВО; пористість: ● — виливки з тріщиною; ○ — виливки без тріщини; тривалість ВО: ■ — виливки з тріщиною; □ — виливки без тріщини

Як видно із взаєморозташування точок, відповідних значенням міцності вихідного сплаву у виливках, отриманих із достатнім живленням, максимальні значення міцності не завжди відповідають мінімальній пористості виливка. Причиною цього може бути зміна структури зерна, пов'язана зі зниженням інтенсивності тепловідведення,

Твердіння сплавів

викликаним підвищенням температури кокілю через послідовну заливку серії виливків. Та однак, максимальному значенню пористості, 0,3 %, відповідає мінімальне для даного експерименту значення σ_B — 202 МПа, а максимальному значення σ_B , 270 МПа, — близьке до нульового значення пористості — 0,03 %.

Порівняння величини пористості двох виливків, отриманих без заплічків із вихідного розплаву (вона складала 0,82 % і 0,87 %, рис. 3), із середніми значеннями пористості виливків із тріщинами (отриманих без ВО), яке складає 0,83–0,93 % ([8]), і пористістю зразків з усунутою під дією ВО тріщиною (1,83–3,58%, рис. 3) схиляє до висновку, що ВО погіршує живлення виливки (збільшуючи тим самим її пористість) значно більшою мірою, ніж утворення тріщини.

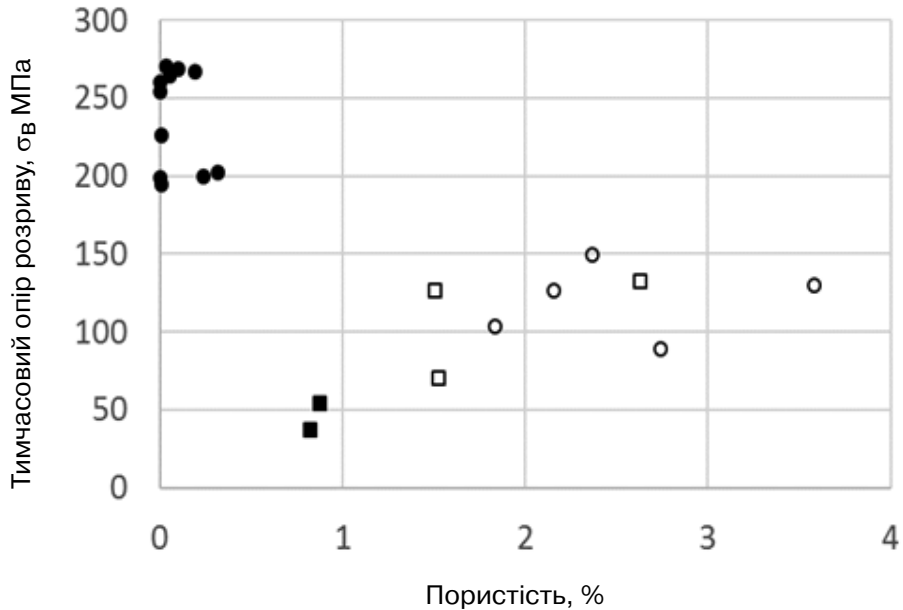


Рис. 3. Залежність між короточасною міцністю сплаву AM4,5 Кд (ВАЛ10) від ВО та умовами живлення: ● — виливки із вихідного сплаву, отримані в умовах достатнього живлення; ○ — виливки проби на тріщиностійкість після ВО; ■ — виливки проби на тріщиностійкість без заплічків із вихідного сплаву; □ — виливок проби на тріщиностійкість без заплічків після ВО

Варто зазначити, що, незважаючи на нижчу, ніж у виливків після ВО пористість, показники міцності виливків без заплічків також нижчі. Так, максимальне значення міцності — 54,5 МПа, тоді як цей показник для виливків після ВО перебуває у межах від 70,1 до 132 МПа. Причина цього — зміна форми пор під впливом ВО. Відомо, що в разі твердіння негазонасиченого розплаву в умовах утрудненого живлення форма газоусадкових пор визначається формою просторів між гілками кристалів, тобто пори можуть мати досить гострі краї, щоб служити концентраторами напружень, тоді як газові пори, які утворюються при твердінні такого виливка у разі використання ВО, мають більш сприятливу в плані порушення властивостей міцності округлу форму. Тому навіть у тому випадку, коли умови твердіння виливка ускладнені, але виключають утворення тріщини (що моделюється пробом без заплічків), міцнісні властивості литого металу в разі використання ВО будуть вищими, що й підтверджують результати даного експерименту.

Цікаво, що відсутність заплічків при використанні ВО суттєво не позначилося ні на величині пористості, ні на величині міцності, значення яких близькі до значень, які показали зразки, виготовлені з виливків проб із заплічками, рис. 3.

Обговорення результатів

Причини зазначеного в цьому дослідженні позитивного впливу ВО на тріщиностійкість певною мірою пояснює механізм, запропонований у роботі [1],

згідно з якою, підвищений вміст водню у розплаві виливка в процесі тверднення викликає т. зв. «передусадкове розширення», тобто збільшення обсягу розплаву під час його охолодження, а потім і у двофазному стані. Газ, що виділяється у виливку до моменту утворення суцільного каркаса, видаляється, а виділення газу після цього моменту викликає розтягнення кристалічного каркаса, що може «перекомпенсувати усадку в певній частині температурного інтервалу твердо-рідкого стану», і чим вищий газовміст розплаву, тим у більш широкій частині інтервалу твердо-рідкого стану розвивається передусадкове розширення і тим нижчою є температура початку лінійної усадки. Якщо ж обсяг газу, який виділяється, недостатній для перекомпенсації усадки, температура початку усадки не знижується, але виділення газу може уповільнювати її розвиток. У результаті обидва фактори (зниження температура початку усадки та уповільнення її розвитку) зменшують величину лінійної усадки, що й призводить до підвищення тріщиностійкості.

Однак такий механізм не можна визнати ні єдино правильним, ні повним.

Незрозумілим залишається те, чому при перекомпенсації усадки за рахунок газовиділення у виливку відбувається рівномірне розтягнення всього кристалічного каркаса, а не його розрив бульбашкою газу на якомусь відрізьку виливка з утворенням тріщини, бо, відповідно до [10], саме такі концентратори напружень, як газові й усадкові раковини та неметалеві включення, сприяють утворенню тріщин.

Для уточнення механізму позитивного впливу газовиділення у виливку на тріщиностійкість можна провести аналогію утворення гарячої тріщини та газоусадкової раковини. Обидва види дефектів виникають у розплаві в умовах напружень, що розтягують.

Як показав Ф.М. Котлярський [11], до розриву розплаву (чи кристалічного каркаса) з утворенням концентрованої раковини призводять розтягуючі напруження, які виникають у виливку в умовах утрудненого чи недостатнього живлення, коли перепад тиску зовні та всередині виливка, потрібний для забезпечення проходу у виливок необхідної кількості живлячої фази, перевищує одну атмосферу, тобто рівень тиску всередині виливка досягає негативних значень. Якщо ж у виливку відбуваються процеси утворення та росту газових бульбашок, то рівень тиску (якщо він і знижується відносно атмосферного), залишається позитивним. При цьому недолік живильної фази компенсується ростом сумарного об'єму газових бульбашок. Рівномірно розподілені в тілі виливка бульбашки створюють тиск у розплаві, який передається в рідині і діє одночасно на всі бульбашки. Завдяки цьому об'єм усіх бульбашок зростає рівномірно, що і виключає розрив рідини (чи утворення тріщини) за рахунок розтягування та зростання будь-якої однієї бульбашки.

Таким чином, у разі тверднення виливка в умовах недостатнього або утрудненого живлення роль ВО в підвищенні тріщиностійкості полягає в збереженні позитивного тиску у виливку, що запобігає розриву розплаву з утворенням тріщини.

Недотримання принципу спрямованості тверднення стає причиною не тільки утрудненого чи недостатнього живлення виливка, а й, унаслідок нерівномірності охолодження за довжиною виливка, спричиняє концентрацію деформацій, яку вважають [4] головною причиною гарячих тріщин. Для підвищення тріщиностійкості виливків у цих умовах розроблено метод «штучного розподілу деформацій» [7], суть якого полягає в наданні шорсткості ливарній формі або формуванні в ній спеціальних заглиблень, у яких тверднуть частини виливка у вигляді стрижнів, що перешкоджають зміщенню виливка у формі під дією лінійної усадки. Унаслідок цього деформації можуть реалізовуватися лише в межах ділянки виливка, обмеженого цими стрижнями, тобто досягається рівномірне розтягування кожної окремої ділянки виливка, що зменшує ступінь розвитку або повністю усуває концентрацію деформацій. Аналіз результатів випробування цього методу в промислових умовах, а саме — повне усунення тріщин, дають змогу зробити висновок, що і позитивний вплив ВО також ґрунтується на рівномірному розподілі деформацій по довжині виливка.

Так, газові бульбашки, які формуються в результаті ВО, виникають і ростуть у

всьому виливку, а не тільки в зоні «концентрації деформацій», що сформувалася через нерівномірність охолодження виливка по довжині. Як і в наведеному вище описі механізму підтримання позитивного тиску у виливку, що твердне в умовах недостатнього або утрудненого живлення за рахунок зростання бульбашок водню, тиск, що створюється бульбашками у виливку, передаючись через рідку фазу, вирівнюється по всій довжині виливка, і його величина в кожному елементарному обсязі цієї зони однакова. Це сприяє рівномірному розсуванню кристалів (описаний вище ефект «передусадкового розширення» під дією усадкових напружень по всій довжині виливка, що зменшує ступінь «концентрації деформацій» та усуває локалізацію розтягування на тій ділянці по довжині виливка, що в даний момент найгарячіша та найпіддатливіша).

Усе ж таки і в разі використання ВО на певному етапі тверднення можливе утворення зони «концентрації деформацій», оскільки міцність каркаса в холодній пристінковій ділянці може перевищити зусилля, що створюють у ній бульбашки газу, і розтягування виливки локалізуватиметься в найгарячішій зоні виливка. У такому разі утворення тріщини можливе, але слід враховувати, що в прилеглих до стінок форми перетинах у процесі тверднення виливка кристалічний каркас втрачає рухливість і вже не може розтягуватися бульбашками газу раніше, ніж в осьових. Мало того, як показано в роботі [1], тріщина може виникати на певній відстані від поверхні, де вже сформувалася кірка повністю затверділого сплаву. Отже, зародження тріщини відбувається саме у зовнішніх шарах, тоді як каркас у глибших шарах виливка, що лежать під холодними зонами, продовжує розтягуватися бульбашками і знижувати цим ступінь концентрації деформацій. Це перешкоджає розвитку тріщини та її просуванню всередину виливка і полегшує її подальше «заліковування».

У результаті спостереження за процесом утворення тріщини на відкритій поверхні виливка за допомогою мікроскопа було встановлено [1], що після утворення тріщини відбувається її заповнення розплавом під впливом капілярних сил, т. зв. «заліковування». Оскільки металографічні дослідження «залікованої» тріщини не виявили відмінностей структури, що сформувалася в ній, від структури сплаву у «здоровій» частині зразка було зроблено висновок про те, що процес «заліковування» тріщини, тобто її заповнення розплавом, який перебуває в міжзеренних просторах, є важливим фактором, що підвищує тріщиностійкість виливка.

Процес «заліковування» відбувається і при виробництві реальних виливків. Для його активізації використовуються технологічні прийоми, що підсилюють надходження у виливок живильної фази, наприклад, збільшення ступеня спрямованості тверднення, збільшення тиску над надливом, використання вібрації.

При цьому роль ВО процесі залікування до нашого часу розглянуто не було.

Зауважимо, що ВО зазвичай збільшує обсяг пористості і може погіршити живлення виливки, тобто зменшити кількість фази, яка надходить у неї. Однак «заліковуванню» тріщини ВО сприяє.

Для того щоб розплав заповнив тріщину, яка росте, необхідно забезпечити достатньо швидке надходження необхідної для «заліковування» тріщини кількості живильної фази. Зрозуміло, що чим меншу відстань повинен для цього пройти розплав, тим більша ймовірність того, що швидкість його надходження виявиться достатньою. Залежно від форми виливка відстань від надливу до металоємного вузла може бути досить великою; водночас газові бульбашки досить рівномірно розподілені в тілі виливка, і, оскільки водень у бульбашці перебуває під тиском, розширення бульбашок при утворенні прилеглої тріщини сприяє перетіканню туди розплаву, що заповнює і «лікує» її. Мало того, у тих випадках, коли виливок твердне в умовах недостатнього або утрудненого живлення (що особливо характерно для сплавів із широким інтервалом тверднення, найбільш схильних до утворення гарячих тріщин), капілярні сили, під дією яких відбувається переміщення розплаву з міжзеренних проміжків у тріщину, діють, але обсяг розплаву в міжзеренних проміжках обмежений і вже не поповнюється живильною фазою з надливу. У такому разі лише зростання газових бульбашок та витіснення ними розплаву з міжзеренних проміжків у тріщину (що відбувається саме за умов проведення ВО) забезпечує «заліковування» тріщини.

У зв'язку з цим виникають такі питання: якщо рівень газонасичення розплаву достатній для «залікування» тріщини (що свідчить про позитивний тиск у розплаві в зоні тріщини), чому він виявився недостатнім для запобігання її виникненню? І чому використання оптимального (для умов експерименту) режиму газонасичення не завжди сприяє усуненню тріщини?

Розглянемо ці питання в рамках запропонованого уточненого механізму впливу на тріщиностійкість. Треба мати на увазі, що вміст водню в розплаві, приготовленому за технологіями, які зазвичай використовуються (навіть без проведення спеціальних операцій зі зниження рівня водню в розплаві, таких як рафінування або вакуумування), недостатній для позитивного впливу на розосередження газоусадкових дефектів і для усунення тріщиноутворення. У результаті ВО рівень вмісту водню підвищується. Зрозуміло, що ступінь підвищення визначається особливостями проведення ВО: як встановлено в процесі роботи, позитивний вплив ВО в умовах експерименту проявляється при тривалості газонасичення від 7 с до 10 с. Причиною того, що приблизно один і той самий рівень газонасичення виявився в низці випадків недостатнім для усунення тріщини, є як розлянуті вище можливі відмінності в рівні газовмісту розплаву перед заливкою проби, так і відмінності в умовах тверднення виливка, що спричинені неврахованими факторами, параметри яких, на відміну від температури форми та розплаву, складно або неможливо контролювати. Ідеться про особливості процесу тверднення виливка, що впливають, за інших рівних умов, на повноту живлення, внаслідок чого величина пористості виливків, отриманих без ВО розплаву, коливається, як показано вище, в діапазоні 0,54–1,43 %, рис. 2.

Оскільки виливок твердне в умовах утрудненого живлення, його плоскі поверхні схильні до утворення утяжини, що, з одного боку, підвищує щільність литого металу, а з іншого — за рахунок локального збільшення повітряного зазору між виливком і формоутворюючою поверхнею кокілю призводить до нерівномірності затвердіння по довжині виливка.

У цьому випадку відмінності у швидкості росту кристалічного каркаса можуть призвести до формування у виливку роз'єднаних зон із меншою кількістю затверділої фази, відокремлених один від одного зонами з розвиненим кристалічним каркасом, що перешкоджає як перетіканню живильної фази, так і передачі тиску. Оскільки міцність цього каркаса може перевищувати силу, що розвивається тиском бульбашок, зазначені зони не тільки самі не беруть участі в розподілі концентрацій напруг, але, відокремлюючи ділянки виливки із менш розвиненим каркасом, перешкоджають зменшенню ступеня концентрації деформацій.

У разі формування роз'єднаних зон, коли їх живлення утруднене або повністю відсутнє, тріщина може бути «залікована» тільки тим розплавом, який міститься в зоні її утворення, що відбудеться лише при достатньому рівні газонасичення, коли тиск бульбашки, яка розширюється, буде перевищувати атмосферний. При нестачі ж водню в розплаві обсяг бульбашок, що розширюються, буде меншим за обсяг тріщини, і «заліковування» не відбудеться.

Таким чином, на ефективність ВО (яка в умовах експерименту складала лише 60 %) впливає не тільки рівень газовмісту розплаву, а й особливості тверднення виливка в кожному окремому експерименті, а саме неоднорідність кристалічного каркаса, що в умовах експерименту викликано наявністю неконтрольованих і некерованих параметрів теплообміну між виливком та формою.

Теза про те, що саме величина газовиділення визначає ступінь протидії передусадкового розширення тріщиноутворенню [1] викликає начебто логічне прагнення до забезпечення максимального газовмісту розплаву. Однак насправді ж слід враховувати, у який саме момент тверднення виливка відбувається передусадкове розширення: так, зростання об'єму бульбашок в рідкому і рідкотвердому стані (що й відбувається при відносно високому газовмісті розплаву) викликає передусадкове розширення, але до моменту початку лінійного усадки воно марне. Мало того, високий газовміст розплаву створює передумови для т. зв. водневого рафінування

розплаву [12], тобто видалення з нього неметалевих включень, що є центрами пороутворення, бульбашками, які виділяються з розплаву вже на стадії заповнення форми і спливають у верхню частину виливка. Чим більша частина розчиненого в розплав газу виділиться в бульбашки до моменту початку лінійної усадки, тим менше його залишиться в розплав на момент початку лінійної усадки, тим меншим буде вплив на тріщиностійкість.

Численні спостереження за твердненням відкритої поверхні виливка (порція газонасиченого розплаву виливалася на плоску незмочувану охолоджувальну поверхню, і товщина зливка визначалася капілярними силами розплаву), відзначали не тільки бурхливе виділення численних бульбашок (газовиділення в розплав) і збільшення обсягу зливка (газовиділення в рідко-твердому стані), але й утворення усадкових тріщин при подальшому твердненні внаслідок опускання розплаву між кристалами до нижньої частини зливка. Причиною цього є те, що капілярні сили, які утримують розплав на верхній поверхні між кристалами, виявилися меншими, ніж напруги, викликані зменшенням об'єму живильної фази, тобто усадкою.

У разі повної компенсації усадки бульбашками, що ростуть, такі напруги не виникли б, а при перекомпенсації рідка фаза могла б видавлюватися на поверхню, що теж було зафіксовано. У реальному виливку при утворенні тріщини — рідка фаза видавлюється бульбашками в тріщину і «заліковує» її.

У випадку надмірно високого газовмісту у виливку відбувається водневе рафінування, і обсяг бульбашок всередині кристалічного каркаса виявляється недостатнім для видавлювання рідкої фази в тріщину. Саме так і пояснюються результати експериментів (рис. 2), згідно з якими збільшення тривалості газонасичення вище 10 с (і до 30 с) значно підвищило пористість виливка, але, незважаючи на це, такий режим ВО виявився неефективним.

Висновки

1. Позитивний вплив ВО на тріщиностійкість зумовлений зростанням бульбашок водню у виливку, що твердне, причому характер цього впливу залежить від умов живлення та стадії тверднення виливка, на якій утворюється тріщина.

2. У разі утрудненого або недостатнього живлення виливка газовиділення перешкоджає переходу тиску у виливку до від'ємних значень, запобігаючи тим розриву кристалічного каркаса з утворенням тріщини.

3. Роль т. зв. «передусадкового розширення», тобто розсування кристалічного каркаса бульбашками газу, у підвищенні тріщиностійкості полягає в зниженні ступеня концентрації деформацій, яка є головною причиною тріщиноутворення при гальмуванні лінійної усадки виливка.

4. Бульбашки водню, що ростуть у зоні утворення тріщини, сприяють її «заліковуванню», видавлюючи розплав із міжзеренних просторів у тріщину.

5. Ефективність ВО як способу зменшення ступеня концентрації деформацій знижується при утворенні у виливку замкнутих об'ємів, розділених кристалічним каркасом; у такому випадку ефект підвищення тріщиностійкості досягається лише «заліковуванням» тріщини.

6. Газовиділення у виливку, що твердне в умовах ускладненого живлення та гальмування лінійної усадки, підвищує не тільки тріщиностійкість, а й міцність литого металу, замінюючи гострокутні усадкові пори, які є концентраторами напружень, округлими роз'єднаними порами. Експериментально доказано, що рівень міцності зразків отриманих із розплаву АМ4,5 Кд (ВАЛ10) після ВО при значному зростанні пористості лежить у діапазоні від 70 до 149 МПа, що значно перевершує показники виливків, отриманих у тому ж кокілі, але без розтягуючих напружень, які утворюють тріщину.

7. Необхідною умовою позитивного впливу ВО розплаву є достатній ступінь газонасичення, що визначається тривалістю газонасичення: так, в умовах експерименту для маси розплаву 250 г при температурі від 760 °С до 780 °С оптимальна тривалість газонасичення становила від 7 до 10 с. Пористість виливків

при цьому лежить у діапазоні 1,52–2,36 %, міцність — від 70 до 149 МПа, що значно перевершує показники виливків, отриманих без ВО розплаву в тому самому кокілі, але без розтягуючих напружень, які утворюють тріщину.

7. Воднева обробка розплаву може бути використана в промислових умовах як дієвий, технологічно простий та відносно дешевий метод підвищення тріщиностійкості виливків.

8. При використанні ВО у виробничих умовах доцільно проводити її не в плавильному агрегаті, а в розливному ковші, уникаючи при цьому надмірного газонасичення розплаву, яке викликає процес водневого рафінування, що знижує ефективність ВО.

Список літератури

- 1 Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. Москва: Наука, 1966. 300 с.
- 2 Новиков И.И. Корольков Г.А. О горячеломкости алюминиевых сплавов при перегреве расплава. *Литейное производство*. 1959. №12. С. 21–22.
- 3 Корольков Г.А., Новиков И.И. Влияние газосодержания расплава на горячеломкость алюминиевых сплавов. *Известия академии наук СССР, ОТН, Metallurgy and топливо*, 1959. №2. С. 19–23.
- 4 Баландин Г.Ф., Каширцев Л.П. Реологические исследования трещиностойкости отливок во время их затвердевания. *Литейное производство*. 1978. № 1. С. 5–8.
- 5 Мориная Т., Минигиши Т., Ватанаба Х. Исследование трещинообразования в отливках из легких сплавов. В кн.: 31-й Международный конгресс литейщиков, Амстердам. 1964. Москва: Машиностроение. 1967. С. 88–93.
- 6 Грузных И.В., Рычков Н.П. Расчет стойкости стальных отливок против образования горячих трещин. *Литейное производство*. 1979. № 8. С. 6–8.
- 7 Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. Москва: Машиностроение, 1981, 200 с.
- 8 Белик В.И., Котлярский Ф.М., Борисов Г.П., Шейгам В.Ю., Семенченко А.И., Дука В.М. Выбор литой заготовки для исследования прочностных свойств алюминиевых сплавов. *Процессы литья*. 2009. № 2. С. 17–24.
- 9 Котлярский Ф.М. Теоретические предпосылки формирования усадочных и газовых дефектов в непропитываемых узлах отливки. *Литейное производство*. 1983. №7. С. 22–24.
- 10 Нехендзи Ю.А. Сталева лиття. Москва: Металургиздат, 1948. 706 с.
- 11 Белик В.И., Дука В.М., Борисов Г.П. Водородное рафинирование при производстве и использовании вторичного алюминиевого сплава. *Процессы литья*. 2010. №5. С. 11–23.

Надійшла 01.10.2023

References

- 1 Novikov I.I. Hot brittleness of non-ferrous metals and alloys. Moskva: Nauka, 1966. 300 p. [in Russian].
- 2 Novikov I.I. Korolkov GA, On the hot brittleness of aluminum alloys during overheating of the melt. *Foundry*. 1959. No. 12. P. 21–22 [in Russian].
- 3 Korolkov G.A., Novikov I.I. Influence of the gas content of the melt on the hot brittleness of aluminum alloys/ Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, OTN, metallurgy and fuel, 1959. No. 2. P. 19–23 [in Russian].

- 4 Balandin G.F., Kashirtsev L.P. Rheological studies of the crack resistance of castings during their solidification, *Foundry*. 1978. No. 1. P. 5–8 [in Russian].
- 5 Morinaga T., Minigishi T., Watanaba H. Investigation of cracking in light alloy castings. In: 31st International Foundry Congress, Amsterdam. 1964. Moskva: Mashinostroenie. 1967. P. 88–93 [in Russian].
- 6 Gruznykh I.V., Rychkov N.P. Calculation of the resistance of steel castings against the formation of hot cracks. *Foundry*. 1979. No. 8. P. 6–8 [in Russian].
- 7 Konstantinov L.S., Trukhov A.P. Stresses, deformations and cracks in castings. Moskva: *Mashinostroenie*, 1981, 200 p. [in Russian].
- 8 Belik V.I., Kotlyarsky F.M., Borisov G.P., Sheigam V.Yu., Semenchenko A.I., Duka V.M. Selection of a cast billet for studying the strength properties of aluminum alloys. *Casting processes*. 2009, No. 2, P. 17–24. [in Russian].
- 9 Nehendzi Yu.A. Staleve litty. Moskva: Metalurgizdat, 1948. 706 p. [in Russian].
- 10 Kotlyarsky F.M. Theoretical prerequisites for the formation of shrinkage and gas defects in non-impregnated casting units. *Foundry*. 1983. No. 7. P. 22–24 [in Russian].
- 11 Belik V.I., Duka V.M., Borisov G.P. - Hydrogen refining in the production and use of secondary aluminum alloy. *Casting processes*. 2010. No. 5. P. 11–23 [in Russian].

Received 01.10.2023

V.I. Bielik, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: belikvi@ukr.net

ORCID 0000-0001-8212-3159

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

PHYSICO-CHEMICAL METHODS OF INCREASING THE CRACK RESISTANCE OF ALLOY AM4.KD (VAL10). NOTICE 3: INFLUENCE OF HYDROGEN TREATMENT OF THE MHL ON CRACK RESISTANCE

The article examines the effect of hydrogen treatment (HW) of AM4.5Kd melt (VAL10) on the tendency of a casting solidified under conditions of inhibition of linear shrinkage, localization of deformations and difficult feeding, to the formation of hot cracks, and a refined mechanism of the positive effect of HW on crack resistance is proposed. In the work, a specially developed test for crack resistance was used, control castings were hardened with the formation of a crack. The complete absence of a crack was considered a positive result of the VO. The heating of the melt was carried out by gassing it with water vapor by submerging a tampon made of wet mineral wool below the level of the melt. The indicators of strength and density of the obtained castings were studied. It was found that under the conditions of the experiment, the efficiency of the BM was 60%, and the strength of the metal of the samples obtained after the BM of the melt exceeded the metal strength of the control samples, as a result of the replacement of the sharp-angled pores formed under conditions of difficult feeding with rounded gas pores. The analysis of the results makes it possible to conclude that the positive effect of hydrogen treatment is achieved due to the prevention of the pressure in the casting from going to negative values with subsequent rupture of the melt and the formation of a crack, reducing the degree of localization of deformations (which is the main reason for the formation of a crack) and curing the crack with a melt that squeezes hydrogen bubbles out of it.

Keywords: crack resistance, hydrogen treatment of the melt, AM4.5Kd alloy (VAL 10).