

УДК: 669.715: 621.74: 669.788

В.І. Белік, 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 АМ4,5КД (ВАЛ10). Повідомлення 2: РОЗРОБКА ПРОБИ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ

Статтю присвячено розробці проби на тріщиностійкість. Як показала спроба використання відомої «кільцевої» проби на тріщиностійкість в умовах експериментів підвищення тріщиностійкості сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) за допомогою водневої обробки розплаву (тобто його газонасичення парами води), оцінка ефективності даного виду впливу за допомогою цієї проби може бути недостовірною через малу чутливість проби. Для усунення цього недоліку та з метою отримання додаткових переваг було розроблено нову пробу, конструкція якої дозволяє моделювати утворення гарячої тріщини в реальних виливках, а саме забезпечити створення концентрації напружень у виливку, що твердне в умовах утрудненого живлення. Виливок являє собою призму із заплічками, при твердінні розплаву в яких виникають напруження, що розтягують. Умови утрудненого живлення створюються за рахунок утеплення середньої частини кокіля. Додатковою перевагою даної проби порівняно з «кільцевою» є можливість виготовлення зразків для вимірювання міцності й пластичності литого металу безпосередньо з тіла виливка проби, а також отримання контрольних зразків, що твердіють у тих самих теплових умовах, але при відсутності напружень, що розтягують. У процесі дослідження встановлено факт залежності впливу площі тріщини, що сформувалася, на опір руйнуванню вигином, причому тріщина з мінімальними (в умовах експерименту) розмірами, площа якої близька до нульового значення, знижує величину руйнівного навантаження в 2,5 разів. Це дозволяє зробити висновок, що не ступінь розвитку тріщини, а тільки її повна відсутність може розцінюватися як факт позитивного впливу на тріщиностійкість сплаву того чи іншого досліджуваного методу фізико-хімічного впливу.

Ключові слова: тріщиностійкість, сплав АМ4,5Кд (ВАЛ10), проба на тріщиностійкість.

Незважаючи на безперервний розвиток ливарних технологій, проблема гарячих тріщин залишається актуальною. При її вирішенні використовуються проби на стійкість до тріщин, конструкції яких надзвичайно різноманітні. Так, у роботі [1], де систематизовано за принципом дії та описано й проаналізовано за результативністю майже чотири десятки різних проб, дано рекомендацію використовувати в дослідженнях алюмінієвих сплавів т. зв. «кільцеву пробу».

Постановка задачі. У ході попередніх експериментів із дослідження тріщиностійкості сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) [2] було виявлено недоліки «кільцевої проби»: недостатня стабільність результатів та низька чутливість до фактора, дія якого на тріщиностійкість вивчалася (а саме водневої обробки (ВО) розплаву), що спричинило потребу розробити пробу, яка б не мала цього недоліку.

Крім того, з урахуванням сучасних уявлень про механізми формування гарячих тріщин конструкція більш досконалої проби повинна забезпечувати умови для утворення т. зв. «концентрації деформацій», яка вважається [3, 4] однією з основних причин утворення гарячої тріщини в реальних виливках і викликана локалізацією лінійної усадки на певній обмеженій ділянці виливка, що розтягується під дією лінійної усадки всього виливка. При цьому проба ще повинна моделювати умови утрудненого

живлення виливка з утворенням газоусадкових дефектів: звісно, що забезпечення повного живлення виливка в реальних промислових процесах складне або навіть неможливе технологічно, а тому й не вигідне економічно. І якщо газоусадкові дефекти не позначаються на експлуатаційних характеристиках, виливок може бути визнаний придатним, тоді як гаряча тріщина може стати причиною браку. Однак сам факт утворення дефектів усадки свідчить про те, що процеси заліковування тріщини розплавом (роль цього фактора у зниженні гарячеламкості докладно досліджено в роботі [1]) у випадку утрудненого живлення ускладнені. До того ж показано [3], що об'єктивна оцінка гарячеламкості за технологічною пробою можлива в разі однобічного розтягування виливка і при повному гальмуванні усадки, що її повинна забезпечувати конструкція кокілю проби.

Мета роботи. Метою роботи є розробка та випробування проби на тріщиностійкість, яка б забезпечувала умови для концентрації деформацій в умовах утрудненого живлення виливка. Крім того, проба має забезпечити можливість виготовлення зразків, за якими можна було б досліджувати міцнісні властивості сплаву в умовах утворення гарячих тріщин, а також — отримання контрольного зразка з досліджуваного сплаву, який би тверднув без розтягуючих напруг, що унеможливує утворення тріщини; при цьому, враховуючи фінансовий аспект досліджень, витрати сплаву на виливок проби мають бути мінімізовані.

Об'єкт та методика дослідження. Виливок розробленої проби являє собою призму із заплічками з обох сторін, при затвердінні яких і формуванні суцільного кристалічного каркаса у виливку усадка повністю гальмується, завдяки чому в середній частині виливка створюються напруження, що розтягують виливок і спричиняють утворення гарячої тріщини. При потребі отримання контрольного виливка, що твердне в теплових умовах проби на тріщиностійкість, але без гальмування лінійної усадки і, відповідно, без утворення тріщини, порожнини кокілю, у яких формуються заплічки, заповнюють мінеральною ватою. Фото виливка з гарячою тріщиною в середній частині представлено на рис. 1, схема пробниці — на рис. 2.

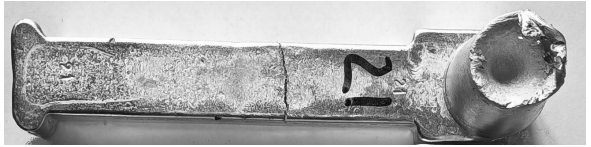


Рис. 1. Фото виливка проби на тріщиностійкість

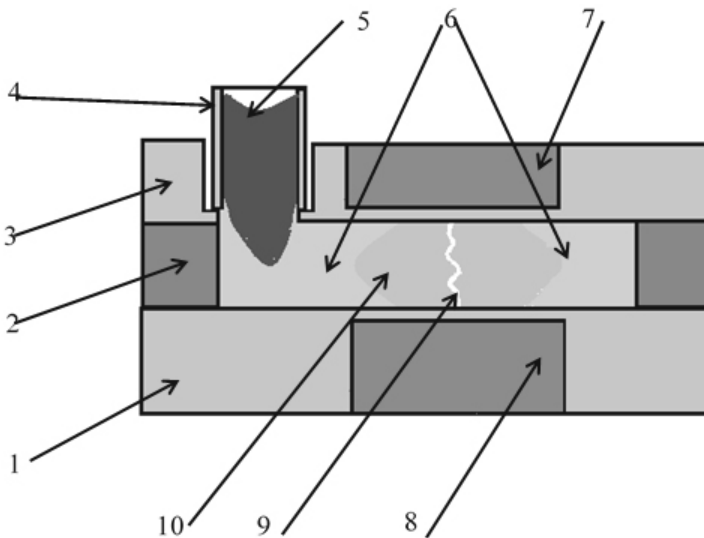


Рис. 2. Схема пробниці для оцінки тріщиностійкості: 1, 2, і 3 — нижня, середня та верхня плити кокілю; 4 — надливкова надставка; 5 — надлив; 6 — затверділі частини виливка; 7, 8 — теплоізоляція; 9 — тріщина; 10 — зона утворення тріщини

Кокіль пробниці (рис. 2) складається з трьох частин 1, 2, 3, виконаних із сірого чавуну, товщина плит — 20 мм. При виборі габаритів виливка керувалися можливістю виготовлення з нього зразка для дослідження міцнісних властивостей при економній витраті розплаву. Довжина виливка, обмежена заплічками, дорівнює 120 мм, переріз трапецевидний, його верхня основа й висота становлять 20 мм, нижня основа — 18 мм.

Тонкостінна надставка надливу 4 служить для заливки кокілю і формує надлив 5, що живить виливок 6. У верхній і нижній частинах кокілю виконані заглиблення 7 і 8, заповнені мінеральною ватою, що забезпечує утеплення зон виливка, які примикають до них. Такі самі заглиблення виконані й у середній частині кокілю на бічних поверхнях.

Утеплення кокілю необхідне як для створення утруднених умов живлення, так і для забезпечення «концентрації деформацій».

Під час відпрацювання даної методики було встановлено, що без наявності такого утеплення, навіть при зменшенні товщини стінки кокілю в даних зонах до 5 мм та утепленні, виливок тверднув без утворення тріщини. У використаному для досліджень варіанті проби товщина стінки в зонах утеплення становить 3 мм.

Додатковою перевагою конструкції цієї проби є можливість коригувати умови живлення (що може бути корисним при роботі зі сплавами з різною схильністю до гарячеламкості) за рахунок підвищення чи зниження ефективності роботи надливу шляхом утеплення надставки надливу чи створенням повітряного тиску над надливом. Ступінь локалізації деформацій також можна змінювати. Як видно зі схеми на рис. 2, поглиблення, що формує зону утеплення в нижній плиті, розташоване прямо під зоною утеплення верхньої плити, ближче до правого краю нижньої плити. При повороті нижньої плити навколо вертикальної осі на 180° виїмка зміщується до лівої сторони кокілю, таким чином, загальна зона утеплення виливка збільшується по довжині, але верхня й нижня зони тепер не збігаються, утворюються дві зони утеплення, ближче до надливкової частини та ближче до далекого від надливу торця виливка. Розподіл утеплення по довжині виливка зменшує ступінь описаної вище концентрації деформацій у кожній із зон. Саме таке розташування нижньої плити було використано при проведенні експериментів. Установлено, що утворення тріщини відбувалося в половині випадків у кожній із зон. Відстань від надливу до тріщин у ближній та дальній від надливу зонах перебувала в діапазонах 46–52 мм та 66–80 мм.

Оскільки в роботі з вивчення впливу фізико-хімічних методів на тріщиностійкість сплаву АМ4,5кд (вал 10) передбачається дослідження різних методів підвищення стійкості сплаву до утворення гарячих тріщин, кожний із яких може впливати на процес живлення виливка, для аналізу результатів впливу необхідно знати величину пористості виливків проби, отриманих із вихідного розплаву. Щільність зразків заміряли шляхом гідростатичного зважування після відрізки надливу. Пористість зразків розраховували з урахуванням максимальної щільності сплаву, для визначення якої відливали спеціальні зразки із забезпеченням достатнього живлення виливка [5], партію яких отримували послідовними заливками в один і той самий кокіль, температура якого від заливки до заливки зростала від 20°C до 180°C .

Результати дослідження та їх обговорення.

Максимальне значення пористості виливка проби, отримане в експериментах, — 1,43 %, мінімальне — 0,54 %. При цьому в 13 випадках із 18, тобто в 72 %, значення пористості перебувають у діапазоні від 0,75 % до 1 %, що його прийнято як діапазон контрольних значень для виливків із вихідного розплаву. Велика різниця між максимальним та мінімальним значенням пористості пояснюється дією таких погано відтворюваних факторів, як швидкість заливки кокілю, утворення утяжини й тріщини.

Оскільки конструкція кокілю не виключає утворення утяжин (що може ставатися в умовах утрудненого живлення), чому в даному випадку сприяють плоскі поверхні виливка, то частина усадки може реалізуватися у вигляді утяжини, що збільшує щільність литого металу. Непередбачуваність утворення утяжини разом із формуванням тріщини, яке також впливає на процес живлення, призводить до

зазначеного вище розкиду значень пористості виливка при практично однаковій температурі розплаву (від 725 °С до 735 °С), що заливається, та стабільній початковій температурі кокілю, що становила від 20 °С до 25 °С.

Оскільки утворення тріщини також може підвищити пористість за рахунок зменшення перетину живлення, проведено оцінку значущості цього фактора.

На рис. 3 представлено залежність пористості виливка від площі тріщини та місця її локалізації.

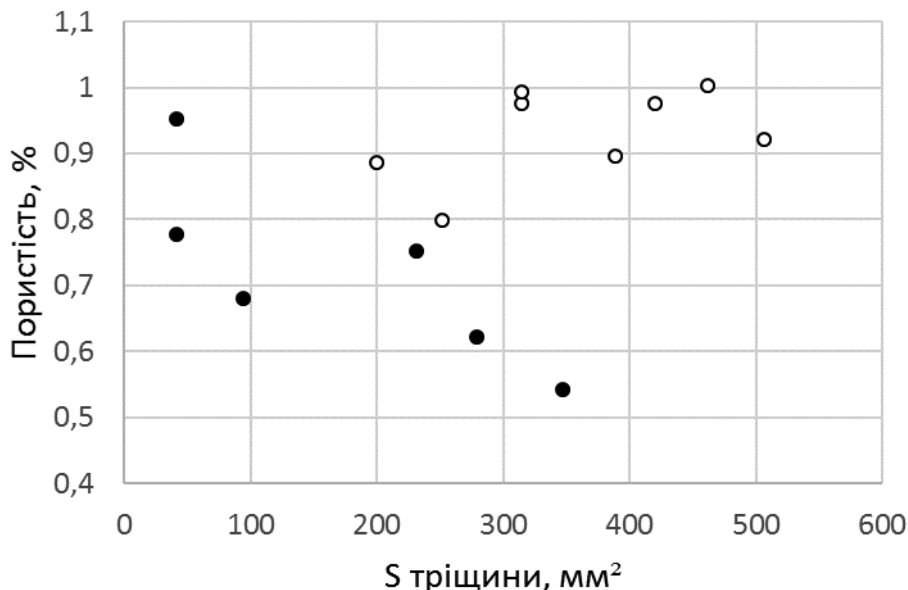


Рис. 3. Залежність пористості виливка від площі тріщини та місця її локалізації: відстань від надливу до тріщин: ○ — 46–52 мм; ● — 66–80 мм

Якщо позначити дві зафіксовані в експерименті зони утворення тріщини як зону № 1 (відстань від надливкової частини виливка до тріщини 46–52 мм) і зону № 2 (відстань від надливкової частини виливка до тріщини 66–80 мм), то можна помітити, що на рис. 3 точки значень пористості, що відповідають першій зоні, загалом лежать вище, ніж точки другої зони. Справді, середні величини пористості, відповідно, становлять 0,93 % і 0,83 %. Оскільки утворення тріщини зменшує живильний переріз, чим більша частина виливка буде відділена від вузла живлення тріщиною, тим сильніше це позначиться на зростанні пористості. Що ж до впливу ступеня розвитку тріщини, вираженого в її площі, на живлення виливка, то очікувана залежність, судячи з розташування точок на рис. 3, відсутня, оскільки процеси живлення та формування тріщини не повністю збігаються у часі. Відомо, що гаряча тріщина в разі збереження напружень після зниження температури виливка нижче солідусу може продовжувати розвиватися як холодна, і тим більшою мірою, чим пізнішим є момент вилучення виливка з кокілю. Тривалість витримки виливка в кокілі на початок виймання фіксована і становила 60 с, а тривалість подальшого процесу вилучення виливка змінювалася в широких межах (від 20 с до 120 с і більше), що й визначало відмінність ступеня розвитку тріщини (її ширину й площу) в різних експериментах. Помітне ж на рис. 3 перевищення площі тріщин у першій зоні над другою можна пояснити збільшенням тривалості затвердіння в перерізах виливка при наближенні до надливу: це збільшує можливість розвитку тріщини як на пізніх стадіях затвердіння виливка (що вже мало позначається на його живленні), так і при розвитку холодної тріщини.

Наведені міркування пояснюють неможливість використання ступеня розвитку тріщини виливка проби як критерію кількісної оцінки тріщиностійкості досліджуваного сплаву.

Дослідження впливу ступеня розвитку тріщини на властивості литого металу виявилися значно результативнішими. Зразки з тріщиною і контрольні зразки без тріщини піддавали навантаженню на вигин на випробувальній машині UTM-100; базова відстань (відстань між опорами) становила 50 мм. Зразок встановлювали тріщиною вниз, навантаження прикладали до верхньої поверхні безпосередньо над тріщиною. Заміряли величину максимального навантаження, при досягненні якої починало зменшуватися зусилля, необхідне для згинання зразка, тобто відбувалося його руйнування. Як параметр, що визначає ступінь розвитку тріщини, використовували площу тріщини в перерізі зразка, яку попередньо розраховували по довжині тріщин на поверхні виливка. Зрозуміло, що такий розрахунок може дати лише наближене уявлення про справжню величину площі тріщини, оскільки тріщина не лежить не тільки в площині, перпендикулярній осі зразка (що виключає можливість розрахунку її відсоткового відношення стосовно площі перерізу зразка), а й узагалі не є площиною: поверхня тріщини і викривлена, і утворена поверхнями окремих кристалітів, проте результати, представлені на рис. 4, дають змогу зробити висновки, корисні при оцінці можливостей розробленої проби на тріщиностійкість.

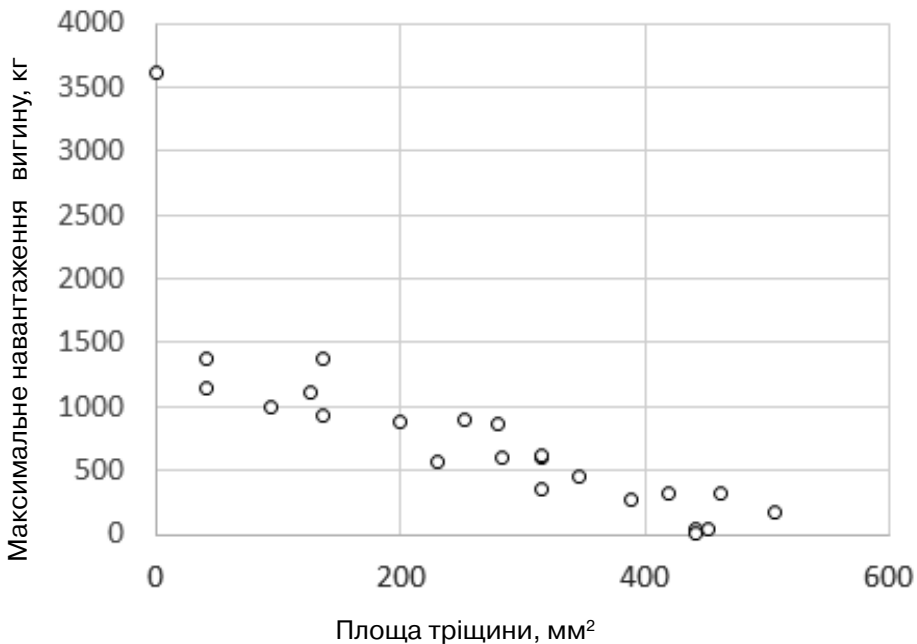


Рис. 4. Залежність максимального навантаження вигину від площі тріщини

Судячи з характеру розташування точок, навіть найменша тріщина, площа якої близька до нульових значень, відіграє роль концентратора напруження та істотно знижує міцність виливка: так, у нашому випадку величина навантаження, при якій відбувається руйнування зразка, знижується від 3600 (при повній відсутності тріщини) до менше ніж 1500 кг.

Висновки

Отримані результати дозволяють виснувати, що розроблену пробу можна використовувати для якісної оцінки тріщиностійкості сплаву, що є достатнім для оцінки факторів підвищення тріщиностійкості, які плануються дослідити: їх вплив буде вважатися позитивним тільки у випадку повного усунення тріщини, бо вже найменша тріщина значно знижує міцність виливка.

Список літератури

- 1 Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. Москва: Наука, 1966. 300 с.
- 2 Белік В.І. Фізико-хімічні методи підвищення тріщиностійкості сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10). Повідомлення 1: досвід використання кільцевої проби. *Процеси лиття*. 2023. № 2 (152). С. 24–32.
- 3 Баландин Г.Ф., Каширцев Л.П. Реологические исследования трещиноустойчивости отливок во время их затвердевания. *Литейное производство*. 1978. № 1. С. 5–8.
- 4 Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. Москва: Машиностроение, 1981, 199 с.
- 5 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.

Надійшла 25.07.2023

References

- 1 Novikov I.I. Hot brittleness of non-ferrous metals and alloys. Moskva: Nauka, 1966, 300 p. [in Russian].
- 2 Belik V.I. Physico-chemical methods of increasing the crack resistance of AM4.5Kd alloy (VAL10). Message 1: the experience of using the ring sample. *Casting processes*. 2023, Vol. 2 (152), P. 24–32 [in Ukrainian].
- 3 Balandin G.F., Stepanov Yu.A. Rheological studies of the crack resistance of castings during their solidification. *Foundry*. 1978. No 1. P. 5–8 [in Russian].
- 4 Konstantinov L.S., Trukhov A.P. Stresses, deformations and cracks in castings. Moskva: Mashinostroenie, 1981. 199 p. [in Russian].
- 5 Belik V.I., Kotlyarsky F.M., Borisov G.P., Sheigam V.Yu., Semenchchenko 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].

Received 25.07.2023

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8212-3159>

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

PHYSICO-CHEMICAL METHODS OF INCREASING THE CRACKING RESISTANCE OF ALLOY AM4.5KD (VAL10). NOTICE 2: DEVELOPMENT OF THE CRACK RESISTANCE TEST

The article is devoted to the development of a test for crack resistance.

As the attempt to use the well-known "ring" test for crack resistance in the conditions of experiments to increase the crack resistance of the AM4.5Kd alloy (VAL10) using hydrogen treatment of the melt (that is, its gas saturation with water vapor) showed, the evaluation of the effectiveness of this type of impact with the help of this test may be unreliable due to low sensitivity of the sample. To eliminate this shortcoming and to obtain additional advantages, a new sample was developed, the design of which allows simulating the formation of a hot crack in real castings, namely, to ensure the creation of stress concentration in the casting, which hardens under conditions of difficult feeding. The casting is a prism with shoulders, in which tensile stresses arise when the melt solidifies. Dif-

ficult feeding conditions are created due to insulation of the middle part of the mold. An additional advantage of this sample compared to the "ring" one is the possibility of making samples for measuring the strength and plasticity of the cast metal directly from the body of the casting, as well as obtaining control samples that harden under the same thermal conditions, but in the absence of tensile stresses. In the course of research, it was established the existence of a dependence of the effect of the area of the formed crack on the resistance to bending failure, and a crack with minimal (in the experimental conditions) dimensions, the area of which is close to zero, reduces the value of the destructive load by 2.5 times, which leads to the conclusion, that not the degree of crack development, but only its complete absence can be regarded as a fact of positive influence on the crack resistance of the alloy of this or that investigated method of physical and chemical influence.

Keywords: crack resistance, AM4.5Kd alloy (VAL10), crack resistance test.