

вкраплень кулястого графіту із щільністю розподілу  $>1200$  шт/мм<sup>2</sup>, металевій основи із тонкопластинчастого перліту (Pd0,3) і дрібнозернистого фериту (7...9 бал), що сприяє покращенню якості та підвищенню механічних властивостей литих виробів.

Застосування графітизувального модифікування у ливарній формі після ковшового сфероїдувального модифікування усуває відбіл тонкостінних виливків, підвищує ступінь сфероїдування графіту та щільність розподілу його вкраплень у металевій основі. Ці структурні зміни сприяють зменшенню усадки, зниженню твердості, підвищенню пластичності, поліпшенню оброблюваності різанням та забезпечують підвищення механічних властивостей виливків з високоміцного чавуну до рівня, який досягається у традиційних технологіях застосуванням термічного оброблення.

**Белік В.І., Пригунова А.Г., Шейгам В.Ю., Бабюк В.Д., Житков Є.А.**  
*(ФТІМС НАН України, Київ)*

**ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СПЛАВУ АМ4,5Кд (ВАЛ10)  
ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ ВПЛИВАМИ НА РОЗПЛАВ**

E-mail: belikvi@ukr.net

Для запобігання утворенню гарячих тріщин, які є поширеною причиною браку при виробництві фасонних виливків із широкоінтервальних алюмінієвих сплавів, використовуються різні технологічні прийоми.

Досліджено вплив фізико-хімічних методів обробки розплаву на тріщиностійкість виливків, у тому числі: модифікування алюмінієво-титановою лігатурою у перерахунку на 0,15 % титану, отриманою з високою швидкістю охолодження; вібрації розплаву в процесі тверднення; водневої обробки розплаву шляхом продування парою води та обробки розплаву перед заливкою ротором, що обертається та охолоджує. Схильність сплаву до утворення тріщини оцінювали по спеціально розробленій пробі, що затверділа в чавунному кокілі. Вона являє собою виливок у вигляді стрижня з заплічками (рис. 1).



Рис. 1. Фото виливка проби на тріщиностійкість

Після утворення кристалічного каркасу та тверднення заплічків у виливку створюються напруження, що викликають появу гарячої тріщини. Всі виливки з вихідного розплаву тверділи з утворенням тріщини. У якості контрольних зразків для порівняння міцності та пластичності використано виливки, що тверднуть у тому ж кокілі, за аналогічних умов живлення, але без утворення тріщини, бо отримані без заплічків. Для цього відповідні порожнини кокілю заповнювали мінеральною ватою.

Вплив вібрації на тріщиностійкість здійснювали закріпленням кокілю проби на платформі (рис. 2), що вібривала з постійною в кожному експерименті амплітудою 0,2 мм і частотою в діапазоні від 4 Гц до 32 Гц. Вібрацію проби починали перед заливанням розплаву і закінчували через 1 хв після закінчення заливання. Температура розплаву, що заливали, складала 730 °С.

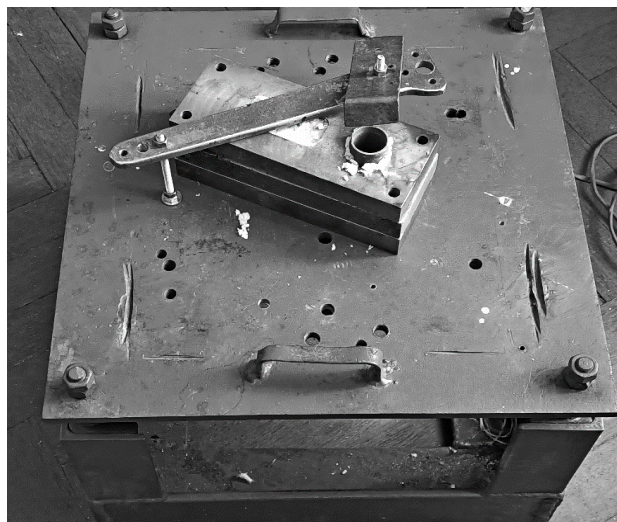


Рис. 2. Вібраційна платформа із встановленим кокілем проби на тріщиностійкість

Вплив модифікування титаном та цирконієм досліджували введенням до розплаву високооохолоджених ( $V_{\text{охол}} \geq 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) лігатур AlTi5, AlZr10, одержаних на установці, описаній в [1]. Лігатури розплавляли в електричній печі опору СШОЛ-1,5 при температурі 750 °С, заливали в нагріту до 700 °С приймальну вирву із вогнетривкої кераміки низької теплопровідності, через яку розплав потрапляв на мідний диск, що обертався із швидкістю до 3000 об/хв. У процесі його високошвидкісного охолодження отримували металеві переривисті стрічки товщиною від 100 мкм до 500 мкм.

Модифікування проводили в заливальному ковші, зануреному в розплав для запобігання зниженню температури. Кількість лігатур, введених до розплаву, у перерахунку на чисті метали складала відповідно 0,15 % титану, 0,25 і 0,05 % цирконію.

Обробку розплаву ротором [2], що обертався із швидкістю 800 об./хв. та охолоджував розплав, проводили у заливальному ковші, встановленому в обічайку, утеплену мінеральною ватою. Обробку розплаву ротором починали при температурі 685 °С. У процесі обробки температура розплаву знижувалася до 660 °С, після чого його заливали у кокіль проби на тріщиностійкість. Як контрольні зразки при температурі 660 °С було одержано два виливки без обробки розплаву ротором.

Водневу обробку здійснювали продуванням розплаву парами води за методикою, детально описаною в [3].

Ефективність кожного методу визначали за відсотком відношення кількості виливків без тріщини до загальної кількості виливків, одержаних з використанням вище означених методів фізико-хімічного впливу. Отримані дані представлено на рис.3.

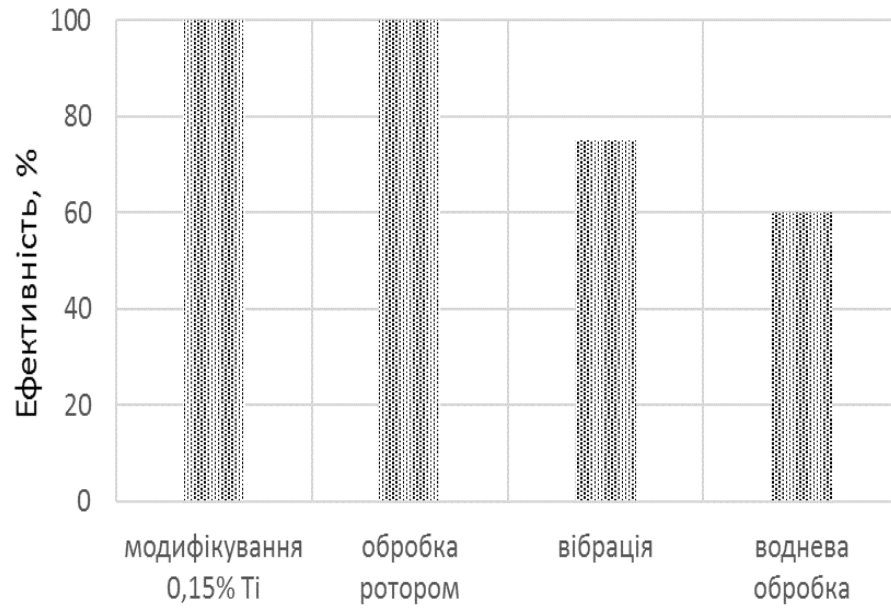


Рис. 3. Ефективність фізико-хімічних методів підвищення тріщиностійкості сплаву AM4,5Кд (ВАЛ10)

На рис. 4 наведено середні показники для міцності, пластичності і пористості одержаних виливків, отриманих з використанням вище розглянутих методів впливу на розплав, та двох видів контрольних зразків з вихідного сплаву, що не піддавалися додатковому обробленню.

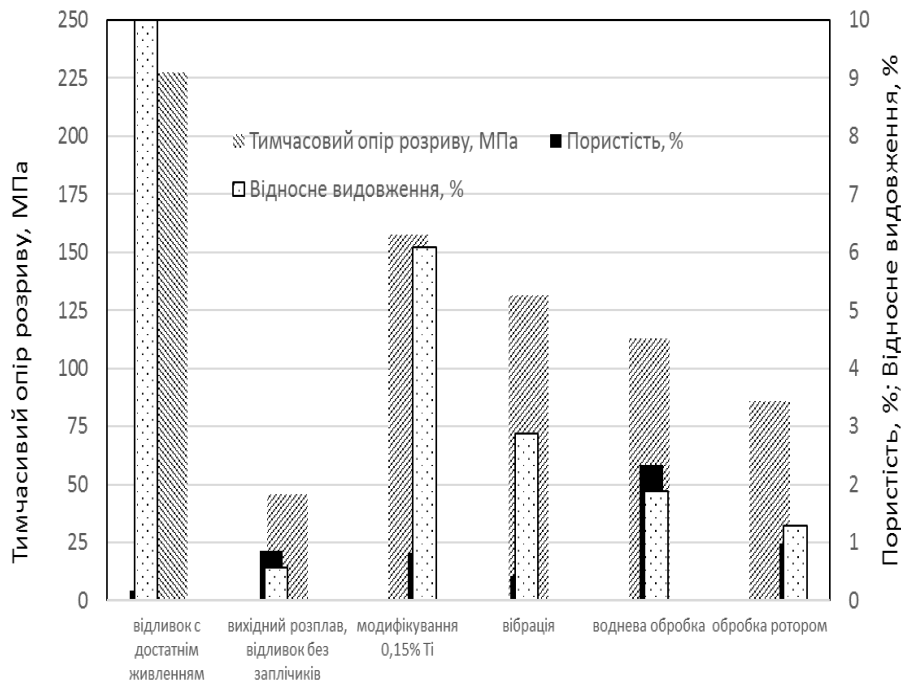


Рис. 4. Міцність, пластичність і пористість металу вилівка в залежності від методу підвищення тріщиностійкості

Зокрема, це максимально можливі в умовах експерименту для даного сплаву значення міцності та пластичності при мінімальних значеннях пористості (тверднення виливків у кокілі, що забезпечує достатнє живлення вилівка), а також дані, отримані на виливках, відлитої у кокіль проби на тріщиностійкість, порожнини заплічків якого були заповнені мінеральною ватою, тому ці виливки затверділи без утворення тріщини.

Максимальну міцність та пластичність при мінімальній пористості показали виливки, отримані в кокілі з достатнім живленням. Виливки, що затверділи в пробі на тріщиностійкість без заплічків, мають низьку міцність та пластичність, що викликано не тільки високим значенням пористості через утруднене живлення вилівка, але й гострокутною формою газоусадкових дефектів: міждендритна пористість формується в утруднених умовах живлення і відіграє роль надрізів, концентраторів напружень, що значно знижує механічні властивості.

Модифікування титаном забезпечує 100-відсоткову ефективність тріщиностійкості та найвищий серед інших методів рівень міцності та пластичності. Проте він нижчий, ніж у виливків з достатнім живленням, бо рівень пористості практично не змінився.

Стовідсоткову ефективність показала і роторна обробка розплаву. Однак при цьому пористість перевищувала показник для контрольної вилівка без заплічків, за рахунок чого міцність та пластичність мінімальні серед усіх використаних методів. Ще одна можлива причина низьких показників міцності та пластичності – зміни структури під впливом даного виду обробки розплаву: зерна стають більш компактними, площа дотику гілок окремих дендритів зменшується.

Ефективність вібрації становить 75 %. Це пов'язано з поліпшенням живлення вилівка та посиленням процесу заліковування тріщин. Трохи менша ефективність при водневій обробці, при значному зростанні пористості порівняно з контрольними виливками, що обумовлено очікуваним ефектом заміни гострокутної міждендритної пористості, яка формується в умовах утрудненого живлення, округлими роз'єднаними порами.

Судячи з отриманих результатів, найбільш дієвим та технологічно простим методом підвищення тріщиностійкості виливків зі сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) є модифікування розплаву швидкоохолодженою дрібнокристалічною алюмінієво-титановою лігатурою.

За відсутності необхідного рівня якості виливків після модифікування, що можливе при отриманні фасонних виливків складної конфігурації із утрудненим живленням, яке супроводжується утворенням значних газоусадкових дефектів, доцільно додатково провести водневу обробку розплаву.

Модифікування дрібнокристалічними лігатурами, оброблення розплаву воднем і комбінація цих способів ефективні як при кокільному литті, так і при литті в піщані форми.

Використання вібрації можливе і раціональне лише за наявності спеціального обладнання, що тим складніше, чим більші маса і габарити виливка. Недоліком цього способу є неможливість його реалізації при литті в піщані форми.

Обробка розплаву ротором, що обертається, має високу ефективність, але може бути застосовна лише у разі низьких вимог до механічних властивостей литва і лише для виливків нескладної геометрії, оскільки вимагає значного зниження температури заливання, що негативно позначається на процесі заповнення форми металом.

Отримані результати дозволяють здійснити обґрунтований вибір способів підвищення тріщиностійкості алюмінієвих виливків з урахуванням умов виробництва.

#### Література:

1. Пригунова А.Г. Управління структурою і властивостями ливарного алюмінієвого сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) модифікуванням дрібнокристалічними лігатурами / А.Г. Пригунова, Є.А. Жидков, В.Д. Бабюк, Л.К. Шеневідько, Т.Г. Цір // Металознавство та обробка металів. – 2022. – т. 28 (103). -№ 3. – С. 3-17.
2. Головаченко В.П. Особливості тиксоформінгу високоміцного алюмінієвого сплаву ВАЛ10 в умовах імпульсного пресування / А.Г. Пригунова,

Л.К. Шеневідько, Н.П. Ісайчева, М.В. Кошелєв, А.Г. Вернидуб // Процеси лиття. – 2022. – № 2 (148). – С.3–11.

3. Бєлік В.І. Фізико-хімічні методи підвищення тріщиностійкості сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10). Повідомлення 3: Вплив водневої обробки на тріщиностійкість // Процеси лиття. – 2023. – № 4 (154). – С. 3–24.

**Бродовий О.В., Дорошенко В.С.**  
**(ФТІМС НАН України, Київ)**

**ТЕСТУВАННЯ 3D-ПРИНТЕРА ДЛЯ ДРУКУ ЛИВАРНИХ МОДЕЛЕЙ ЗІ  
СПРЯМОВАНОЮ ПОРИСТІСТЮ**

**E-mail: doro55v@gmail.com**

Цифровізація та автоматизація сьогодні стали вже не просто основою конкурентної переваги при виробництві товарів (робіт, послуг), у багатьох сферах вони сприймаються як необхідна умова організації виробничих процесів [1]. Зокрема, завдяки цифровізації та автоматизації ливарного виробництва в Україні є можливість створення потужного потенціалу, що сприятиме відновленню країни.

3D-друк з цифрових креслень ливарних моделей для лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес), проектували в концепції [2] друку моделей з серцевиною їх стінок у вигляді суцільних сот-вентканалів, що проходять по всьому тілу моделі по ходу поступової газифікації моделі металом, що заповнює форму. Верхня частина моделей друкується у вигляді трубчастих випорів чи надливів, які повністю знаходяться в вакуумованому піску форми і в які бажано виводити гази з усіх вентканалів. Зверху ці випори чи надливи накриваються газопроникним матеріалом, що не пропускає пісок. Таким чином отримується вакуумована піщана форма з друкованою моделлю, вентканали якої створюють суцільну спрямовану пористість (переважно знизу вгору) по ходу течії металу, а до верхніх отворів цих каналів у вигляді випорів чи надливів підведено вакуум з піску ливарної форми. Якщо традиційна модель з пінополістиролу газонепроникна, має закриті пори і метал випаровує хаотично орієнтовані стінки-оболонки цих пор, то друком отримують відкриті пори заданої орієнтації для суцільної вентиляції і