

Серед великого різноманіття технічних рішень з питань модернізації та автоматизації виробничих процесів та обладнання пневматика займає особливе місце і з кожним днем все більша кількість фахівців використовує її в своїй діяльності.

Література:

1. Невлюдов І. Ш. Трансфер технологій у сучасній науці, освіті та виробництві в умовах четвертої промислової революції «ІНДУСТРІЯ 4.0» / І. Ш. Невлюдов, О. О. Чала, Ю. М. Олександров // Сучасний рух науки: тези доп. VIII міжнародної науково-практичної інтернетконференції, 3-4 жовтня 2019 р. – Дніпро, 2019. – Т.2 С.: 604-608
2. <https://prominstal.com.ua/blog/shho-take-bezshtokovi-pnevmosylyndry-ta-dlya-chogo-vykorystovuyutsya/> – офіційний сайт приватного підприємства «ПРОМІНСТАЛ».
3. <https://hydromarket.com.ua/ua/a462012-pnevmaticheskoe-upravlenie-pnevmosistemy.html> – адреса сайту «Hydromarket» .

**Дорошенко В.С., Клименко С.І.**  
**(ФТІМС НАН України, м. Київ)**

**ТОНКОСТІННІ ВИЛИВКИ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ЗА  
МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ**

E-mail: doro55v@gmail.com

Лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), має значні переваги над традиційними ливарними процесами, але досі має низькі показники щодо поширення та комерціалізації [1]. ЛГМ-процес найбільш ефективний для виробництва формоутворюючої оснастки, інструментів для виготовлення прототипів, запчастин, разового чи дрібносерійного ливарного виробництва.

Профінансовані Міністерством енергетики США (DOE) дослідження довели, що порівняно з поширеними методами лиття ЛГМ забезпечує 25–30%

економії енергії, 46% економії трудовитрат, на 7% менше використання матеріалів і зниження собівартості продукції на 20–25% [1]. У порівнянні з традиційними процесами утворюється менше твердих відходів, а також менше викидів твердих частинок у повітря та парникових газів. Це перевага полягає в тому, що за належної конструкції ливникової системи вихід придатного литва при ЛГМ становить понад 70%, а вихід понад 80% є можливим [1].

Недавнє дослідження, фінансоване Міністерством економіки США щодо виготовлення тонкостінного високоміцного чавуну (ТСВЧ) (thin-walled ductile iron, TWDI), показало, що навіть при 1 мм допуск на розмір литої стінки чавуну становив  $\pm 0,039$  мм [1, 2]. Ця ключова перевага означає, що ЛГМ-виливки можна отримувати з нульовою або мінімальною механічною обробкою металу. З належним перепроєктуванням литих металоконструкцій це може призвести до значної економії коштів, яка компенсує дещо вищу вартість серійного процесу порівняно з литтям у форми по-сирому чи з холоднотвердної піщано-смоляної суміші – ХТС (nobake) [1]. Для легковагих металоконструкцій рекомендовано застосування ВЧ, оскільки він має сприятливу для цього питому міцність (на одиницю вартості), особливо це ще більш значуще для його термічно обробленого варіанту (ADI).

Висновки з досліджень [2], що тривали кілька років, отримано такі. Оскільки стандарти паливної ефективності (SAFE) зростають у всьому світі, попит на полегшення транспортних засобів не втрачає актуальності. Крім того, вага електромобілів безпосередньо впливає на запас ходу і розмір їх батареї. У зменшенні ваги також зацікавлені і в інших транспортних галузях. У сільському господарстві є стурбованість щодо ущільнення ґрунту. У оборонній та аерокосмічній сферах триває конкуренція як щодо маневреності, так і корисного навантаження.

Оскільки попит на легковагі металовироби триває і навіть зростає, ВЧ та ізотермічно загартований – ADI все частіше беруть до уваги. Старі вказівки про уникнення використання ВЧ з товщиною стінки нижче 0,25 дюйма (6,35 мм) не слід більше застосовувати [2], доступні різні технологічні варіанти отримання ВЧ

залежно від вимог до конструкції. Як було показано [2], усунути отримання дефектів від утворення карбідів можна як при ливарній технології повале, так і ЛГМ. Однак, оскільки ЛГМ може забезпечити вищу точність (tolerances) виливків, цей процес має переваги для виробництва ТСВЧ. Приклад вилитих при ЛГМ зразків товщиною 1-6 мм, довжиною до 150 мм показано на рис. 1 [2].



Рис. 1. Виливок з пробами за ЛГМ-процесом перед видаленням покриття

ЛГМ також дає додаткові можливості зменшення маси литва через здатність консолідувати деталі та виключати механічну обробку та зварювання. ВЧ та ADI використовується для деталей широкої номенклатури, включно для колінчастих та розподільних валів, тяг, важелів підвіски, компонентів гальм, насосів, кронштейнів, підйомних важелів, деталей підвіски тощо. Можливість об'єднання TWDI з ЛГМ означає поширення нових типів консолідованих деталей у майбутньому [2].

За нашими дослідженнями при виливанні з ВЧ за ЛГМ процесом у вакуумовані форми тонкостінних деталей спостерігається такі специфічні явища. Зі стінкою товщиною 3-4 мм в рази збільшується площа поверхні тонкостінних виливків проти деталей зі стінкою 8-10 мм і вище. При цьому різко зростає вплив поверхневих явищ на процес заповнення форми, зменшується відношення маси

моделі (і матеріалу для газифікації) до площі стінок форми, які цю модель оточують. Розплав металу, що заливається у вакуумовану форму, торкаючись стінок форми, миттєво до них присмоктується вакуумом, утворюючи металеву плівку, що герметизує форму. Тому метал наче протікає в металевій гарячій «панчосі» (що наклеюється на стінки порожнини форм з першим його дотиком), а не ковзає по стінці форми. Тому попереду в потоці завжди метал гарячіший, ніж при стінках, він рухається в газовому основному (практично безкисневому) середовищі, що складається здебільшого з летючих продуктів термодеструкції пінополістиролу: вуглеводневих газів та парів, водню та найдрібніших часток вуглецю (коксівий чи сажистий залишок).

Основна атмосфера сприяє графітізації металу (перешкоджає карбідизації), а частки вуглецю – його навуглецюванню, вони можуть служити центрами утворення графітних включень в чавуні, якщо потраплять в метал. Крізь відносно (до маси моделі) велику площу вакуумованих стінок форми посилюється можливість вакуумного всмоктування металу. Вищесказані фактори сприяють високій здатності ВЧ до заповнення тонких деталей порожнини вакуумованої форми. Причому за хімічним складом ВЧ відносять практично до евтектичного чи слабко заевтектичного чавуну, що робить його рідкотекучістю найвищу серед інших конструкційних (графітизованих) чавунів за однакової температури їх заливання у форму (виміри текучості при товщині 1 мм виявили, що вона досягає 227 мм залежно від температури розплаву [2]).

Плівка ВЧ, що налипає на стінки при ЛГМ, на товщину в соті долі міліметра зневуглецьовується і втрачає магній під впливом вакууму, але під тиском на стінку форми від присмоктування вакуумом (практично з втратою зазору «метал-форма») отримує прискорене охолодження і металеву структуру з досить здрібненим зерном (кристалітами). Подання інокулювального модифікатора в спеціальну розширену ливникову чашу, як описано в роботі [2], сприяє утворенню в металі зародків майбутніх графітових включень. Це також виявлено при дещо схожому модифікуванні за інмолд-процесом, що відноситься до процесів модифікування в передкристалізаційному періоді; зокрема у відділі

В. Б. Бубликова експериментально отримано за інмолд-процесом ВЧ з дрібними включеннями кулястого графіту (точкоподібного при спостереганні зі стократним збільшенням на шліфі) в кількості більше 1000 включень на  $1 \text{ мм}^2$ . Близьке розташування дисперсного евтектичного графіту (переохолодження) і велика сумарна площа поверхні цих дрібних графітових включень сприяють при перлітному перетворенні повному розпаду аустеніту і виділення фериту (іноді до повної відсутності перліту), скорочуючи шляхи дифузії при розпаді карбідів, що є аналогом графітізувального самовідпалу [3].

Публікації про дослідження щодо виготовлення литого тонкостінного ВЧ (ТСВЧ, TWDI), а також ізотермічно загартованого (TWADI) останніми роками стали досить частими. Зокрема, в роботі [4] описано, що можна виготовити якісні тонкостінні виливки (керівні важелі, консолі та ротори) з ВЧ з питомою міцністю (відношення міцності до густини) до  $87 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ . Крім того, після ізотермічного гартування з отриманням аусферитної матриці в тонкостінних виливках питома міцність зростає до  $154 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ . Також показано, що тонкостінні виливки, виготовлені з TWDI та TWADI, можуть бути легшими та мати кращі механічні властивості, ніж такі ж, виготовлені з алюмінієвого сплаву. Вони мають високий потенціал для заміни деталей з алюмінієвих сплавів у різних сферах застосування, особливо тих, які мають високі механічні вимоги і така заміна може принести істотну економію [4]. Зокрема, на рис. 2, а показано приклади випробувань виливків зі сплаву Al і аналоги TWDI і TWADI у вигляді кривої «залежності напруження від деформації матеріалу», зразків що з взяті з ребра деталі «консоль» (рис. 2, б) [4].

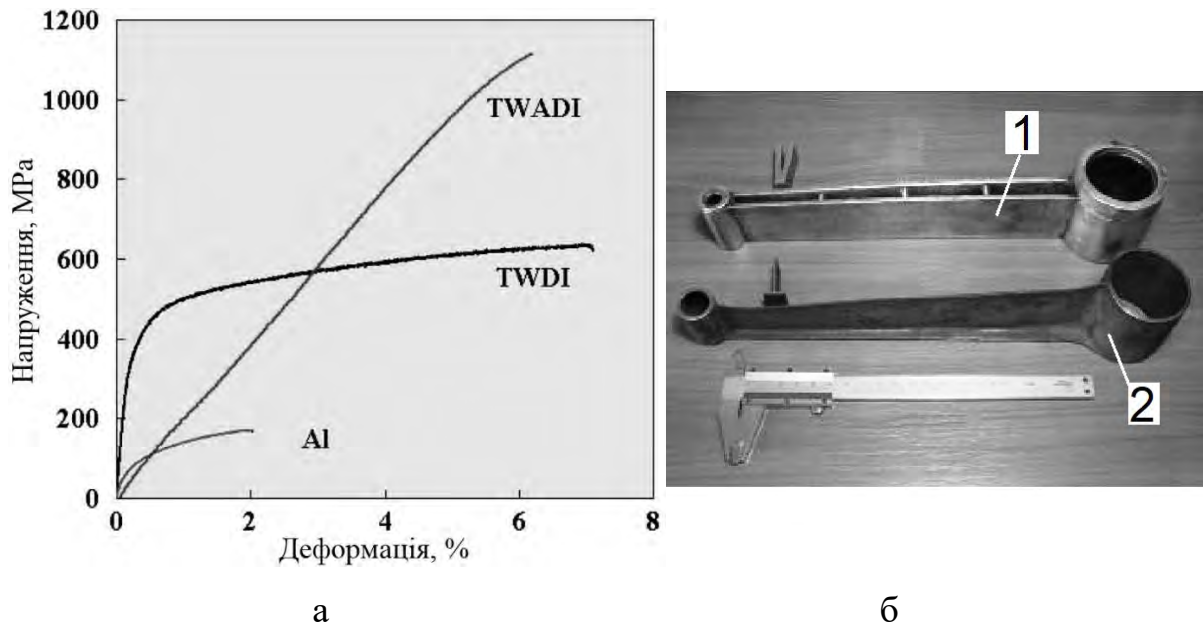


Рис. 2. Крива напруження-деформації (а) зразків, взятих з ребра консолі (б):  
1 – деталь з алюмінію масою 580 г; 2 – з TWDI масою 380 г [4]

#### Література:

1. S. Jordan and M. Debruin. How a foundry can diversify into lost foam casting at negligible cost. *Modern Casting*. 2022. August. P.29-33.
2. S. Jordan, M. Debruin, E. Cilkilic, A. Luo. Thin-Walled Ductile Iron. *Casting source*. 2021. Sept/Oct. P. 34-39.
3. Александров Н.Н., Черепов А.А., Андреев В.В., Ковалевич Е.В. Производство крупногабаритных отливок из чугуна. М.: НИИЭинформнергомаш, 1987. – 44 с.
4. Fraś, E., Górny, M., Lopez, H. Thin wall ductile iron castings as substitutes for aluminium alloy castings. *Archives of Metallurgy & Materials*. Jun 2014, Vol. 59 Issue 2, p. 459-465.