

залізовмісної β -фази (FeSiAl_5) і спостерігається тенденція до збільшення площі залізовмісної α -фази (Fe_2SiAl_8), яка є більш компактною, оскільки кристалізується у вигляді «китайських ієрогліфів». При металографічних дослідженнях в структурі сплаву спостерігали також залізовмісну α -фазу ($\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ у вигляді багатогранних кристалів та залізовмісну π -фазу ($\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$). Механічні властивості досліджуваного сплаву без проведення термічної обробки складалі: $\sigma_B = 139 - 197$ МПа, $\delta = 0,21 - 0,44$ % та $\psi = 0,21 - 0,44$ %.

Нейма О. В., Калюжний П. Б., Дорошенко В.С.

(ФТІМС НАН України, м. Київ)

**СПОСОБИ ЛИТТЯ ТРУБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ ЗА ДРУКОВАНИМИ
МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ**

E-mail: doro55v@gmail.com

Вирішальним фактором формування нового стану ливарного виробництва є цифрові інновації, важливою складовою яких вважають 3D-друк, що сприяє революціонізації виробництва. Прогрес у технології 3D-друку може істотно змінити і вдосконалити спосіб виробництва продукції та виготовляти товари з локалізацією засобу друку по всьому світу. Об'єкт сканується чи конструюється, за допомогою програмного забезпечення оптимізується як конструкція і при автоматизованому проектуванню «нарізається» програмою на тонкі шари, які потім можна друкувати, утворюючи суцільний об'ємний виріб. 3D-друк забезпечить підприємству та окремій особі швидке виготовлення практично в будь-якому розмірі чи масштабі вироб, геометрія якого обмежена лише їхньою уявою. З іншого боку, 3D-друк є надійним і повторюваним засібом виробництва продукції на замовлення, який ще можна зробити недорогим за рахунок процесів автоматизації та розподілу виробничих потреб.

3D-друк ливарних моделей для лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), відкриває перспективи отримання моделей складної геометрії, які навіть неможливо було б виготовити в прес-формах чи вирізанням з пінополістиролу

(ППС) на 3D-фрезерах. Порівняно з ППС-моделями друковані моделі мають вищу чистоту поверхні та точність, менше відходів, спрощують сам процес точного лиття металу з мінімумом витрат на ливарну оснастку.

Проте для технічних ливарних виробів друковані моделі нині ще не досягли рівня, придатного для ЛГМ, не доведена технологія друку моделей низької питомої ваги до рівня, конкурентного з моделями з ППС і низькою зольністю при газифікації у ливарній формі протягом заливання в неї металу. Тому за кордоном ллють метал головним чином способом QuickCast за друкованими моделями, що випалюються в печах з керамічних форм, які виготовляють подібно до лиття за моделями, що витоплюються.

Технологія QuickCast запатентована компанією 3D Systems (<https://www.3dsystems.com>) і полягає у створенні на поверхні друкованої моделі багат шарової (до семи шарів) керамічної оболонкової форми, що проходить ряд операцій сушіння, як правило, відповідно до кожного нанесеного прошарку, а також кінцеве прожарювання. При цьому важливе запобігання утворення тріщин в оболонці, як основного з можливих дефектів. Тому виготовлення оболонкової форми може тривати не менше кількох днів з застосуванням спеціальних недешевих матеріалів і ступінчастих режимів нагрівання. Цей спосіб значно дорожчий за вартістю виливків (проти ЛГМ у вакуумованих формах з сухого піску), енергоємний і тривалий за часом саме від виготовлення таких форм з періодичною сушкою та їх прожарюванням в печі.

У відділі проф. О. Й. Шинського було експериментально перевірено ЛГМ-процес чавуну у вакуумованій формі за моделями з ППС у вигляді патрубків (маса моделі патрубка 5,8 г при густині ППС 30 кг/м³) з насадженими на них друкованими кільцями з чотирьох видів пластиків PLA, HIPS, PLA+Al, PLA+Cu (два останні з додаванням порошків металів). І хоч маси (г) таких кілець склали 7,79; 6,61; 7,88 і 8,52, відповідно, і вони були важчими за модель патрубка ППС, але виливки було отримано без дефектів. Це підтвердило перспективність застосування комбінованих моделей з ППС і друкованими пластиковими елементами, як варіант виконання складної конфігурації друком і простої – з ППС

на литих металовиробах, що розширює можливості ЛГМ. Також перевірено, що друкowana насадка на патрубки з ППС на 20...43% їх довжини з масою в кілька разів більшою, ніж деталь з ППС, дозволяє застосовувати їх в якості моделей для ЛГМ при виливанні з сірого чавуну.

В цьому циклі експериментів також розроблено способи отримання подібних виливків патрубків за моделями з суцільним покриттям патрубків з ППС друкowanними кільцями-оболонками по всій зовнішній циліндричній поверхні. Проте під покриттям друкovаною оболонкою в тілі моделі з ППС вирішено виконати кілька повздовжніх каналів розмірами (мм) в перерізі від 3×3 до 5×5, вони можуть виглядати як поверхневі рівчаки на стінці патрубка з ППС. У випорі з ППС висотою від 30 до 300 мм, що приклеюється до верхнього (при формовці в піску) торця патрубка, також виконують (пропалюванням чи свердленням) повздовжній вентиляційний канал, який поєднують принаймні з одним з каналів в тілі патрубка. Цей випор не фарбують, а його канал ззовні закривають ваткою так, щоб в канал пісок не попадав, а гази могли виходити крізь пісок ливарної форми, чому сприяє її вакуумування. Таким способом модель отримає направлену вентиляцію знизу вверх при положенні моделі патрубка у піщаній формі з вертикальним розташуванням осі його каналу, а випор на верхньому торці матиме імпровізовану венту для ослаблення тиску газів над металом при заливанні його у форму. Відсутність фарби на випорі сприятиме впливу вакууму форми (з ефектом засмоктування) на винесення у випор можливих сажових продуктів з металу патрубка.

Також для виготовлення моделі майже цілком з друкovаних деталей розроблено спосіб збирання моделі патрубка, наприклад, висотою 170 мм з двох вертикальних стопок з кілець (товщиною по 1-2 мм і висотою по 30 мм), які монтують склеюванням устик торцями так, щоб внутрішні вужчі по діаметру кільця утворювали суцільний циліндричний канал патрубка діаметром 30 мм, а ширші по діаметру – зовнішню циліндричну поверхню діаметром 53 мм. При склеюванні моделі циліндра знизу і зверху слід приклеїти по кільцю з ППС у вигляді шайби товщиною до 10 мм, до яких потім приклеювати знизу моделі

живильників, а зверху – випора з вентиляційним каналом і верхньою вентою. При склеюванні тіла моделі патрубк набором у циліндричні стопки друкованих кілець в проміжок між внутрішньою і зовнішньою стопками вставляють однакової довжини розпірки з ППС – стовпчики в перерізі з розміром (мм) $\approx 10 \times 10$, які фіксують як геометрію циліндричної зовнішньої поверхні моделі патрубк, так і його трубчастого отвору. Моделі фарбують, а верхній випор з каналом і вентою не фарбують. Отримуємо модель патрубк з подвійною стінкою, тобто, стінкою з суцільною повздовжньою порожниною, пронизаною розпірками та сполученою з каналом випора для вентиляції.

Інтенсивність відводу газів від термодеструкції моделі регулюють рівнями газопроникності нанесеної на модель фарби (найбільш проста для регулювання величина, також полімерну оболонку можна зовсім не фарбувати, лише натирати графітом тощо) та піску форми (його гранулометричним складом і ступенем внесення свіжого піску в оборотний), товщиною вентиляційних каналів і ступенем проникності вентилів на випорі, способом вентиляції моделі (крізь випор з каналом чи без нього в пісок форми чи на поверхню її контрладу), рівнем вакууму (за вакуумметром), діаметром трубопроводу від форми до вакуумного насосу, відстанню вакуум-фільтрів у формі до поверхні моделі, а також температурою розплаву металу, його теплоємністю та густиною. Вакуум форми активно сприяє вентиляції моделі.

Створення «армованої» розпірками з ППС порожнинної друкованої моделі наближає масу моделі на одиницю об'єму до такого показника для моделей з ППС та створює умови виведення газів, навіть якщо їх утворюється більше ніж в моделі з ППС. Такий метод монтажу трубчастої моделі придатний також і для коробчастих моделей, або не круглої форми в перерізі чи патрубків вигнутих, трійників тощо.

Крім того, нами розробляються сумісні варіанти вирізання заготовки моделі з ППС і друку на ній гладкої плівки чи кірки. Оскільки типовий розплавлений філамент з принтера FDM плавить ППС, то на нього доцільно приклеїти тонку термостійку плівку, наприклад, поліпропіленову чи з іншого матеріалу, які

газифікувались би металом при ЛГМ. Розглядаються варіанти способів зволоження поверхні заготовки ППС водним аерозолем з клейовими добавками чи будівельними матеріалами типу «рідка плівка», охолодження заготовки з ППС в морозильній камері для наступного на ній друку тощо. Також триває пошук нами легкоплавких філаментів, які б не плавили заготовку з ППС, в тому числі виготовлення філаменту з відходів ППС, зокрема за пат. 151359 UA (отримано відділом О.Й. Шинського 13.07.2022, бюл. № 28).

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

СВІТОВИЙ РИНОК АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ВИРІС ДО НОВОГО РЕКОРДНОГО ЗНАЧЕННЯ
E-mail: doro55v@gmail.com

Аддитивне виробництво (АВ) у 2022 р. знову зросло. За інформацією www.k-zeitung.de за 23.03.2023 (рис. 1) з посиланням на дослідження Ampower, світовий ринок АВ в ринкових умовах після пандемії виріс до нового рекордного значення 9,53 млрд євро в 2022 р. з річним темпом зростання (CAGR) 14,4%. Інвестиції у нове обладнання збільшилися, але багато компаній переключили свою увагу на оптимізацію існуючого виробництва, а не на інвестиції у нове обладнання.

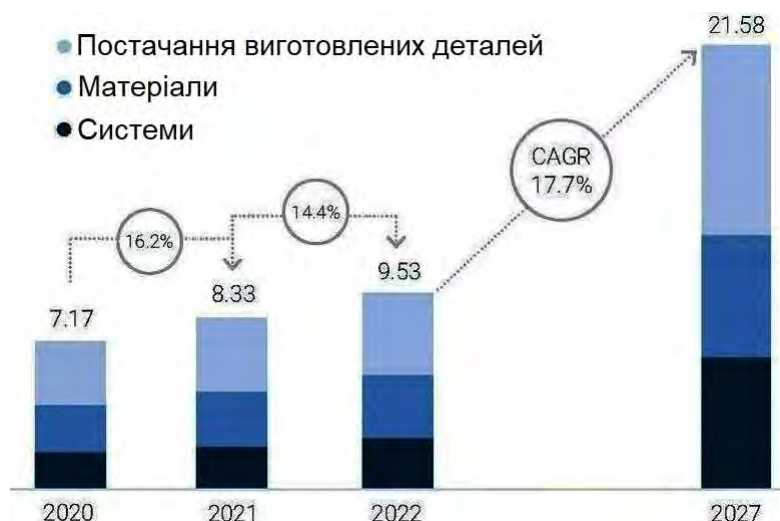


Рис. 1. Глобальний ринок АВ металів і полімерів у 2020-2022 рр. і прогноз на 2027 р. у мільярдах євро показує стійке двозначне зростання