

3D ДРУК МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ – ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ У СВІТОВОМУ СУДНОБУДУВАННІ

Колесніков М. О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. Завдяки інтенсивному розвитку інформаційних технологій та їх активному проникненню в різні сфери життя людини, за останнє десятиліття вже склалася впевнена тенденція щодо впровадження кібер-фізичних систем у всі сфери діяльності людини: чи то промисловість, політична система чи місце існування живих істот. Подібна подія отримала назву «Четверта промислова революція», що, як і три попередні промислові революції, доводить фактичне досягнення нового етапу світового технологічного рівня [1]. Так, застосування інформаційних технологій у промисловості отримало цілком чітку назву – Промисловість 4.0, а її галузі, наприклад, суднобудування, відповідно, новий термін – Суднобудування 4.0, що говорить про застосування абсолютно нових технологій при будівництві суден та кораблів, а саме: 3D друк конструкцій корпусу, застосування паперу підвищеної щільності з нано-матеріалів, безбаластна конструкція судна або встановлення двигунів на сонячній та вітровій енергіях. Технологічний розвиток прогресує швидкими темпами та на цьому етапі необхідно з'ясувати, наскільки впровадження 3D друку у сферу виробництва суден полегшує та прискорює процес будівництва кораблів, а також, чи відповідає експлуатація надрукованих конструкційних елементів необхідним нормам безпеки.

Безумовно, друк готових виробів значно прискорює процес їх виготовлення, а тому у цей час швидких технологій є актуальним, у зв'язку з чим, для своєчасного розуміння можливості безпечного застосування подібних 3D друкованих технологій, необхідно постійно відстежувати дослідження, що проводяться провідними світовими розробниками. І якщо раніше подібна технологія використовувалася для виготовлення тільки пластикових деталей, то друк вже металевих конструкційних виробів висуває нові вимоги до їх технічних характеристик. Однак, не дивлячись на привабливість подібного методу, його складність досить висока і обумовлена тим, що обробка металу, на відміну від пластику, технологічно витратніша і цей процес вимагає комплексного підходу у виборі відповідного набору інструментів та обладнання. Так, із пластикової маси виготовити деталь практично будь-якої конструкції якщо й не важко, то технічні характеристики подібного виробу будуть значно слабкішими за друкований металевий аналог, проте, явно вимагатимуть для виробництва другого вже інноваційного підходу.

У зв'язку з цим, для друку металевих виробів застосовується технологія пошарового нарощування та подальшого синтезу об'єктів, яка має назву адитивна технологія і яка дозволяє поетапно формувати виріб у вигляді покрокового додавання матеріалу. І якщо в адитивному виробництві при виготовленні пластикових деталей можна застосовувати технологію формування плавлених ниток, то при виготовленні деталей із металу дана

технологія значно програє [2]. Причиною цього є відсутність можливості під час процесу друку металевих виробів підтримувати необхідну в'язкість металу, як це здійснюється при друку деталей пластикових мас [3]. Тому, для вирішення подібної проблеми, був обраний найбільш близький до пластиків метод – метод друку металевих виробів з металевих порошків з використанням для нагрівання лазера і для подальшого затвердіння – електронного променя [3]. Однак, не дивлячись на привабливість, цей процес вимагає великих енерговитрат і досить дорогий через високі вимоги до самого порошку, його хімічних та фізичних характеристик. Також через термічні та механічні напруження всередині готового виробу його якість також не можна назвати високою [4], тому для вирішення даної проблеми був розроблений альтернативний метод екструзії, який працює за принципом видавлювання і при якому екструзія дозволяє поєднувати рідку та тверду фази суміші та наводить до стабільної якості металу заданої в'язкості [5].

Мета роботи. Вивчення перспектив широкого застосування інноваційної технології виробництва суднових конструкцій шляхом 3D друку деталей судна за допомогою адитивних технологій, а також вивчення методів виробництва та перевірки хімічних та механічних властивостей аморфних металів, що йдуть на зміну звареним металевим конструкціям.

Матеріали і результати досліджень. У цієї дослідницької роботі були використані теоретичні методи дослідження, в основі яких лежить практичний досвід міжнародних наукових інститутів. В якості теоретичних методів були застосовані системний аналіз, що передбачає поділ аналізованих процесів вивчення 3D друку металевих виробів в адитивній технології на складові для подальшого дослідження кожного з них, а також синтез – з'єднання виконаних досліджень для оцінки елементів 3D-виробництва, що розглядаються, а також розуміння їх взаємозв'язків. Було досліджено проведені експерименти міжнародних дослідницьких наукових товариств з виготовлення вихідних матеріалів для виробництва 3D друку металевих виробів (аморфні метали або об'ємні металеві скла – ОМС), а також подальше дослідження механічних характеристик отриманих зразків. Основна база досліджень ґрунтується на проведених експериментах Єльського університету (США) з виробництва аморфних металів для 3D друку металевих виробів [6]. Також було проведено дослідження щодо вже виготовлених виробів з об'ємного металевого скла, впроваджених в експлуатацію в кораблебудівній галузі, досліджено досвід великих міжнародних суднобудівних організацій, які оцінюють перспективи впровадження 3D друку у промислове виробництво та які займаються розробкою даного напрямку, а також був вивчений досвід із впровадження самого 3D виробництва з аморфних металів безпосередньо на судах, що дозволяє виробництво необхідних деталей у відкритому морі.

Дана дослідницька робота була проведена у три основні етапи.

Перший етап цієї дослідницької роботи здійснювався шляхом теоретичного аналізу методологічних підходів, проведених науковими співтовариствами та спрямованих на дослідження покращення хімічних та механічних характеристик аморфних металів, а також шляхом вивчення

наукової літератури з проблем виготовлення об'ємного металевого скла та шляхів подолання цих проблем. Основними характеристиками, що пред'являються інноваційному матеріалу стали висока міцність, мала вага і дешевизна виробництва, що надалі дозволить використовувати такий матеріал у різних галузях промисловості, включаючи суднобудування.

Другий етап проведеної цієї дослідницької роботи було виконано шляхом проведення аналітичного дослідження щодо реалістичності застосування таких інноваційних матеріалів, як об'ємне металеве скло, а також ступінь їх потенційного впровадження у масове виробництво. Було проведено дослідження наукових розробок, виконаних різними міжнародними науковими спільнотами за останні двадцять років, ступінь їхнього просування до мети виготовлення міцного, легкого та дешевого аморфного металу, а також розглянуті підходи та методи проведених досліджень. Подібний підхід дозволяє ширше поглянути на зацікавленість наукового співтовариства в успішному виробництві даного матеріалу, побачити важливість та масштабність поставленого завдання, а також з'ясувати широкий спектр можливого застосування такого матеріалу у різних галузях промисловості.

Третій, заключний етап даної дослідницької роботи уточнює як теоретичні, так і практичні висновки на підставі проведених досліджень та отриманих у процесі результатів, що надалі дозволяє визначити тенденції розвитку виробництва об'ємного металевого скла та можливість їх широкого впровадження у різних галузях промисловості, зокрема у суднобудування.

Аналіз проведених дослідницьких тестувань щодо можливості застосування 3D друку металевих деталей таким інноваційним способом як адитивна технологія, дало наступні результати. Як було визначено вченими Єльського університету, на сьогоднішньому етапі розвитку сучасного технологічного рівня, найбільш підходящим матеріалом, як модельна система, для вивчення екструзії та подальшого виготовлення виробів з металевого об'ємного скла, був використаний матеріал $Zr_{44}Ti_{11}Cu_{10}Ni_{10}Be_{25}$. Цей матеріал був експериментально підібраний з таких причин: для виготовлення використовуються доступні елементи, він має високу особливість термопластичності, а також його вартість досить низька, що робить цей матеріал комерційно виправданим [7]. Як матеріал для друку були використані аморфні стрижні (прутки) виготовлені з цього ж матеріалу. Довжина стрижнів складала 700 мм, діаметр – 1 мм. У процесі проведення експериментів, стрижні подавалися в нагріту екструзійну камеру, при цьому було експериментально встановлено, що найкращі результати екструдкування досягаються при температурі 460 °C. За такої температури в'язкість матеріалу становить приблизно 105 Па·с, а час до кристалізації – близько 100 с [8]. При інших, нижчих температурах, висока в'язкість вимагала досить високих сил для екструзії, що виходило недоцільно, тоді як за високих температурах прискорена кінетика кристалізації вимагала дуже короткого часу на обробку, що практично виявлялося досить складним.

Процес виробництва відбувається в такий спосіб. При нагнітанні сировини в камеру екструдера, сировина нагрівається до температури обробки

термопласту в 460°C. При збільшенні зусилля механізму подачі екструзії від 10 Н до 1000 Н (зазвичай застосовується менше 100 Н), при діаметрі сопла = 0,5 мм та ефективною довжини екструзії до 2 мм, швидкість екструзування стрижнів може досягти 5 см/с, що є високим результатом та практичним досягненням. Друк зразків проводився на шарі сітки з нержавіючої сталі, попередньо нагрітій до 400 °С, при цьому час кристалізації матеріалу займав близько 1 дня.

Виробнича система переміщення та екструзії матеріалу складається з модифікованого фрезерного столу, оснащеного числовим програмним управлінням (ЧПУ) та керованого роботом за допомогою команд G-коду, що генерується спеціально написаним програмним забезпеченням для генерації траєкторії руху автоматики. Так як якісне хімічне з'єднання виробничого складу при виготовленні об'ємного металевих скла під час термопластичного процесу може бути досягнуто тільки за рахунок деформації матеріалу в прикордонних шарах навіть при обробці на повітрі [8], був розроблений спеціальний імпульсний нагрівач, що застосовується для нагрівання локальних місць раніше надрукованих шарів. Даний нагрівач запитується від сильноточного джерела живлення з характеристиками 72 А і 48 В, який у свою чергу отримує живлення від конденсаторної батареї з високою ємністю (1F). Батарея генерує при доданій напрузі 10-20 В імпульсні струми частотою 5-20 Гц (~10 Ом) протягом 100-500 мкс, що дозволяє досягти на виході з сопла значення необхідної температури екструзії. Для локального нагрівання попереднього шару металева камера проходить екструдер на невеликій відстані, приблизно в 1 мм, в той час як імпульсний струм, що там проходить, нагріває область контакту з матеріалом, а ретельне регулювання струму дозволяє контролювати температуру нагріву до 460 °С. Така температура нагрівання полегшує початкове приклеювання матеріалу до підкладки обтяжного екструдованого металевих скла. Сама підкладка переміщається відносно стаціонарної екструзійної камери, при цьому обидва – і камера та підкладка – запрограмовані рухатися за однаковою траєкторією.

Подібний спосіб друку дозволив експериментально визначити швидкість об'ємного нарощування деталей, що становить близько 10 мм³/с. Цю швидкість можна порівняти зі швидкістю нарощування від 1 до 10 мм³/с при лазерному сплаві матеріалів порошковому шарі [9] і зі швидкістю до 40 мм³/с при термічному напиленні [10].

Для оцінки якості надрукованих деталей з об'ємного металевих скла, на фотографіях нижче представлені зразки, отримані при безперервних режимах виробництва (рис. 1, 2):

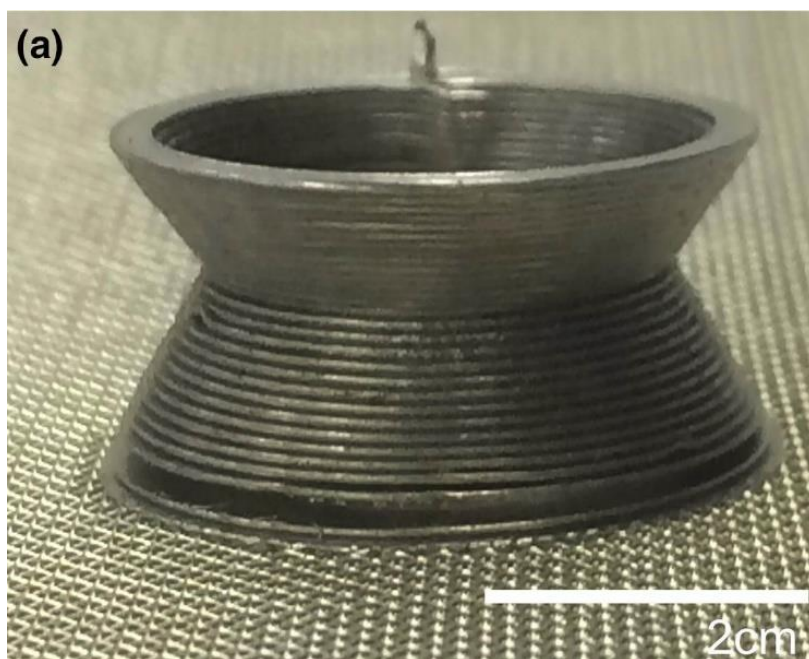


Рисунок 1 – Фото зразка ОМС, надрукованого при безперервному цільному режимі, що не переривається наприкінці кожної екструзії

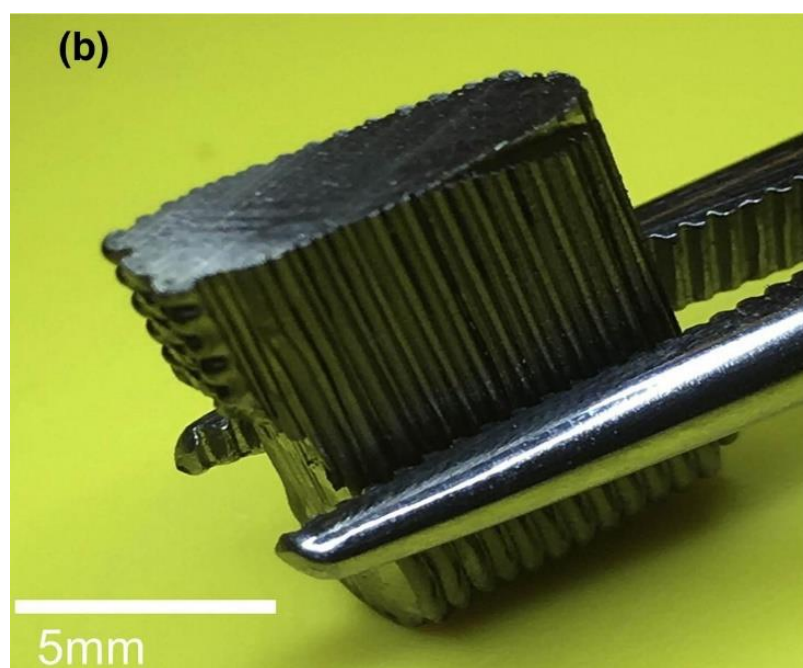


Рисунок 2 – Фото зразка ОМС, надрукованого при екструзії, що переривається, на кожному шарі

Характерно, що при обох режимах можуть бути досягнуті повністю щільні (при щільності $\rho = 5,76 \text{ г/см}^3$) та тверді безпористі вироби з об'ємного металевого скла (рис. 3). Якість отриманого складу такого матеріалу також показана на фотографії нижче (рис. 4).

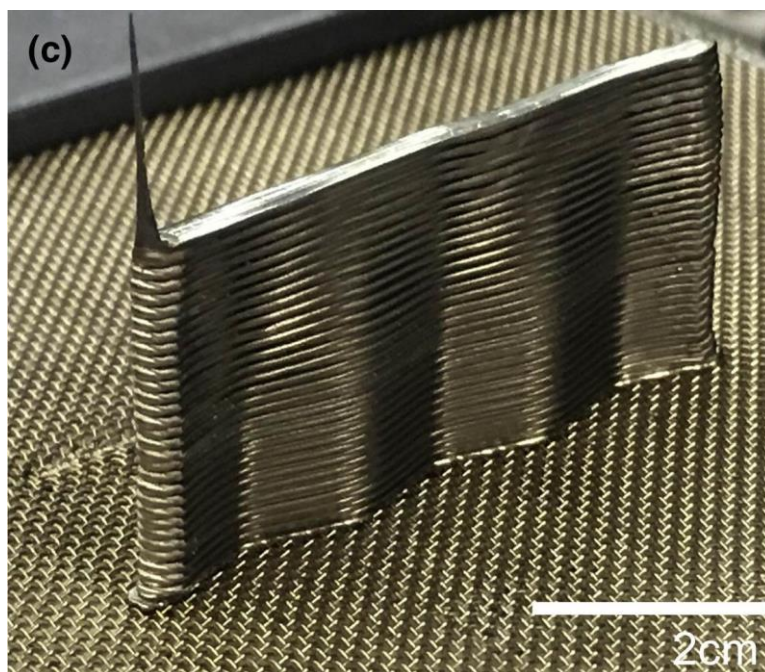


Рисунок 3 – Фото зразка ОМС, надрукованого при високій щільності та відсутності пористості, може бути виготовлений в обох режимах

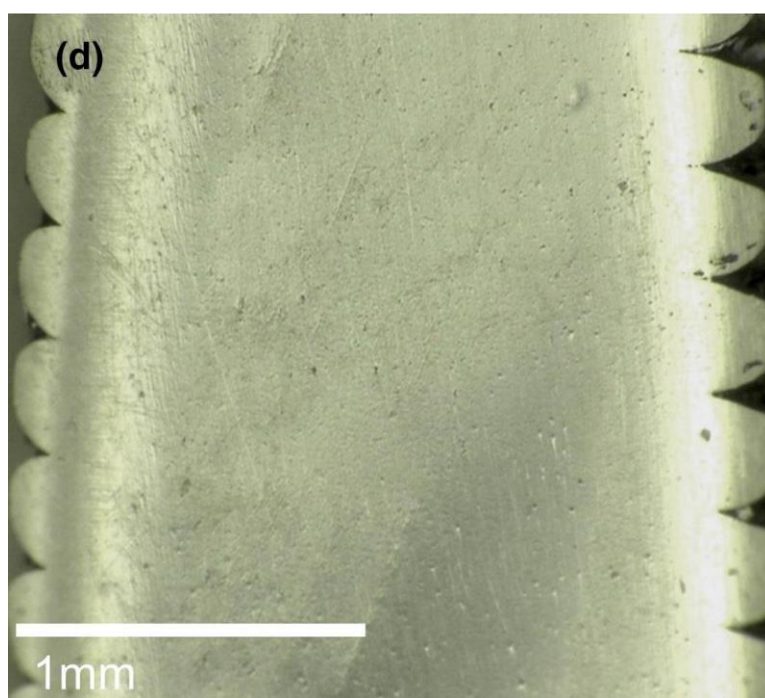


Рисунок 4 – Зразок ОМС, надрукований при високій щільності та відсутності пористості. Структура матеріалу

Для виробництва таких деталей, під час 3D друку необхідне зусилля подачі підвищується до 1000 Н. При цьому, треба підкреслити, що всі аспекти процесу подібного друку металевих виробів виконувались на повітрі, що є унікальним для подібної роботи з металом.

Щоб оцінити фізичні характеристики надрукованих деталей, для їх оцінки були застосовані термічний та механічний методи. Для того, щоб визначити вплив процесу 3D друку та пов'язаного з ним температурного впливу на якість

матеріалу, був проведений термічний аналіз вихідної сировини, що застосовується для друку та вже надрукованих виробів за допомогою диференціальної скануючої калориметрії (рис. 5). В результаті були отримані наступні дані: Термічна стабільність ΔT , різниця температур між температурою склування T_g і температурою кристалізації T_x , і теплотою кристалізації ΔH , та вихідної сировини для об'ємного металевого скла складають: $T_g = 371^\circ\text{C}$, $T_x = 473^\circ\text{C}$, $\Delta T = 102^\circ\text{C}$, $\Delta H = 83 \pm 5$ Дж/г та для друкованих ОМС матимуть такі дані: $T_g = 373^\circ\text{C}$, $T_x = 476^\circ\text{C}$, $\Delta T = 103^\circ\text{C}$, $\Delta H = 85 \pm 5$ Дж/г. Як результат видно, що отримані дані підсумкової якості обох матеріалів практично ідентичні в межах експериментальної похибки, що говорить про досягнуті успіхи інноваційного виробництва.

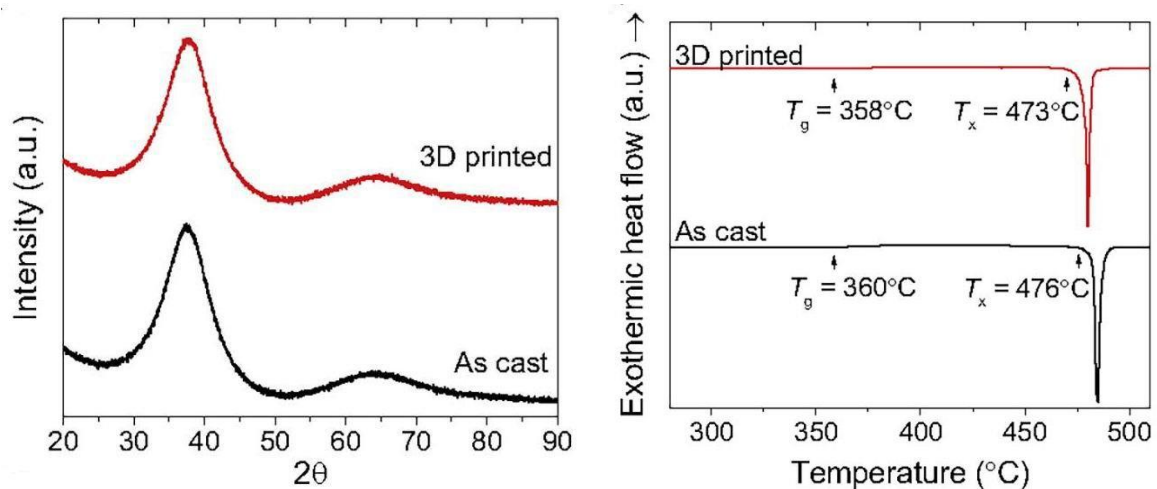


Рисунок 5 – Характеристика надрукованих зразків ОМС за двома методами (рентгенівський та температурний аналізи) [6]

Механічна характеристика виготовлених матеріалів була проведена для оцінки впливу процесу 3D друку на механічні властивості об'ємного металевого скла. Квазістатичний натяг друкованих деталей здійснювався як у паралельних напрямках, так і перпендикулярних до напрямку друку (рис. 6).

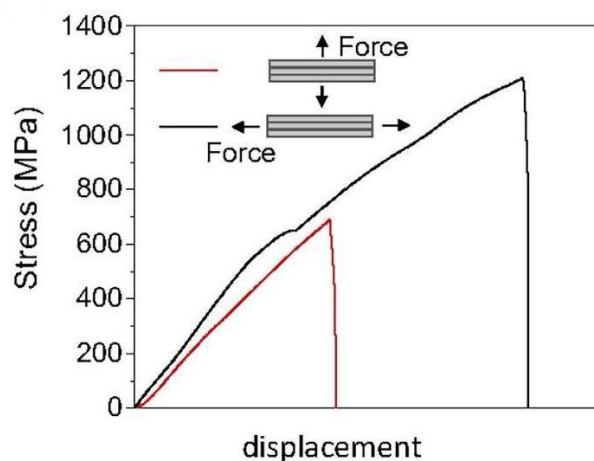


Рисунок 6 – Випробування на розтяг надрукованих зразків з ОМС при паралельному та перпендикулярному напрямках друку [6]

Внаслідок перевірки міцності друкованого виробу ОМС на злам, при навантаженні паралельних друкованим шарам напрямків, $\sigma_{\parallel}$ досягає значення 1220 МПа. При навантаженні перпендикулярних друкованим шарам напрямків міцність на злам $\sigma_{\perp}$ досягає значення 790 МПа. Для порівняння, межа міцності вихідного матеріалу становить приблизно 1900 МПа. Як видно з результату, значення $\sigma_{\perp}$ тут досить чутливе до методу друку, особливо різниці температур екструдованого і попереднього шару. Але коли різниця температур між екструдованим об'ємним металевим склом і попереднім шаром така, що деформації попереднього шару не відбувається, тоді практично не утворюється металургійний зв'язок і, як наслідок, $\sigma_{\perp}$ буде дорівнювати 0 МПа. Це пов'язано з тим, що при обробці матеріалу на повітрі, з'єднання між шарами залежить від деформації межі екструдованого та попереднього шарів, і необхідно зруйнувати природну оксидну плівку на самій поверхні матеріалу, щоб, як наслідок, забезпечити металургійний зв'язок між шарами [8]. Міжфазна деформація може бути досягнута тільки в тому випадку, якщо обидва шари деформуються разом. Тоді, за таких умов, їх поверхні можуть склеюватися повторно та не окислюються. Отже, температура попереднього шару в місці контакту з екструдованим матеріалом повинна бути аналогічної температурі самого екструдованого матеріалу.

У наступному дослідженні в якості сировини був використаний підібраний Єльським дослідницьким інститутом матеріал $\text{Zr}_{44}\text{Ti}_{11}\text{Cu}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{25}$, що найбільше підходить для досягнення поставлених завдань – виготовлення друкованого металевого зразка необхідної міцності з його відносною доступністю для виробництва та прийнятною вартістю. Всі ці параметри говорять про практичність даного матеріалу та широкі можливості його застосування в різних галузях промисловості. Однак, швидкість 3D друку, діаметр вихідного отвору (сопла) і зусилля, що нагнітається при екструзії матеріалу, при самому дослідженні ще мало змінювалися і діапазон слід було б розширити, що говорить про необхідність продовження більш глибокого дослідження даного методу для подальшого визначення, можливо, ще більш вдалих параметрів обробки матеріалу.

Щоб оцінити допустимий діапазон характеристик для складу об'ємного металевих скла, розглянемо перебіг в'язкої рідини через екструзійне сопло (рис. 7).

Процес екструзії у разі застосування технології формування плавлених ниток з використанням термопластичного процесу обробки об'ємного металевих скла, в принципі, можна розглядати як процес протікання високов'язкої ньютонівської рідини через нагріту циліндричну камеру [11]. Загальна висока в'язкість текучого матеріалу такого об'ємного металевих скла наводить числа Рейнольдса близькими до нуля (число Рейнольдса – це безрозмірне число, що використовується для класифікації систем рідин, у яких вплив в'язкості важливий для управління швидкістю або характером течії рідини [12]), тобто до умов повзучого потоку або, як його ще називають, повільний перебіг дуже в'язкої рідини [13]. Таким чином, необхідний тиск екструзії P може бути виражений через апроксимацію за такою формулою (1):

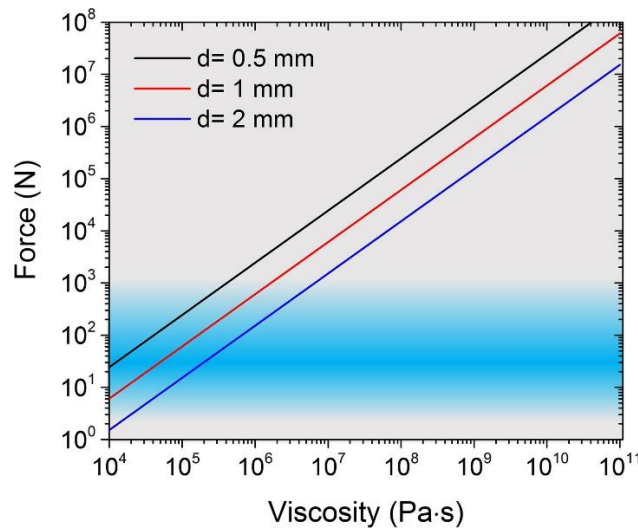


Рисунок 7 – Екструдованість зразка ОМС залежно від в'язкісних та тимчасових характеристик кристалізації [6]

$$P = \frac{32 \cdot \eta \cdot L \cdot v}{d^2}, \quad (1)$$

де η – це в'язкість об'ємного металевого скла, L – ефективна довжина камери, v – швидкість екструзії, d – діаметр отвору. Дана формула дозволяє нам оцінити необхідне зусилля для формування, що дозволить встановити цільову швидкість друку при різних діаметрах отворів (наприклад, 0.5 мм, 1 мм та 2 мм) залежно від в'язкості. У діаграмі (рис. 7) як вихідні дані була прийнята довжина отвору $L = 2$ мм, а цільова швидкість екструзії $= 5$ см/с, що аналогічно умовам цього експерименту. В даному випадку, вплив сторонніх сил на вході матиме досить невелике значення для даних, що розглядаються тут, а саме довжини і діаметра отвору [14]. Для отримання якісного зразка 3D друку рекомендується застосовувати зусилля друку в районі від 10 Н до 1000 Н. Зусилля друку, що перевищує значення 1000 Н реалізувати в сучасних 3D-принтерах як досить складно, так і досить дорого, оскільки технології такого рівня все ще не досягли необхідної якості, тоді як зусилля нижче 10 Н стає все важче контролювати. В результаті, ідеальна поведінка при друку може бути реалізована для об'ємного металевого скла зі значенням в'язкості нижче 10^6 Па·с при друку через отвір діаметром 0,5 мм і нижче значення 10^8 Па·с при друку через отвір діаметром 2 мм.

Як сказано вище, для досягнення оптимального значення зусилля екструзії при 3D друку, зусилля має знаходитися в діапазоні від 10 до 1000 Н. На рис. 7 ця область позначена синім кольором, де можливий точний контроль за процесом, а сили достатньо малі, щоб їх можна було реалізувати у сучасних принтерах. Щоб матеріал об'ємного металевого скла підходив для такого процесу, необхідно, щоб час доступний на початок кристалізації перевищував час протягом якого ОМС піддається впливу відповідної температури під час процесу формування плавлених ниток. Оскільки час витримки в процесі екструзії може бути легко зменшено менш ніж до однієї секунди, при короткочасному (піковому) температурному впливі в'язкість в межах від 10^4 до

105 Па·с може бути реалізована у високо формованому матеріалі об'ємного металевих скла, такому як $Zr_{44}Ti_{11}Cu_{10}Ni_{10}Be_{25}$ [15]. Для матеріалу, значення в'язкості якого знаходиться в діапазоні від 106 до 107 Па·с, для об'ємного металевих скла з середньою формованістю рекомендується використовувати такий матеріал як $ZrNiCuAl$. І для матеріалу, в'язкість якого знаходиться в межах від 108 до 109 Па·с для менш формованих ОМС, рекомендується використовувати склад об'ємного металевих скла виконаного на основі Fe – заліза. Це говорить про те, що об'ємне металеве скло, що добре формується, можна легко друкувати на 3D принтері в практичних умовах навіть через сопла діаметром 0,5 мм, тоді як формовані ОМС середнього діапазону – з соплами діаметром від 0,5 до 1 мм, менш формоване об'ємне металеве скло, тільки з соплами діаметром 2 мм.

Важливо відзначити, що унікальною властивістю серед процесів 3D друку металом та головною перевагою представленого 3D друку об'ємного металевих скла за технологією формування плавлених ниток є те, що весь процес може виконуватись на повітрі. Термічна та механічна поведінка матеріалу не передбачає помітного впливу повітря під час друку зразка. Більш того, навіть при розгляді температурного впливу під час процесу друку зміни кольору, що вказувало б на окислення, не було виявлено. І це дивно, тому що обраний матеріал $Zr_{44}Ti_{11}Cu_{10}Ni_{10}Be_{25}$, який застосовується для виготовлення об'ємного металевих скла, містить реактивні елементи. Тим не менш, при об'єднанні в аморфній фазі вони виявляються більш стійкими до окислення, що разом з низькою температурною обробкою при процесі виготовлення на основі термопластичного процесу дозволяє проводити обробку навіть на повітрі [17].

Даний метод виготовлення 3D друку показав високу ефективність та був позитивно оцінений низкою науково-дослідних інститутів різних країн. Застосування такого матеріалу як $Zr_{44}Ti_{11}Cu_{10}Ni_{10}Be_{25}$ дає ряд переваг у виготовленні металевих деталей, а також є проривною технологією при досягненні виробництва настільки високої якості виготовлення, яка не поступається відлитим виробам (Джефрі Томпсон, 2019). Дослідження 3D друку металом провідними дослідницькими інститутами, що продовжуються, на даний момент підтверджують отримані високі результати, і незважаючи на те, що про завершення експериментів говорити рано, подібна технологія впевнено набирає популярність у всьому світі. При використанні 3D друку металом основна проблема полягає в тому, що метал, на відміну від пластику, складно зробити досить м'яким. І для того, щоб обійти це питання, дослідники використали об'ємне металеве скло або метглас – такий тип металевих матеріалів, який не має жорсткої атомної структури, як більшість сплавів. Тому метглас може розм'якшуватися легше звичайних матеріалів і в той же час залишатися таким же міцним, з високим порогом еластичності та опірності корозії, що зацікавило виробників (Ваймс 2020).

Адитивна технологія 3D друку окрім своєї зручності та економної вартості повинна відповідати міжнародним стандартам безпеки. У кораблебудівній галузі за це відповідають класифікаційні товариства. І першими класифікаційними товариствами, які взяли під контроль якість виробництва та

виготовлення вузлів та деталей, стали *Bureau Veritas* (Франція) та *Det Norske Veritas* (Норвегія).

Зразком перевірки якості 3D друку, що найчастіше використовується, є перевірка виготовлених за такою технологією гребних гвинтів. Так, у 2017 році було засновано консорціум, до якого увійшли класифікаційне товариство *Bureau Veritas*, компанії *Autodesk*, *Promarin*, *RAMLAB*, а також суднобудівна верф *Damen*. Учасники консорціуму спільно спроектували трилопатевий гребний гвинт, розробили програмне забезпечення, за допомогою зварювального робота *Valk* роздрукували зі сплаву нікель-алюміній-бронза методом дугового зварювання гребний гвинт, після чого гвинт був відшліфований та протестований. Результати випробувань показали, що надрукований гвинт за своїми характеристиками не поступається литому, що було підтверджено сертифікатом якості *Bureau Veritas* [17]. Сьогодні фахівці норвезького класифікаційного товариства *Det Norske Veritas* щільно вивчають використання в промисловості адитивного виробництва з дрютяною дугою, технологію видувного порошку, а також зварювання в порошковому шарі, проводячи випробування та встановлюючи нові стандарти для забезпечення безпечного використання адитивного виробництва. Так, *Det Norske Veritas* вже сертифікував деякі деталі, надруковані на 3D-принтері для одного з найбільших німецьких промислових концернів *ThyssenKrupp*, що дозволило цьому концернові стати першою організацією у світі, яка отримала подібну сертифікацію [18]. Це в черговий раз є доказом того факту, що виготовлення деталей та компонентів за технологією адитивного виробництва вже відповідає суворим вимогам та міжнародним стандартам, не нижчим, ніж деталі, що були виготовлені звичним способом.

Популярність застосування 3D друку в суднобудуванні з кожним роком завойовує у виробників все більшу популярність. Ось лише кілька прикладів, що доводять ширше поширення застосування адитивної технології в кораблебудівній галузі, де всі тенденції свідчать про те, що в найближчому майбутньому 3D друк впроваджуватиметься у промисловість повсюдно.

Адитиву технологію також оцінив найбільший суднобудівний завод Південної Кореї *Hyundai Heavy Industries* (ННІ). Цей суднобудівельний гігант вже використовує на своєму виробництві 3D принтер *Objet Eden350V 3D* від компанії *Stratasys*, друкуючи на ньому компоненти для енергозберігаючих пристроїв, що стало особливо популярним після посилення правил забруднення для кораблів у всьому світі. Через складну геометрію даних деталей їх виробництво було б значно складнішим і дорожчим, якби їх довелося фрезерувати стандартним способом із пластику, металу або дерева. Однак інноваційні технології дозволяють знизити витрати праці в рази і, як підрахували представники ННІ, заплановане впровадження виготовлення виробів за адитивною технологією дозволить заводу економити близько 1,8 мільярда доларів США щорічно.

Німецька дослідницька компанія з гідродинаміки *Hamburg Ship Model Basin* впровадила на своєму виробництві технологію 3D друку власної

розробки, що дозволило протягом наступних двох років знизити час на виробництво на 70%, а витрати на 30%.

Норвезька компанія *Kongsberg Ferrotech*, що займається обслуговуванням та будівництвом підводних трубопроводів, вітряних турбін у відкритому морі та силових кабелів у глибинах океану, також впровадила у своє виробництво 3D друк за адитивною технологією, що за розрахунками економістів компанії дозволить не тільки спростити ремонт та перевірку їх обладнання, а й знизити фінансові витрати від 30% до 50%.

Британський виробник *ecoSUB Robotics*, що займається морськими технологіями і спеціалізується на розробці об'єктів здатних виконувати місії глибокого спостереження та відповідають вимогам комерційних та військових замовлень, впровадивши на виробництві 3D друк для виготовлення необхідних деталей для глибоководних апаратів, дуже позитивно оцінив економію часу виробництва та вкладених коштів без втрати якості.

Голландська компанія з виробництва яхт *KM Yachtbuilders* уклала угоду з компанією *MX3D* щодо створення 3D друкованого алюмінієвого кіля за технологією адитивного виробництва із дротяною дугою. Тут треба звернути увагу на те, що оскільки досвідчених зварювальників не так багато і вільних знайти стає складно, можливість застосування адитивних технологій у суднобудівній галузі стає все більш очевидною.

Військово-морські сили Сполучених Штатів Америки (ВМС США) також зацікавлені у якнайшвидшому впровадженні на виробництві можливостей 3D друку необхідних деталей. Так, щоб розвантажити своїх постачальників, ВМС США планують об'єднати організації, що займаються 3D друком металом для виробництва деталей за своєю Програмою підводних човнів із балістичними ракетами класу «Колумбія» [19].

На сьогодні поки що вимога висувається до другорядних деталей та фітінгів, проте факт зростання популярності адитивної технології у виробництві вже можна вважати широким визнанням та початком більш щільного впровадження 3D друку в кораблебудівну галузь і не тільки.

Висновок. На сьогоднішній день процес 3D друку із застосуванням адитивної технології об'ємного металевих скла, розглянутого в цьому дослідженні, пропонує найкраще інноваційне рішення, що дозволяє уникнути проблеми вибору між властивостями та технологічністю отриманого виробу. Технологічність в даному методі реалізується шляхом використання поступового розм'якшення об'ємного металевих скла, що термопластично формується під час процесу прямої екструзії та в поєднанні з механізмом міжшарового металургійного зв'язку. Щодо властивостей, то квазістатична міцність виробу, у свою чергу, при навантаженні на розтяг є найвищим експериментально підтвердженим значенням для деталей ОМС адитивної технології та одним з найвищих для будь-якої металевих деталі серед адитивних матеріалів. Крім того, можливість проводити цей процес на повітрі має практичне значення, оскільки дозволяє уникнути дорогих та досить складних інертних або вакуумних умов виконання робіт. Низькі температури обробки термопласту під час друку та відсутність фазового переходу для об'ємного

металевого скла при затвердінні після екструзії, хоч і призводять до невеликої усадки, однак, як мінімум, на один порядок менше, ніж усадка процесів адитивного рідинного виробництва для звичайних металів. У той же час, технологія формування плавлених ниток, що широко застосовується, має досить велику схожість з розглянутою. Це означає, що багато проблем, які були вирішені для технології формування плавлених ниток, у такий же спосіб можуть бути вирішені і для об'ємного металевого скла.

У цій дослідницькій роботі були вивчені методи виробництва з врахуванням перевірки хімічних та механічних властивостей отриманих матеріалів для 3D друку, процес їх утворення, результати випробувань та широкі перспективи застосування 3D друку металом. В цілому, мета даної роботи була досягнута та отримані на даному етапі знання та результати досліджень можуть бути згодом використані представниками наукових спільнот як наукова база для майбутнього розвитку дослідження інноваційних матеріалів. На підставі наведених висновків та проведених експериментів це дозволить науковцям надалі продовжити дослідження самостійно, повторити або оновити попередні експерименти, покращити теоретичну базу та перевірити власні інноваційні висновки та розробки виробництва об'ємного металевого скла, або інших розроблених дослідниками матеріалів, взявши за основу наявні в даному дослідженні результати. Подана в проведеному дослідженні інформація має великий потенціал розвитку і може слугувати основою для подальших досліджень цієї інноваційної технології.

Незважаючи на те, що на сьогоднішній день 3D друк металом займає поки що лише нішеве становище у промисловому сегменті, дана технологія активно завойовує нові рубежі, знаходячи визнання у різних галузях промисловості та, зокрема, у суднобудуванні. В океані вже ходять кораблі, оснащені сучасними 3D принтерами, що дозволяє екіпажу посеред океану проектувати та друкувати необхідні металеві деталі складних форм. Активний розвиток 3D друку металом доводить інтерес промисловості до даної технології та вимагає більш глибоких досліджень складу матеріалів, з яких друкують вироби, розвитку цієї технологій, методів друку металом, а також більш досконалого обладнання.

Перелік посилань

1. Orsolin, C., Klingenberg, M., Antunes J. (2022). *"Industry 4.0: What makes it a revolution? A historical framework to understand the phenomenon"*. Technology in Society: Elsevier, Volume 70, 89-96.
2. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. (2020). *Additive manufacturing of metals*. (Third edition). Acta Materialia Inc: Elsevier, 257.
3. Schroers, J., Hodges, T., Kumar, G., Raman, H., Barnes, A., Pham, Q., Waniuk, T. (2011). *Thermoplastic blow molding of metals*. Materials Today: Elsevier, Volume 14, Issue#1-2, 14.
4. Dunbar, A., Denlinger, E., Heigel, J., Michaleris, P., Guerrier, P., Martukanitz, R., Simpson, T.W. (2019). *Development of experimental method for in situ distortion and temperature measurements during the laser powder bed fusion additive manufacturing process*. (Third edition). Additive Manufacturing: Elsevier, Volume 6, 177.
5. Rice, C., Mendez, P., Brown, S. (2000). *Metal solid freeform fabrication using semi-solid slurries*. Elsevier, Volume 52, Issue #12, 31.

6. Gibson M., Mykulowycz N., Shim J., Fontana R., Schmitt P., Roberts A., Ketkaew J., Shao Ling, Chen Wen, Bordeenithikasem P., Myerberg J., Fulop R., Verminski M., Sachs E., Chiang Yet-Ming, Schuh C., Hart J., Schroers J. (2018). *3D printing metals like thermoplastics: Fused filament fabrication of metallic glasses*. Materials Today: Elsevier, Volume 21, Issue #7, 697.
7. Schroers, J. (2008). *On the formability of bulk metallic glass in its supercooled liquid state*. Acta Materialia: Elsevier, Volume 56, Issue #3, 471-478.
8. Wen, Chen, Ze, Liu, Jan, Schroers (2014). *Joining of bulk metallic glasses in air*. Acta Materialia: Elsevier, Issue #62, 49.
9. Di, Ouyang, N., Wei, Xing J., Zhang L. (2020). *3D printing of crack-free high strength Zr-based bulk metallic glass composite by selective laser melting*. Intermetallics: Elsevier, Volume 38, 457-466.
10. Zhang, C., Wang, W., Li, Y.-C., Yang, Y.-G., Wu, Y., Liu, L. (2019). *3D printing of Fe-based bulk metallic glasses and composites with large dimensions and enhanced toughness by thermal spraying*. (Second edition). Journal of Materials Chemistry A: Elsevier, Volume 5, Issue #22, 1006-1010.
11. Chiu, H., Kumar, G., Blawdziewicz, J., Schroers, J. (2021). *Thermoplastic extrusion of bulk metallic glass*. Acta Materialia: Elsevier, Volume 18, 94-104.
12. Rehm, B., Schubert, J. Hughes, J. (2009). *Managed Pressure Drilling*. Gulf Publishing Company: Elsevier, Chapter 2, 39-80.
13. Kundum, P., Cohen, I., Dowling, D. (2020). *Boundary Layers and Related Topics*. Fluid Mechanics (Eights Edition), Academic Press: Elsevier, Chapter 10, 469-532.
14. Chiu, H., Kumar, G., Blawdziewicz, J., Schroers, J. (2009). *Thermoplastic extrusion of bulk metallic glass*. Yale University: Elsevier, Volume 61, Issue #1, 28-31.
15. Johnson, W.L., Kaltenboeck, G., Demetriou, M.D., Schramm, J.P., Liu, X., Samwer, K., Kim, C.P., Hofmann, D.C. (2011). *Beating crystallization in glass-forming metals by millisecond heating and processing*. California Institute of Technology: Elsevier, Volume 332, Issue #6031, 828-833.
16. Köster, U., Jastrow, L. (2007). *Oxidation of Zr-based metallic glasses and nanocrystalline alloys*. Materials Science and Engineering: Elsevier, Volume 448, 57-62.
17. RAMLAB. (2017). *RAMLAB unveils world's first class approved 3D printed ship's propeller*. <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller>.
18. DNV. (2019). *DNV GL awards thyssenkrupp first Additive Manufacturing Approval of Manufacturer certificate*. <https://www.dnv.com/news/dnv-gl-awards-thyssenkrupp-first-additive-manufacturing-approval-of-manufacturer-certificate-156505>.
19. Alexandra P. (2022). *Taking a Closer Look at 3D Printing Applications in the Maritime Sector*. <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-maritime-applications230820174>.