

ОТРИМАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОБОТИЗОВАНОЇ ДУГОВОЇ 3D ТЕХНОЛОГІЇ

Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда, А.С. Новодранов, А.М. Мангольд, Д.Д. Топчев

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940131@gmail.com

У роботі описаний спосіб формоутворення виробу за допомогою 3D технології з використанням дугового нагріву і витратного матеріалу – дроту діаметром 1,2 мм. Метою роботи є дослідження структури і механічних властивостей виробу, виготовленого за допомогою адитивної 3D технології. Кожен наплавлений шар складається з трьох окремих валиків: двох бокових, які забезпечують задані контури шару, і одного середнього, який заповнює простір між двома боковими. Електродугове наплавлення здійснювалось за допомогою зварювального робота. Застосування робота дало можливість контролювати час між наплавленням шарів, тим самим контролювати ріст зерен. Також застосування робота дає змогу максимально точно відтворити задану деталь по заздалегідь розрахованій та спроектованій моделі з мінімальною похибкою повторювання руху пальника $\pm 0,03$ мм. В результаті досліджено структуру і механічні властивості наплавленого виробу. Показано, що виріб виготовлений за наведеною технологією, має дрібнозернисту феритно-перлітну структуру, розмір зерна коливається у межах від 7 до 10 балів. Досліджено механічні властивості вздовж і поперек наплавлених шарів. Показники практично не відрізняються. Порівняння їх значень з нормативними показало, що вони перевищують нормативні на 10...50 %. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: 3D технологія, сталь марки 09Г2С, структура, електрична дуга, дрот, адитивні технології, електродугове наплавлення, зварювальний робот

Вступ. Сьогодні 3D технології [1, 2] швидко поширюються світом і охоплюють різні сфери діяльності суспільства. У машинобудуванні за допомогою устаткування для 3D друку [3, 4] виготовляються вироби з різних металів і сплавів. Крім того, габарити виробів можуть значно відрізнятися, але всі вони мають виконувати певні функції, які забезпечуються у кожному конкретному випадку необхідними властивостями [5, 6]. Для значної частки металевих виробів визначальними можуть бути механічні властивості. При однаковому хімічному складі сплавів на механічні властивості впливає структура, яка може бути крупнокристалічною, дрібнокристалічною, змішаною або, взагалі, монокристалічною. Для виробів з полікристалічною структурою вважається найкращою однорідна дрібнокристалічна структура. Тому, при розробці адитивних технологій [1, 7] виготовлення виробів складної форми необхідно враховувати вплив параметрів процесу на формування структури.

Матеріали та методи. У експериментах як матеріал, який наплавливали, використовувався дрот діаметром 1,2 мм марки Св08Г2С, хімічний склад якого наведено у табл. 1. Сталь цієї марки має феритно-перлітну структуру, є низьколегованою зі зниженим вмістом вуглецю (менше ніж 0,12 %). В

якості захисного газу було використано газову суміш М21 (80%Ar + 20%CO₂) із витратою 12 л/хв.

Виключно високі механічні властивості та висока термостійкість сталі у діапазоні температур від -70 до 450 °С дозволяють використовувати її в різних виробках відповідальних конструкцій – парове та нафтове обладнання, а також обладнання для зберігання рідини під тиском тощо.

У попередніх дослідженнях з використанням сталі марки 09Г2С при виготовленні деталей простої геометричної форми було доведено, що вибір певних режимів та застосування методів зменшення ліквідації в процесі наплавлення, таких як регулювання температури металу, що наплавляється, регулювання теплового поля на поверхні зварювальної ванни, електромагнітне



Рис. 1. Експериментальна деталь, отримана за допомогою 3D технології

Таблиця 1. Хімічний склад дроту Св08Г2С, мас. %

Si	Mn	C	Ni	S	P	Cr	N
0,7...0,95	1,8...2,1	0,05...0,11	Не більше 0,25	Не більше 0,025	Не більше 0,03	Не більше 0,2	Не більше 0,01

Шаповалов Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5063-9556>, Коляда В.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7539-6626>, Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>, Мангольд А.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0144-8512>, Топчев Д.Д. – <https://orcid.org/0000-0002-7885-7907>

© Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда, А.С. Новодранов, А.М. Мангольд, Д.Д. Топчев, 2024

змішування, вібраційна та акустична обробка та інші дають змогу отримати однорідну структуру деталі [8, 9]. Деталь, структуру якої передбачається досліджувати, має складнішу форму (рис. 1).

В якості обладнання для наплавлення було застосовано зварювальний робот Fanuc ARC MATE 100 iC/7L та зварювальне джерело Fronius TPS 320i.

Металографічні дослідження проводились за методикою оптичної металографії з використанням мікроскопа зі збільшенням до $\times 1000$.

Виготовлення деталі. Шари наплавляли за три проходи. Перші два проходи формували бокові стінки деталі, а третій шар з коливанням дуги («розмазуванням» ванни) накладали всередині – заповнювали проміжок між першими двома шарами. Наплавлення шарів виконувалось за допомогою МАГ зварювання дугою постійної потужності у суміші захисних газів $Ar + CO_2$ з використанням роботизованої системи (рис. 2) [10]. Застосування зварювального робота надає низку переваг, серед яких підвищена точність повторення траєкторії наплавлення, контрольована величина часового проміжку між наплавленням шарів, а також гнучке перепрограмування на деталь іншого розміру або форми. Контроль температури попередньо наплавленого шару визначався за допомогою електронного пірометра, після зниження температури

нижче $70\text{ }^\circ\text{C}$ робот починав наплавлення наступного шару. Технологічні параметри наплавлення наведені у табл. 2.

При наплавленні наступних шарів попередньо наплавлені шари будуть піддаватися термоциклуванню [11]. Це може відобразитися на початковій структурі і механічних властивостях. У даній роботі доцільно провести дослідження мікро- та макроструктури, а також механічних властивостей, які будуть отримані в кінцевому результаті. Зразки для дослідження вирізали вздовж і поперек наплавлених шарів. Величину зерна визначали методом оптичної мікрографії при збільшенні $\times 100$ та порівнювали з еталонним зображенням шкали згідно зі стандартом ISO 643:2019 [12].

Обговорення результатів. Дослідження макроструктури та мікроструктури виконано на шліфах, які були виготовлені зі зразка, що був вирізаний від експериментальної деталі (рис. 1). На макрошліфі (рис. 3) простежуються всі наплавлені шари. Кожен шар складається з трьох зон – двох бокових і середньої.

Неможливо встановити глибину проплавлення попереднього шару, але орієнтовно можна припустити, що вона становить $0,1 \dots 0,3$ мм при товщині шару $1,8 \dots 2,0$ мм.



Рис. 2. Процес роботизованого наплавлення деталі



Рис. 3. Макрошліф наплавленої деталі

Таблиця 2. Технологічні параметри наплавлення шарів в виробу

Вид операції	Сила струму, А	Напруга на дузі, В	Швидкість подачі дроту, м/хв	Швидкість руху дуги, мм/с	Амплітуда коливання, мм	Частота коливання дуги, Гц
Наплавлення 1-3 контурів шару	78,0	16,5	2,0	5,0	–	–
Наплавлення 4-го і усіх наступних контурів шару	66,0	16,0	1,8	5,0	–	–
Заповнення середини шару одним валиком	110,0	16,5	2,8	4,5	3,5	3,0

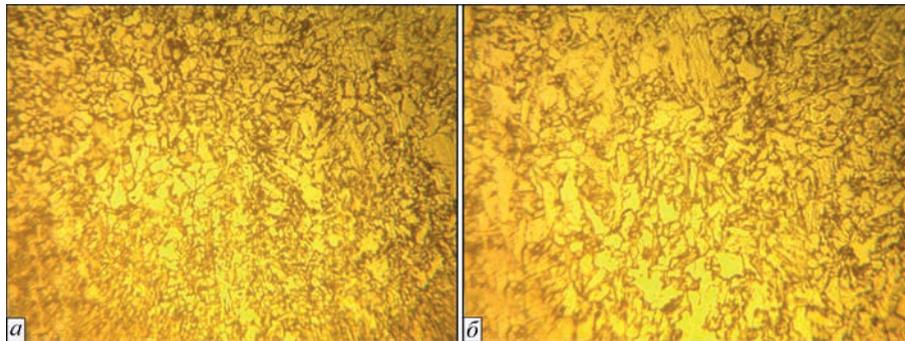


Рис. 4. Мікроструктура (×100) наплавленого шару: а – вздовж шару; б – поперек шару

Таблиця 3. Механічні властивості виробу при випробуванні на розрив за стандартом ASTM E8/E8M [14]

Сплав 09Г2С (відбір зразків)	Межа плинності, МПа	Тимчасовий опір розриву, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %
Вздовж шарів наплавленого металу	399,9	513,8	34,9	77,2
	400,1	515,8	33,0	77,4
	408,4	517,7	35,0	77,1
Поперек шарів наплавленого металу	405,9	514,7	30,7	77,1
	395,7	509,2	31,9	74,1
	398,8	514,0	30,8	76,5
Нормативне (стандартне) значення	345,0	441,1	21,0	–

Необхідно зазначити, що на шліфі відсутні грубі дефекти у вигляді пор, несплавлень тощо. Не зафіксовані також і великі зерна. Структура, при малому збільшенні, оцінюється як дрібнозерниста. Мікрографічне дослідження структури шліфа показало, що структура феритно-перлітна. По висоті і вздовж наплавлених шарів структура високодисперсна, неоднорідна і має різні за розміром зерна (рис. 4).

Неоднорідність структури спостерігається навіть у межах одного шару. Розмір зерен може коливатися в межах від 7 до 10 балу [13].

Неоднорідність структури не є ознакою високих показників міцності виробів. Крім того, на шліфі (рис. 3) прослідковуються контури нанесених шарів. Варто зазначити, що спостерігається різнозернистість. У зв'язку з цим, показники міцності виробу як у горизонтальній, так і у вертикальній площині можуть розрізнятися. Характер руйнування зразків, вирізаних як у вертикальній, так і горизонтальній площині, не розрізняється. Тобто, не виявлено вплив межі з'єднання шарів на механічні властивості. Значення показників міцності наведено у табл. 3.

Механічні властивості виробу, наплавленого за 3D технологією, значно вищі за нормовані показники для сталі 09Г2С. Для різних показників ці значення вищі на 10...50 %.

Висновки

1. Деталь, отримана за 3D технологією, має щільну феритно-перлітну структуру без пор і несплавлень.
2. Структура має різний розмір зерна. Розмір зерна коливається у межах від 7 до 10 балу, а його площа у межах 0,001...0,000125 мм².

3. Механічні властивості металу у поздовжньому і поперечному перетинах практично однакові та перевищують стандартні на 10...50 %.

Список літератури

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
2. Dongaonkar, A.V., Metkar, R.M. (2018) Reconstruction of Damaged Parts by Integration Reverse Engineering (RE) and Rapid Prototyping (RP). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171.
3. (2020) ALL3DP [Електронний ресурс]. *Metal 3d Printer Buyer's Guide*. <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing>
4. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, 5-6, 148–153.
5. Hemnath Anandan Kumar, Senthilkumaran Kumaraguru (2018) Distortion in Metal Additive Manufactured Parts. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 281–295.
6. Костин В.А., Григоренко Г.М. (2017) Особенности формирования структуры 3D изделия из стали S460M в аддитивной металлургической технологии. *Современная электрометаллургия*, 3 (128), 33–42.
7. Дорошенко В.С. (2014) 3D-технологии изготовления отливок как примеры аддитивного производства. *Металл и литье Украины*, 12, 4–9.
8. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. (2015) Подавление ликвационных процессов в крупных слитках. *Современная электрометаллургия*, 1, 26–30.
9. Шаповалов В.А. (2016) Применение сварочных технологий для подавления ликвации в крупных слитках. *Автоматическая сварка*, 5-6(753), 162–165.
10. Shapovalov, E.V., Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A. et al. (2016) Application of robotic and mechanized welding under disturbing factor conditions. *The Paton Welding J.*, 7, 42–46.
11. Yadav, Anshul et al. (2019) Thermal Transport Phenomena in Multi-layer Deposition Using Arc Welding Process. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 15–27.
12. International Standards Office (2019) ISO 643 – Steels – Micrographic determination of the apparent grain size. ISO, Geneva, Switzerland.

13. ASTM E112-13 – *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.
14. ASTM E8 – *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.

References

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
2. Dongaonkar, A.V., Metkar, R.M. (2018) Reconstruction of Damaged Parts by Integration Reverse Engineering (RE) and Rapid Prototyping (RP). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171.
3. (2020) ALL3DP. *Metal 3d Printer Buyer's Guide*. <https://all-3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing>
4. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, 5-6, 148–153.
5. Hemnath Anandan Kumar, Senthilkumaran Kumaraguru (2018) Distortion in Metal Additive Manufactured Parts. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 281–295.
6. Kostin, V.A., Grigorenko, G.M. (2017) Peculiarities of formation of 3D structure of S460M steel product in additive metallurgical technology. *Suchasna Elektrometal.*, 3 (128), 33–42 [in Russian].
7. Doroshenko, V.S. (2014) 3D-technologies for manufacturing castings as the examples of additive production. *Metall i Lityo Ukrainy*, 12, 4–9 [in Russian].
8. Shapovalov, V.A., Grigorenko, G.M. (2015) Suppression of liquation processes in large ingots. *Sovrem. Elektrometal.*, 1, 26–30 [in Russian].
9. Shapovalov, V.A. (2016) Application of welding technologies for suppression of liquation in large ingots. *The Paton Welding J.*, 5-6(753), 162–165.
10. Shapovalov, E.V., Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A. et al. (2016) Application of robotic and mechanized welding under disturbing factor conditions. *The Paton Welding J.*, 7, 42–46.
11. Yadav, Anshul et al. (2019) Thermal Transport Phenomena in Multi-layer Deposition Using Arc Welding Process. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 15–27.
12. International Standards Office (2019) ISO 643: *Steels. Micrographic determination of the apparent grain size*. ISO, Geneva, Switzerland.
13. ASTM E112-13: *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.
14. ASTM E8: *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.

METAL PRODUCTS MANUFACTURED WITH ARC 3D ROBOTIC TECHNOLOGY

E.V. Shapovalov, V.O. Kolyada, A.S. Novodranov, A.M. Mangold, D.D. Topchev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: artur19940131@gmail.com

This paper describes the method of shaping the product using 3D technology by means of applying arc heating and consumable material – a wire with a diameter of 1.2 mm. The aim of the work is to study the structure and mechanical properties of the product manufactured using additive 3D technology. Each deposited layer consists of three separate beads: two lateral ones, which provide the set contours of the layer, and one middle one, which fills the space between the two lateral ones. Electric arc surfacing was carried out with the help of a welding robot. The use of a robot made it possible to control the time between layer depositions, thereby controlling grain growth. Also, the use of a robot makes it possible to reproduce a set part as accurately as possible according to a pre-calculated and designed model with a minimum error of repetition of the torch movement of ± 0.03 mm. As a result, the structure and mechanical properties of the deposited product were investigated. It is shown that the product manufactured according to the presented technology has a fine-grained ferrite-pearlite structure; the grain size ranges from 7 to 10 numbers. The mechanical properties along and across the deposited layers were studied. The indices practically do not differ. A comparison of their values with normative ones showed that they exceeded normative values by 10–50%. 14 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

Key words: 3D technology, 09G2S steel, structure, electric arc, wire, additive technologies, electric arc surfacing, welding robot

Надійшла до редакції 15.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 26.02.2024

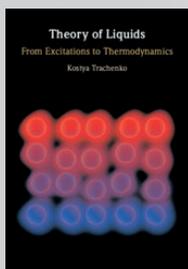
Прийнято 18.03.2024

Передбачення температури плавлення матеріалів

Костя Траченко, який здобув ступінь доктора наук у Кембриджському університеті та магістра у Львівському, розробив нову теорію, яка вирішує давню проблему фізики – передбачення температури плавлення матеріалів. Його дослідження, опубліковане в журналі *Physical Review E*, є значущим кроком у розумінні фундаментальних властивостей матерії і фазових переходів. Протягом десятиліть учені стикалися з проблемою



відсутності універсального опису лінії плавлення на фазових діаграмах температура-тиск. Але тепер теорія професора Траченка, заснована на останніх досягненнях у теорії рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», – пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-ССР за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».



Theory of Liquids. From Excitations to Thermodynamics
Kostya Trachenko
Queen Mary University of London 2023, 300 стор.,
ISBN: 9781009355476