

PACS numbers: 05.70.Np, 07.20.-n, 46.25.Hf, 62.20.-x, 81.20.Vj, 81.70.Bt

Адитивні матеріали для виробництва тонкостінних циліндричних оболонок

В. А. Костін, Г. М. Григоренко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

У роботі представлено результати моделювання температурних полів, напружень і деформацій у разі формування адитивної багатопшарової конструкції з алюмінієвого стопу 1561, низьколегованої конструкційної сталі марки 09Г2С і титанового стопу марки Grade 2. На підставі експериментальних результатів, одержаних раніше у ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України під час нагрівання адитивних шарів з даних матеріалів, було проведено комп'ютерне моделювання з метою підвищення продуктивності адитивного процесу. У ході розрахунків проаналізовано алгоритм послідовності нанесення адитивних шарів — нагрівання циліндричної оболонки по кільцю або по спіралі — на розподіл температур в оболонці та параметри її стійкості до зовнішніх навантажень. Встановлено, що у разі формування циліндричних оболонок адитивним методом доцільно використовувати технологію нагрівання по спіралі та застосовувати менш теплопровідні матеріали — конструкційні сталі та титанові стопи.

Ключові слова: адитивне виробництво, моделювання, нагрівання по спіралі, циліндричні оболонки, стійкість, титановий стоп Grade 2.

The paper presents the results of modelling of temperature fields, stresses, and strains during additive multi-layer construction formation from the aluminium alloy 1561, low-alloyed structural steel 09G2S, and titanium alloy Grade 2. Based on the experimental results, which obtained earlier in E. O.

Corresponding author: Valeriy Anatoliyovych Kostin
E-mail: valerykkos@gmail.com

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. A. Kostin and H. M. Hryhorenko, Additive Materials for Producing Thin-Wall Cylindrical Shells, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1089–1103 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.08.1089](https://doi.org/10.15407/mfint.43.08.1089).

Paton Electric Welding Institute of the N.A.S. of Ukraine about additive surfacing of these materials, a computer modelling to improve the technology of the additive process is carried out. In the course of the calculations, the influence of the algorithm of the sequence of deposition of additive layers—the surfacing of a cylindrical shell along a ring or spiral—is analysed on the temperature distribution in the cladding and its resistance to external loads. As established, during the formation of cylindrical shells by the additive method, it is advisable to use the technology of surfacing along a spiral and to use less thermally conductive structural materials—structural steels and titanium alloys.

Key words: additive production, modelling, spiral welding, cylindrical shells, stability, titanium alloy Grade 2.

(Отримано 15 травня 2019 р.; остаточн. варіант — 10 червня 2021 р.)

1. ВСТУП

У сучасному будівництві, авіаційній і космічній техніці, а також в ряді інших областей промислового виробництва велике значення має використання тонкостінних оболонок з різних матеріалів [1]. Такі оболонки можуть використовуватися як корпуси ракетних двигунів твердого палива, будівельні куполоподібні споруди, резервуари для зберігання активних і криогенних рідин, тобто як конструкції, що працюють за високих внутрішніх тисків та вісесиметричного зовнішнього навантаження.

Використання тонкостінних оболонок дозволяє значно знизити вагу металоконструкції зі збереженням максимального об'єму, забезпечити необхідну міцність і жорсткість конструкції, дозволяє використовувати різноманітніші складні просторові форми для проектування конструкцій різних типів.

Традиційно такі оболонки одержують методом інструментального або магнето-імпульсного штампування, електрогідравлічною штампуванням або штампуванням вибухом, ротаційної витяжки, вигину тонколистового прокату і подальшого з'єднання його країв зварюванням [2].

У разі використання оболонок змінної товщини виникає проблема видалення надлишків матеріалу. Це досягається шляхом механічного фрезерування або хемічного травлення, що значно збільшує тривалість процесу його виготовлення і значно збільшує вартість виробництва. Механічні дефекти, що виникають в ході цих операцій, роблять його непридатним для відновлення шляхом ремонту.

Поновлення інтересу до вивчення тонкостінних конструкцій обумовлено не тільки появою нових матеріалів і стопів, бурхливим розвитком комп'ютерних технологій, але і можливістю використання нових методів одержання деталей та їхніх компонентів за до-

помогою адитивних технологій [3, 4].

Нині багато світових компаній почали використовувати адитивну технологію 3D-друку для виготовлення своєї продукції. На початку 2018 року відома американська аерокосмічна корпорація Lockheed Martin представила перший надрукований на 3D-принтері бак для ракетного палива з титанового стопу (рис. 1) [5].

Вибір титану було обумовлено його високою питомою міцністю, термо- та корозійною стійкістю. У разі використання традиційних технологій виробництва циліндричних паливних баків, переважно, до 70–80% цінного матеріалу спрямовуються у відходи, що перероблюються [5]. Новий спосіб друку від Lockheed Martin дозволяє в значній мірі (за даними компанії до 87%) економити на виробництві цих баків. Компанія вже використовувала цю технологію для створення супутникової системи зв'язку і компонентів для міжпланетної станції NASA Juno, а також планує виготовити зовнішню оболонку для космічного корабля «Оріон» із використанням технології 3D-друку.

Адитивні технології — це новий високоефективний метод створення деталей і конструкцій, заснований на пошаровому додаванні невеликих порцій рідкого матеріалу та її наступної кристалізації в процесі виробництва. Вироби і матеріали створюють шляхом нагрівання порошку металевого порошку [4], суцільного дроту або порошкового дроту [6] концентрованими джерелами нагріву (дугою, лазером, електронним променем та ін.).

Використання металевого дроту замість порошку в адитивному

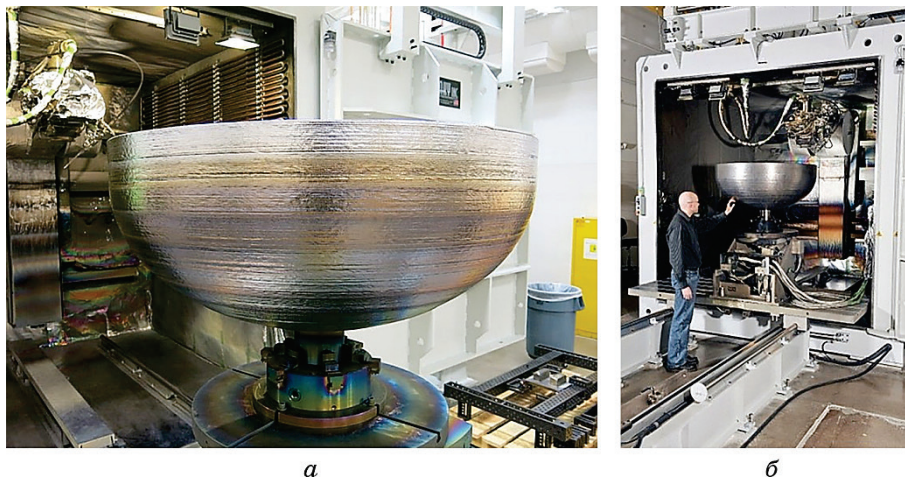


Рис. 1. Бак ракетного палива (а) і електронно-променева камера для 3D-друку (б).

Fig. 1. Rocket fuel tank (a) and electron beam camera for 3D printing (b).

процесі дозволяє підвищити продуктивність металургійних процесів, забезпечити більш високу енергоефективність, підвищити коефіцієнт використання матеріалу. Використання адитивного методу для ремонту тонкостінних оболонок може дозволити відновити їхню структурну цілісність і несучу здатність. Водночас створення працюючої тонкостінної конструкції вимагає проведення попередніх лабораторних досліджень та всебічного комп'ютерного моделювання.

Метою представленої роботи було встановити вплив геометрії нанесення та типу матеріалу, що використовується, на особливості формування тонкостінної оболонки, що одержана адитивним методом на основі моделювання температурних полів, напружень і деформацій.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У зв'язку з тим, що тонкостінні конструкції широко використовуються в аерокосмічній техніці, суднобудуванні та промисловому будівництві, для моделювання особливостей формування структури було обрано три типи матеріалів: титановий стоп марки Grade 2, конструкційна низьколегована сталь марки 09Г2С та алюмінієвий стоп марки АМг61.

У зв'язку з особливостями формування конструкцій з титанових стопів (висока потужність джерела нагріву, наявність високого вакууму в камері нанесення) використовували спеціалізовану систему адитивного натоплення xBeam 3D Metal Printing [7]. Система заснована на застосуванні порожнистого кінцевого електронного променя як джерела нагріву і використанні дроту як матеріалу, що витрачається. Це створює сприятливі умови для розтоплення матеріалу та його пошарового контролюваного натоплення.

Для натоплення виробів з конструкційної сталі використовували систему дугового натоплення для створення адитивних структур [8]. Вона заснована на використанні зварювального робота «ABB IRB-1600».

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України розробив програмне забезпечення для створення тривимірної моделі, заснованої на скануванні поверхні натоплення, плануванні траєкторії руху зварювального пальника з урахуванням корекції даних лазерно-телевізійних і відео-пірометричних датчиків.

Тонкостінні вироби з дослідних матеріалів показано на рис. 2. Як матеріал для адитивного натоплення тривимірних виробів використовували зварювальні дроти відповідного складу і товщини.

З метою поліпшення технології процесу створення тонкостінних оболонок адитивним методом, скорочення часу і матеріальних ресурсів необхідне на його проведення було використано комп'ютерне

моделювання.

Для моделювання був використаний титановий стоп марки Grade 2 (BT1-0), що містить 0,03% N, 0,1% C, 0,25% O, 0,3% Fe. Межа плинності стопу становила 275 МПа, межа міцності — 345 МПа. За низьколеговану сталь обрали сталь марки 09Г2С, яку широко застосовують для зварних конструкцій, що містить 0,12% C, 0,6% Si, 1,5% Mn, 0,3% Cu, 0,04% S, 0,003% P. Межа плинності сталі становила 345 МПа, межа міцності — 490 МПа, відносне видовження — 21%.

У зв'язку з тим, що в практиці створення циліндричних оболонок для аеро- та ракето-космічної техніки широко поширене використання високоміцних алюмінієвих стопів, то було доцільно застосувати розроблені підходи до аналізу створення адитивних оболонок для даних стопів. У зв'язку з обмеженням доступу до експериментальних результатів у цій галузі, за матеріал, який моделюють, обрали алюмінієвий стоп, що деформується, марки 1561 (АМг61). Алюмінієвий стоп 1561 містить 6,1% Mg, 0,9% Mn, 0,4% Si, 0,4% Fe, 0,003% Be, 0,12% Zr. Алюмінієвий стоп має межу плинності ~ 250 МПа, межу міцності ~ 360 МПа. Даний стоп широко використовують для виробництва тонкостінних елементів аеро-космічної техніки.

Геометрія циліндричної оболонки являє собою шар матеріалу шириною 2 мм і товщиною шару 2 мм, що послідовно наносять на підкладку по колу з радіусом 20 мм. Кількість нанесених шарів має задовольняти умовам тонкої стінки, тобто оболонка вважається тонкою, якщо $h/R \leq 1/10 - 1/20$. Виходячи з обраних параметрів на-

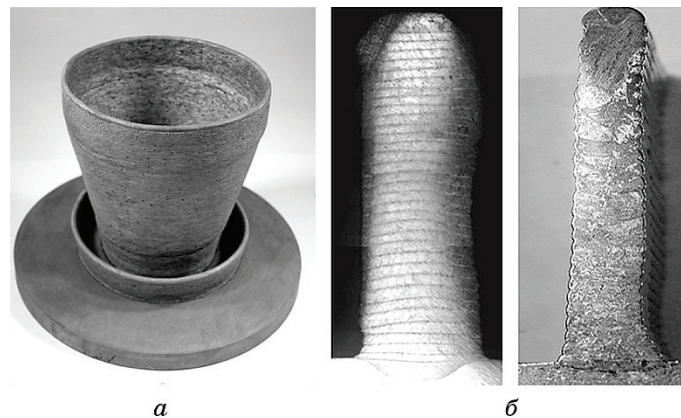


Рис. 2. Адитивні натоплення з дослідних матеріалів: низьколегована сталь марки 09Г2С (а), титановий стоп марки Grade 2 (б).

Fig. 2. Additive surfacing of the materials under study: low-alloy steel 09G2S (a), titanium alloy Grade 2 (b).

ТАБЛИЦЯ 1. Технологічні параметри адитивного натоплення.**TABLE 1.** Technological parameters of additive fusion.

Технологічні параметри	Значення
Потужність джерела нагріву (Al/Fe/Ti), кВт	0,6/1/5
Товщина підкладки, мм	5
Товщина одного шару, мм	2
Ширина натоплення, мм	2
Радіус натоплення, мм	20
Висота натоплення, мм	40
Кількість шарів	20
Швидкість дуги зварювання, с ⁻¹	0,1; 0,2; 1
Кількість шарів, що натоплюються	20–30

несення шарів (табл. 1), ця умова виконується, коли кількість шарів перевищує 10.

Вибір потужності джерела дугового нагріву визначався характерними режимами зварювання для даного типу матеріалу: електронно-променевого зварювання титанових стопів (5 кВт), дугового зварювання в середовищі захисних газів низьколегованих сталей (1 кВт) і дугового зварювання алюмінієвого стопу, який топлять (0,6 кВт).

У роботі було досліджено два способи нанесення адитивних шарів — по кільцю та по спіралі. Кутову швидкість натоплення одного шару визначали з технологічних можливостей установок і вона становила 0,1, 0,5, 1 с⁻¹. Для моделювання використовували обчислювальний пакет COMSOL Multiphysics®. Математичну модель адитивного процесу було раніше представлено в роботах [9, 10]. На підставі експериментальних результатів було прийнято, що в початковий момент часу матеріал, який натоплюють, знаходиться у твердо-рідкому стані між температурами солідусу та ліквідусу стопу. З цієї причини у розрахунках можливо знехтувати гідродинмікою рідкої фази та кінетикою її кристалізації.

Для чисельного аналізу кінетики зміни температурного поля в оболонці розв'язувалось тривимірне нестационарне рівняння теплопровідності:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T \right) = \nabla [k(T) \nabla T], \quad (1)$$

де C_p — питома теплоємність, а k — коефіцієнт теплопровідності матеріалу. Граничні умови, необхідні для розв'язання рівняння (1), визначаються балансом тепла, яке підводять, та тепловідведенням

від поверхонь деталі, яку натоплюють. Передача тепла в області контакту виробу, що натоплюють з підкладкою можна описати законом Ньютона, тоді як теплове випромінювання на вільних поверхнях — законом Стефана–Больцмана. Граничні умови для рівняння теплопровідності (1) мають такий вигляд (2):

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} h(T - T_{\text{ext}}) & \text{на ділянці контакту,} \\ h(T - T_{\text{ext}}) + \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{\text{ext}}^4) - q_{\text{arc}} - q_{\text{wire}} & \\ \text{на вільних поверхнях,} \end{cases} \quad (2)$$

де n — нормаль до поверхні, $h = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ — коефіцієнт конвективної теплопровідності, $\varepsilon = 0,8$ — коефіцієнт випромінювання матеріалу, σ_0 — постійна Стефана–Больцмана, $T_{\text{ext}} = 293 \text{ К}$ — температура навколишнього середовища, q_{arc} — щільність теплового потоку, що створюють дуговим джерелом тепла, q_{wire} — кількість тепла, яке виділяється розтопленням дротом.

Розподіл щільності теплового потоку дуги, що рухається, $q_{\text{arc}}(X, Y, t)$ задавали рівнянням:

$$q_{\text{arc}}(X, Y, t) = q_{\text{max}} \exp \left[-K_x \left(\frac{X - Xg}{R} \right)^2 - K_y \left(\frac{Y - Yg}{R} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где Xg, Yg — координати джерела тепла, $q_{\text{max}} = \eta UaIw$ — потужність дуги, η — коефіцієнт корисної дії (0,5–0,9) джерела [12], Ua — напруження дуги, Iw — струм дуги, K_x і K_y — коефіцієнти концентрації питомої джерела тепла.

Розподіл щільності теплового потоку від розтопленого дроту $q_{\text{wire}}(X, Y, t)$ задавали рухом кромки, яка формує шар, з кутовою швидкістю ω за постійної температури $T_{\text{wire}} = T_{\text{melt}}$. Для досліджених матеріалів T_{melt} становила 625, 1504 і 1716°C відповідно.

Шляхом чисельного рішення температурної крайової задачі (1)–(3) в рамках цієї роботи визначали кінетику температурних полів в оболонках, що натоплюють. На основі цих чисельних результатів прогнозували кінетику напружено-деформованого стану конструкції. На цьому етапі дослідження вирішення кінцево-елементного розв'язку задачі нестационарної термопружності проводилось шляхом послідовного визначення пружних і термічних деформацій від початку процесу нагрівання аж до повного охолодження конструкції.

Для нестационарних умов послідовного нанесення адитивних шарів справедливо рівняння (4):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla(FS)^T + F_v, \quad (4)$$

де u — повне переміщення, S — тензор напружень, $F = I + \nabla u$ — деформацийний градієнт.

Для моделі лінійно-пружного матеріалу тензор повної деформації записують у термінах градієнта зсуву (5):

$$\varepsilon = 0,5[(\nabla u)^T + \nabla u + (\nabla u)^T \nabla u]. \quad (5)$$

Закон Дюамеля–Гука (Duhamel–Hooke's) пов'язує тензор напружень з тензором деформації і температурою:

$$S = S_0 + C : (\varepsilon_0 - \varepsilon_{el} - \varepsilon_{th}), \quad (6)$$

$$\varepsilon_{el} = 0,5(F_{el}^T F_{el} - I), \quad C = C(E, \nu), \quad (7)$$

де C — тензор пружності 4-го порядку, «:» — знак множення тензорів, S_0 і ε_0 — початкові напруги і деформації, ε_{el} і $\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$ — тензор пружних і термічних деформацій, а α — тензор теплового розширення.

Були покладені граничні умови на переміщення по осі $u_{zz} = 0$. Приймалося, що переміщення на межах двох сусідніх шарів були однакові $u_{xx}^1 = u_{xx}^2$ та $u_{yy}^1 = u_{yy}^2$. Переміщення першого шару з боку підкладки були прийняті рівними 0, тобто покладено повне зчеплення шарів між собою і підкладкою.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У результаті моделювання розраховано поля температур, напруг, деформацій та переміщень у разі формування циліндричних оболонок адитивним методом. Температурні поля в оболонці з титанового стопу Grade 2 в часі показані на рис. 3.

Аналіз одержаних результатів показав практично рівномірний розподіл температури по товщині нанесеного шару. Розподіл температур по висоті оболонки показав, що температура підкладки практично не змінюється після нагрівання 9–10 шарів. Її температура не перевищує 200–230°C, і, отже, його структурно-фазовий стан в подальшому не змінюється.

Розрахунки показують, що у разі нагрівання дротом зі сталі 09Г2С через 35–40 с температура нижчих шарів більше не підвищується вище температури A_{c1} за якої відбувається повторне $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -перетворення. Небезпека повторного підвищення температури може привести до помітного зростання розміру зерна і «фазового» наклепу. Для алюмінієвого стопу 1560 цей час становить 65–70 с, тоді як для титанового стопу Grade 2 цей час становить більше 90 с.

Розрахунки показують, що залежно від складу дроту, який використовують, максимальна температура нагрівання перевищує

ла температуру топлення даного матеріалу на $50\text{--}75^\circ\text{C}$ (для алюмінієвого стопу 1561), на $100\text{--}150^\circ\text{C}$ (для сталі 09Г2С) і на 200°C (для титанового стопу Grade 2).

Аналіз розподілу температур по висоті нагрівання показує (рис. 4), що залежно від типу використовуваного матеріалу вплив розтопленого дроту на попередні шари різний. Так, найбільшого відпускання в результаті впливу попередніх шарів досягається у разі нагрівання алюмінієвого стопу 1561, яке поширюється на нижні 8–10 шарів (рис. 4, а). У разі нанесення розтопленого дроту зі сталі 09Г2С або титанового стопу Grade 2 цей вплив істотно менше. Для сталі воно складає 3–4 шари, для титанового стопу — 1–2 шари (рис. 4, б, в). Одержані результати пояснюються помітно більш високою теплопровідністю алюмінієвого стопу ($100\text{--}150\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) порівняно зі сталю ($23\text{--}28\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) та титановим стопом ($17\text{--}25\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

Циліндрична конструкція з алюмінієвого стопу 1561 охолоджується помітно повільніше і повторний розігрів досягає більш глибоких шарів, що призводить до зростання розміру зерна і помітного знеміцнення виробів з цих стопів.

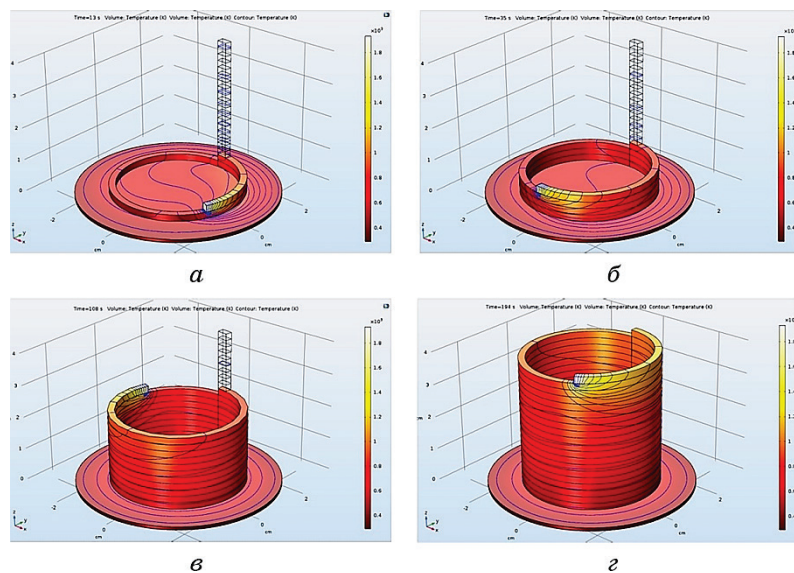


Рис. 3. Розподіл температури в циліндричній оболонці з титанового стопу Grade 2, одержаний зі швидкістю $0,1\text{ с}^{-1}$, за часом: 13 с (а), 35 с (б), 108 с (в), 194 с (г).

Fig. 3. The temperature distribution in the cylindrical shell of titanium alloy Grade 2, obtained at a speed of 0.1 s^{-1} , over time: 13 s (a), 35 s (б), 108 s (в), 194 s (г).

В ході розрахунків було проаналізовано вплив алгоритму нанесення адитивного циліндричного натоплення — натоплення по кільцю або по спіралі — на температуру натоплення та параметри стійкості адитивної оболонки до зовнішніх навантажень (рис. 5).

У більшості робіт з моделювання адитивного натоплення ефект форми натоплення не враховано. Це пов'язано з тим, що в цьому випадку у розрахунках необхідно враховувати гідродинаміку краплі, процеси кристалізації, взаємодія крапель між собою і т.п. Для того, щоб уникнути цих складнощів і наблизитися до реальної геометрії натоплення форму нанесеного шару по перетину задавали заздалегідь. У більшості випадків бокова поверхня натоплення має хвилюподібний «ребристий» характер, причому її вид залежить від товщини шару, швидкості натоплення та матеріалу натоплення.

В ході роботи було прийнято, що у разі натоплення по кільцю і по спіралі формується різний поперечний переріз натоплених шарів. Без деформації площа контакту сусідніх шарів натоплення в обох випадках однакова. З деформацією площа контакту сусідніх шарів у разі натоплення по спіралі збільшується внаслідок викривлення геометрії поверхні, тоді як у разі натоплення по кільцю — ні. Збільшення площі контакту вимагає підвищення рівня напруження для одержання однакового рівня деформації. Мабуть, цими причинами і пояснюються істотні зміни в поведінці оболонок одержаних різними методами.

Аналіз одержаних результатів показав, що спіралеподібне натоплення нагрівається до більш високих температур порівняно з кільцевим натопленням. Це, мабуть, пов'язано зі зниженою передачею тепла між шарами. До того ж натоплення швидше охолоджується, що визначається більшою площею поверхні, яка охолоджується.

Параметри охолодження циліндричного натоплення менш теплопровідного титанового стопу Grade 2 порівняно з натопленням зі

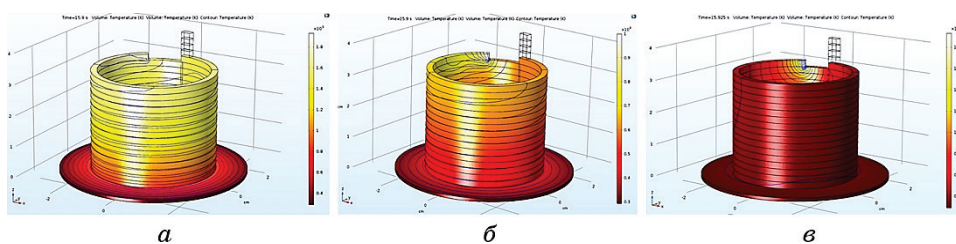


Рис. 4. Вплив матеріалу натоплення на температурне поле в ньому: стоп 1561 (а), сталь 09Г2С (б), Grade 2 (в).

Fig. 4. Effect of hardfacing material on the temperature field in it: alloy 1561 (a), steel 09G2S (b), Grade 2 (c).

сталі 09Г2С забезпечують більш високі рівні температур. Як наслідок, можливе підвищення перегріву рідкої ванни і вихід з діапазону температур твердо-рідкого стану для даного стопу ($T_{\text{sol}}/T_{\text{liq}}$). Тим самим підвищується ризик «протікання» рідкого розтопу по боковій поверхні циліндричного натоплення.

У роботі проаналізовано відмінність механічної стійкості циліндричних адитивних оболонок, одержаних різними методами.

Для аналізу стійкості циліндричних оболонок, одержаних адитивним методом, необхідно брати до уваги наявність залишкових напружень, які формуються в оболонці після охолодження виробу. Водночас, як показали попередні дослідження [10, 11], найбільший рівень колових залишкових напружень спостерігається в нижній частині оболонки, ближче до підкладки. У цьому випадку рівень напруження у разі натоплення виробу з титанового стопу BT1-0 може досягати 300–350 МПа [11].

Характер розподілу напружень в циліндричних оболонках, одержаних різними методами, під дією осьового стискного навантаження $P = 50$ МПа наведено на рис. 6. Як видно з наведених результатів, наявність напружень, що утворюються в процесі адитивного натоплення, змінює загалом характер розподілу напружень в оболонках під дією осьового стискного навантаження.

Аналіз одержаних результатів (рис. 6) показує, що характер цих напружень істотно залежить від способу формування оболонки. Відмінності, перш за все, полягають в рівні напружень, що утворюються в них. Найбільші напруження (55–60 МПа) формуються в оболонці, що виконано кільцевими шарами, тоді як найменші (35–40 МПа) формуються в багат шаровій оболонці, що виконано по спіралі. Цей результат, можливо, пояснюється деяким демпфіру-

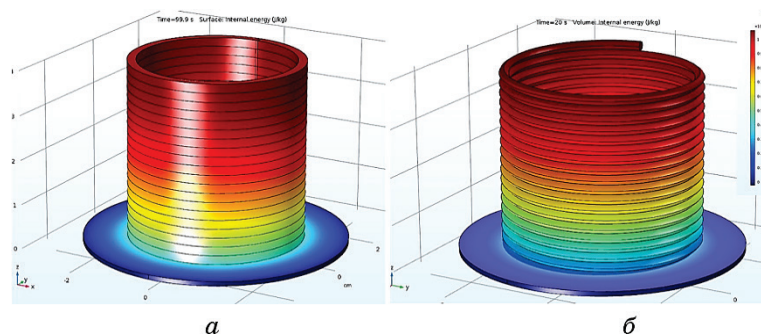


Рис. 5. Вплив послідовності нанесення адитивних шарів титанового стопу Grade 2 на температурне поле: по кільцю (а), по спіралі (б).

Fig. 5. The effect of the sequence of deposition of additive layers of titanium alloy Grade 2 on the temperature field: on the ring (a), on a spiral (b).

ванням зовнішнього вісісиметричного навантаження шарами нато-
плення, розташованого по спіралі.

Аналіз стійкості оболонок, одержаних різними методами, до дії
осьового стискного навантаження представлено на рис. 7. Під втра-
тою стійкості малася на увазі втрата форми конструкції під дією зо-
внішніх сил. Для визначення початку формування пластичних де-
формацій використовувалася умова плинності по Мизесу (8):

$$g(\sigma) = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2\sigma_{ts}^2}} - 1 \geq 0, \quad (8)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — головні нормальні напруження, σ_{ts} — межа плинності.

Аналіз стійкості оболонок, одержаних різними методами, до дії
зовнішнього осьового навантаження представлено на рис. 7. Дослі-
дження циліндричних оболонок, виконаних різними методами, по-
казало, що у разі багатошарового натоплення по спіралі досягаєть-
ся найбільший рівень критичних напружень (175–185 МПа), за
яких вона втрачає стійкість порівняно з оболонками, одержаними
із суцільного листа (120–130 МПа) багатошаровим натопленням по
кільцю (145–155 МПа).

Підвищена стійкість до зовнішнього осьового навантаження ади-

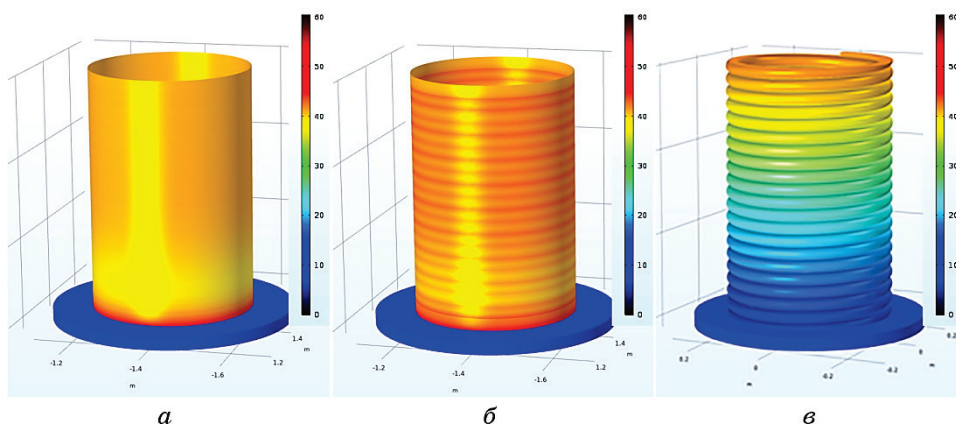


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень під дією осьового навантажен-
ня 50 МПа в циліндричних оболонках з титанового сплаву Grade 2, одержан-
них різними методами: традиційним з листа (а), багатошаровим нато-
пленням по кільцю (б), багатошаровим натопленням по спіралі (в).

Fig. 6. The equivalent stress distribution in a cylindrical shell from titanium
alloy Grade 2 under the action of an axial external load of 50 MPa, obtained by
various methods: traditional from a sheet (a), multi-layer surfacing along the
ring (b), multi-layer welding along a spiral (c).

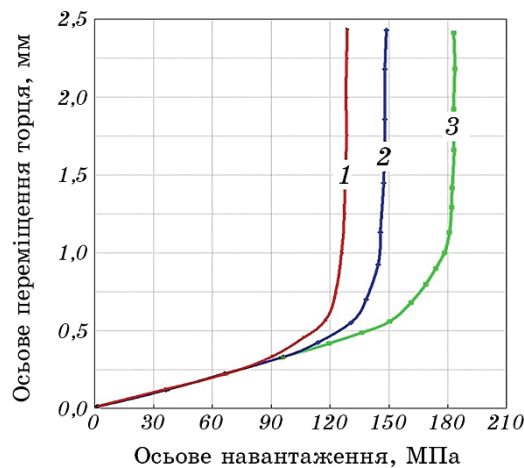


Рис. 7. Стійкість циліндричних оболонок, одержаних різними методами, до дії осьового стискного навантаження: 1 — з суцільного листа, 2 — з багатошарового натоплення по кільцю, 3 — з багатошарового натоплення по спіралі.

Fig. 7. Stability of cylindrical shells obtained by various methods to the action of axial compressive load: 1—from a continuous sheet, 2—from multilayer surfacing along a ring, 3—from multilayer surfacing along a spiral.

тивних оболонок, одержаних натопленням по спіралі, можливо, пов'язана з розрахунковою геометрією шарів, які натоплюють.

4. ВИСНОВКИ

1. Адитивна технологія формування циліндричних оболонок більше підходить для матеріалів з низьким рівнем теплопровідності — сталі та титанових сплавів. Це пов'язано з тим, що вплив повторного нагріву від наступних шарів надає помітно менший вплив на попередні шари, що перешкоджає росту зерна і помітному зменшенню виробів з цих сплавів.

2. Розрахунки показали, що адитивні оболонки, одержані натопленням по спіралі мають більш високу стійкість до зовнішнього осьового навантаження, що, можливо, пов'язано з розрахунковою геометрією шарів, які натоплюють.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. С. Н. Кривошапко, *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, № 1: 51 (2013).
2. В. А. Барвинок, *Высокоэффективные технологические процессы*

изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов (Москва: Наука и технологии: 2002).

3. В. В. Жуков, Г. М. Григоренко, В. А. Шаповалов, *Автоматическая сварка*, № 5–6: 148 (2016).
4. Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez, *Mechanical Engineering*, **2012**: 208760.
5. Robert Brooks, *Lockheed Now 3D-Printing Giant Titanium Parts for Satellites*.
6. Z. Jandric, M. Labudovic, and R. Kovacevic, *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, **44**, Iss. 7–8: 785 (2004).
7. Д. В. Ковальчук, В. И. Мельник, И. В. Мельник, Б. А. Тугай, *Автоматическая сварка*, № 12: 26 (2017).
8. Е. В. Шаповалов, В. В. Долиненко, В. А. Коляда, Т. Г. Скуба, Ф. С. Клишчар, *Автоматическая сварка*, № 7: 46 (2016).
9. В. А. Костин, Г. М. Григоренко, *Современная электрометаллургия*, **128**, № 3: 33 (2017).
10. В. А. Костин, Г. М. Григоренко, В. В. Жуков, *Современная электрометаллургия*, **127**, № 2: 35 (2017).
11. О. В. Махненко, А. С. Миленин, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, С. С. Козлитуна, Л. И. Дзюбак, Д. В. Ковальчук, *Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах (10–14 сентября, 2018, Одесса)* (Киев: Международная ассоциация «Сварка»: 2018), с. 68.
12. Н. Н. Рыкалин, *Расчеты тепловых процессов при сварке* (Москва: Машгиз: 1951).

REFERENCES

1. S. N. Krivoshapko, *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy*, No. 1: 51 (2013) (in Russian).
2. V. A. Barvinok, *Vysokoeffektivnye Tekhnologicheskie Protsessy Izgotovleniya Elementov Truboprovodnykh i Toplivnykh Sistem Letatel'nykh Apparatov* [Highly Efficient Technological Processes of Manufacturing Elements of Pipeline and Fuel Systems of Aircraft] (Moscow: Nauka i Tekhnologii: 2002) (in Russian).
3. V. V. Zhukov, G. M. Grigorenko, and V. A. Shapovalov, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 5–6: 148 (2016) (in Russian).
4. Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez, *ISRN Mechanical Engineering*, **2012**: 208760 (2012).
5. Robert Brooks, *Lockheed Now 3D-Printing Giant Titanium Parts for Satellites*.
6. Z. Jandric, M. Labudovic, and R. Kovacevic, *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, **44**, Iss. 7–8: 785 (2004).
7. D. V. Kovalchuk, V. I. Melnik, I. V. Melnik, and B. A. Tugaj, *Avtomatic Welding*, No. 12: 26 (2017) (in Russian).
8. E. V. Shapovalov, V. V. Dolinenko, V. A. Kolyada, T. G. Skuba, and F. S. Klishchar, *Avtomatic Welding*, No. 7: 46 (2016) (in Russian).
9. V. A. Kostin and G. M. Grigorenko, *Elektrometallurgy Today*, **128**, No. 3: 33 (2017) (in Russian).
10. V. A. Kostin, G. M. Grigorenko, and V. V. Zhukov, *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **127**, No. 2: 35 (2017) (in Russian).

11. O. V. Makhnenko, A. S. Milenin, E. A. Velikoivanenko, G. F. Rozynka, N. I. Pivtorak, S. S. Kozlitina, L. I. Dzyubak, and D. V. Koval'chuk, *Matematicheskoe Modelirovanie i Informatsionnye Tekhnologii v Svarke i Rodstvennykh Protsessakh (September 10–14, 2018, Odesa)* (Kyiv: Mezhdunarodnaya Assotsiatsiya 'Svarka': 2018), p. 68 (in Russian).
12. N. N. Rykalin, *Raschety Teplovykh Protsessov pri Svarke* [Calculations of Thermal Processes during Welding] (Moscow: Mashgiz: 1951) (in Russian).