

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ, НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ*

В.А. Костин, Г.М. Григоренко

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе представлены результаты моделирования температурных полей, напряжений и деформаций при формировании аддитивной многослойной конструкции из алюминиевого сплава 1561, низколегированной конструкционной стали марки 09Г2С и титанового сплава марки Grade 2. На основании экспериментальных результатов, полученных ранее в ИЭС им. Е.О. Патона при нанесении аддитивных наплавов из данных материалов, было проведено компьютерное моделирование для улучшения технологии проведения аддитивного процесса. В ходе расчетов было проанализировано влияние алгоритма последовательности нанесения аддитивных слоев — наплавление цилиндрической оболочки по кольцу или по спирали — на распределение температур в наплавке и ее устойчивость к внешним нагрузкам. Установлено, что при формировании цилиндрических оболочек аддитивным методом целесообразно использовать технологию наплавления по спирали и применять менее теплопроводные конструкционные материалы — конструкционные стали и титановые сплавы. Библиогр. 10, рис. 7.

Ключевые слова: аддитивное производство, моделирование, наплавление по спирали, цилиндрические оболочки, устойчивость, остаточные напряжения

В современном строительстве, авиационной и космической технике, а также в ряде других областей промышленного производства большое значение имеет использование тонкостенных оболочек из различных материалов [1]. Такие оболочки могут использоваться как корпуса ракетных двигателей твердого топлива, строительные куполообразные сооружения, резервуары для хранения активных и криогенных жидкостей, т.е. как конструкции, работающие при высоких внутренних давлениях при осесимметричной внешней нагрузке.

В качестве сырья для их производства часто используются различные конструкционные стали, титановые и алюминиевые сплавы, композитные материалы на основе титана, алюминия и керамики.

Использование тонкостенных оболочек позволяет значительно снизить массу конструкции при сохранении максимального объема, обеспечить ее необходимую прочность и жесткость, использовать самые разнообразные сложные формы при проектировании изделий различных типов.

Традиционно такие оболочки получают методом инструментальной или магнито-импульсной штамповки, электрогидравлической штамповкой или штамповкой взрывом, ротационной вытяжки,

изгиба тонколистового проката и последующего соединения его краев сваркой [2].

В случае использования оболочек переменной толщины возникает проблема удаления излишков материала. Это достигается путем механического фрезерования или химического травления, что значительно увеличивает продолжительность процесса его изготовления и значительно увеличивает стоимость производства. Механические дефекты, возникающие в ходе этих операций, делают его непригодным для восстановления путем ремонта.

Возобновление интереса к изучению тонкостенных конструкций обусловлено не только появлением новых материалов и сплавов, бурным развитием компьютерных технологий, но и возможностью использования новых методов получения деталей и их компонентов с помощью аддитивных технологий [3, 4].

В настоящее время многие мировые компании при изготовлении своей продукции начали использовать аддитивную технологию для 3D-печати. В начале 2018 г. известная американская аэрокосмическая корпорация Lockheed Martin представила [5] первый напечатанный на 3D-принтере бак для ракетного топлива из титанового сплава (рис. 1).

Выбор титана был обусловлен его высокой удельной прочностью, термостойкостью и коррозионной стойкостью. При использовании традиционных технологий производства цилиндриче-

* По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Материалы для сварки, наплавки, нанесения покрытий и 3D-технологий», 04–05 июня 2019 г., г. Киев.



Рис. 1. Бак ракетного топлива (а) и электронно-лучевая камера для 3D-печати (б) [5]

ских топливных баков, как правило, до 70...80 % ценного материала направляется на перерабатываемые отходы. Новый способ печати от Lockheed Martin позволяет в значительной степени (по данным компании до 87 %) экономить на производстве этих баков.

Цилиндрические топливные баки — не единственное изделие Lockheed Martin, напечатанное на 3D-принтере. Компания уже использовала эту технологию для создания спутниковой системы связи и компонентов для межпланетной станции NASA Juno. Компания также планирует изготовить внешнюю оболочку для космического корабля «Орион» с использованием технологии 3D-печати.

Аддитивные технологии — это новый высокоэффективный метод создания деталей и конструкций, основанный на добавлении небольших порций материала. Изделия и материалы создаются путем плавления металлического порошка [4], сплошной проволоки или порошковой проволоки [6] концентрированными источниками нагрева.

Использование металлической проволоки вместо порошка в аддитивном процессе позволяет повысить производительность металлургических процессов, обеспечить более высокую энергоэффективность, повысить коэффициент использования материала, снизить остаточные напряжения и деформации, обеспечить необходимый уровень свойств. Использование аддитивного метода при ремонте тонкостенных оболочек может позволить восстановить их структурную целостность и несущую способность. В то же время создание работающей тонкостенной конструкции требует предварительного лабораторного исследования и компьютерного моделирования.

Целью представленной работы было усовершенствование технологии создания тонкостенных оболочек аддитивным методом на основе выбора геометрии их нанесения.

Методика эксперимента. В связи с тем, что тонкостенные конструкции широко используются в аэрокосмической технике, судостроении и промышленном строительстве, первоначально, для исследований были выбраны два типа материалов: титановый сплав марки Grade 2 и конструкционная низколегированная сталь марки 09Г2С.

В связи с особенностями формирования конструкций из титановых сплавов (высокая мощность источника нагрева, наличие высокого вакуума в камере нанесения) использовали специализированную систему аддитивного наплавления xBeam 3D Metal Printing [7]. Система основана на применении полого конического электронного луча в качестве источника нагрева и использовании проволоки в качестве расходного материала. Это создает благоприятные условия для расплавления расходного материала и его послойного контролируемого наплавления.

Для наплавки изделий из конструкционной стали использовалась дуговая система для создания аддитивных структур [8]. Она основана на использовании сварочного робота «ABB IRB-1600». В Институте электросварки им. Е.О. Патона разработано программное обеспечение для создания трехмерной модели, основанной на сканировании аддитивного покрытия, планировании траектории движения сварочной горелки с учетом коррекции данных лазерно-телевизионных и видеопирометрических датчиков.

Тонкостенные изделия из исследованных материалов показаны на рис. 2. В качестве материала для аддитивной наплавки трехмерных изделий использовались сварочные проволоки соответствующего состава и толщины.

С целью улучшения технологии создания тонкостенных оболочек аддитивным методом и повышения их механических свойств было проведено компьютерное моделирование.

Для моделирования был использован титановый сплав марки Grade 2 (BT1-0), содержащий, мас. %:

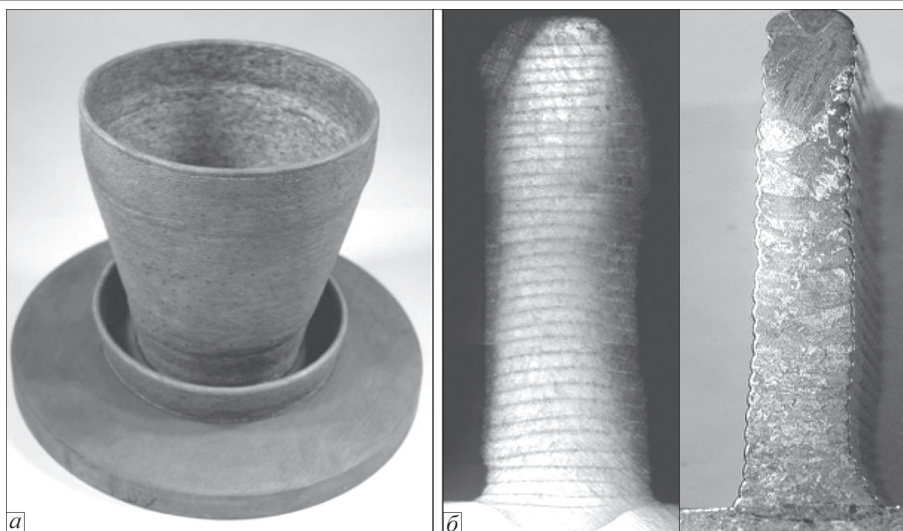


Рис. 2. Наплавки из исследуемых материалов, полученные аддитивным методом: *а* — низколегированная сталь марки 09Г2С; *б* — титановый сплав марки Grade 2

0,03 N; 0,1 C; 0,25 O; 0,3 Fe. Предел текучести сплава составлял 275 МПа, предел прочности 345 МПа. В качестве низколегированной стали была выбрана сталь марки 09Г2С, применяемая для сварных конструкций, содержащая, мас. %: 0,12 C; 0,6 Si; 1,5 Mn; 0,3 Cu; 0,04 S; 0,003 P. Предел текучести стали составлял 345 МПа, предел прочности 490 МПа, относительное удлинение 21 %.

В связи с тем, что в практике создания цилиндрических оболочек для аэро- и ракетно-космической техники широко распространено использование высокопрочных алюминиевых сплавов, было целесообразно применить разработанные подходы к анализу создания аддитивных оболочек для данных сплавов.

В связи с ограничением доступа к экспериментальным результатам в этой отрасли, в качестве прогнозируемого варианта было проведено моделирование электродуговой наплавки проволокой тонкостенного изделия из деформируемого алюминиевого сплава марки 1561 (АМг61) в защитной среде аргона. Сплав марки 1561 содержит, мас. %: 6,1 Mg; 0,9 Mn; 0,4 Si; 0,4 Fe; 0,003 Be; 0,12 Zr. Данный сплав широко применяется при производстве тонкостенных элементов аэрокосмической техники. Алюминиевый сплав имеет предел текучести не менее 250 МПа, а предел прочности — не менее 360 МПа.

Рассчитываемые цилиндрические оболочки представляют собой последовательно наносимые на подложку по кругу с радиусом 20 мм слои материала шириной 2 мм и толщиной слоя 2 мм. Количество нанесенных слоев должно удовлетворять условию тонкой стенки, т. е. оболочка считается тонкой, если $h/R \leq 1/10 \dots 1/20$. Исходя из выбранных параметров, это условие было выполнено, когда количество слоев превышает 10.

Технологические параметры аддитивного наплавления	
Мощность источника нагрева (Al/Fe/Ti), кВт	0,6/1/5
Толщина пластины, мм	5
Толщина наплавляемого слоя, мм	2
Ширина наплавки, мм	2
Радиус наплавки, мм	20
Высота наплавки, мм	40
Количество слоев	20
Скорость перемещения дуги, об/с	0,1; 0,2; 1
Количество наплавляемых слоев	20...30

Выбор мощности дугового источника нагрева определялся характерными режимами сварки для данного типа материала: электронно-лучевой сваркой титановых сплавов (5 кВт), дуговой сваркой в среде защитных газов низколегированных сталей (1 кВт) и дуговой сваркой алюминиевого сплава плавящимся электродом (0,6 кВт).

Исследовалось два способа нанесения аддитивных слоев — по кольцу и по спирали. Угловая скорость наплавления одного слоя определялась технологическими возможностями установок и составляла 0,1; 0,5 и 1 об./с.

Расчетная модель. Для моделирования влияния способа нанесения наплавки на ее свойства были рассчитаны температурные поля и напряженно-деформированное состояние цилиндрических изделий в процессе их формирования. Для расчетов использовался вычислительный пакет COMSOL Multiphysics®. Математическая модель аддитивного процесса была представлена в работах [9, 10]. На основании экспериментальных результатов было принято, что в начальный момент времени осажденный материал находится в твердо-жидком состоянии между температурами жидкости и твердого тела. По этой причине в расчетах можно пренебречь жидкой фазой.

Для численного анализа кинетики изменения температурного поля в наплавляемой оболочке

решалось трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности:

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

где ρC_p — удельная теплоемкость; k — коэффициент теплопроводности материала.

Граничные условия, необходимые для решения уравнения (1), определяются балансом подводимого тепла и теплоотвода от поверхности осаждаемой детали. Передача тепла в области контакта наплавляемого изделия с подложкой может быть описана законом Ньютона, тогда как тепловое излучение на свободной поверхности регулируется законом Стефана–Больцмана. Граничные условия для решения уравнения теплопроводности (1) имеют следующий вид (2):

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} h(T - T_{ext}), & \text{в области контакта} \\ h(T - T_{ext}) + \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{ext}^4) - q_{arc} - q_{wire}, & \text{на свободной поверхности} \end{cases} \quad (2)$$

где n — нормаль к поверхности; $h = 10$ (Вт/м²К) — коэффициент конвективной теплопроводности; $\varepsilon = 0,8$ — коэффициент излучения материала; σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана ($5,6 \cdot 10^{-8}$ Дж с⁻¹ м⁻² К⁻⁴); $T_{ext} = 293$ К — температура окружающей среды; q_{arc} — плотность теплового потока,

создаваемого дуговым источником тепла (Вт/м²); q_{wire} — плотность теплового потока, создаваемого расплавленной проволокой (Вт/м²).

В работе использована модель совместной передачи энергии от двух одновременно действующих источников тепла, а именно от источника дуги и расплавленной проволоки. Координаты дуги, движущейся по поверхности, задаются уравнением (3):

$$X = X_g + R \cos(2\pi \omega t); Y = Y_g + R \sin(2\pi \omega t) \quad (3)$$

где X_g, Y_g — начальное положение дуги; ω — угловая скорость; R — радиус траектории; t — время.

Распределение плотности теплового потока движущейся дуги $q_{arc}(X, Y, t)$ было задано уравнением (4):

$$q_{arc}(x, y, t) = q_{max} \times \exp \left[-K_x \left(\frac{X - X_g}{R} \right)^2 - K_y \left(\frac{Y - Y_g}{R} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где X, Y — координаты источника тепла; $q_{max} = \eta U_a I_w$ — мощность дуги; η — коэффициент полезного действия (0,9... 0,95) источника; U_a — напряжение дуги; I_w — ток дуги; K_x, K_y — коэффициенты концентрации удельного источника тепла.

Распределение плотности теплового потока от расплавленной проволоки $q_{wire}(X, Y, t)$ задавалось движением кромки формирующего слоя с угло-

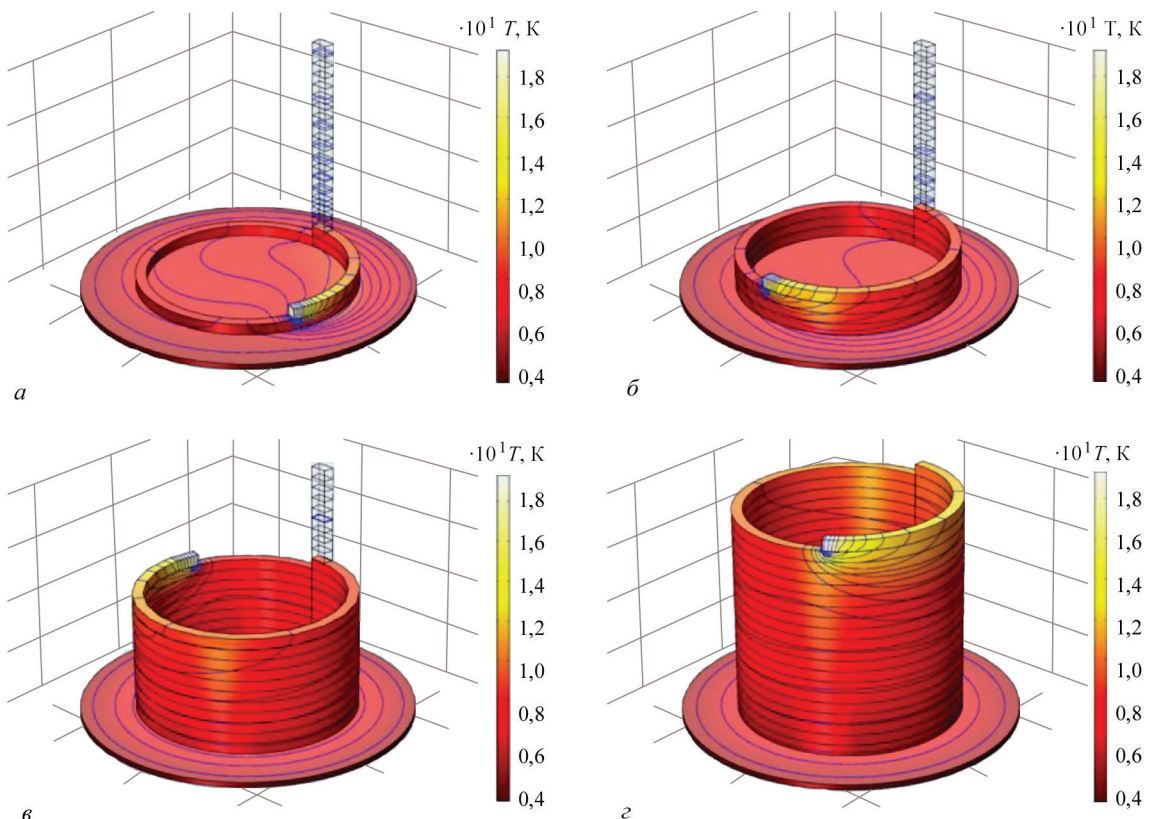


Рис. 3. Распределение температуры в цилиндрической оболочке из титанового сплава Grade 2 получаемой со скоростью 0,1 об/с по времени: а — 13 с; б — 35; в — 108; г — 194

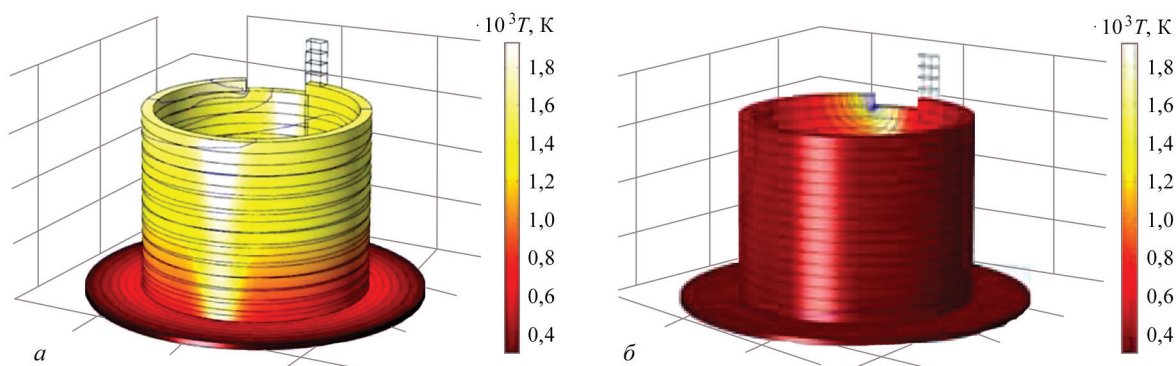


Рис. 4. Влияние материала наплавки на температурное поле в оболочке: а — сплав 1561; б — Grade 2

вой скоростью омега при постоянной температуре $T_{wire} = T_{melt}$. Для исследованных материалов T_{melt} составляла 625, 1504 и 1716 °С для алюминиевого сплава 1561, стали марки 09G2S и титана марки 2 соответственно.

Результаты моделирования. В результате моделирования были рассчитаны поля температур, напряжений, деформаций и перемещений при формировании цилиндрических оболочек аддитивным методом.

Температурные поля в оболочке из титанового сплава Grade 2 во времени показаны на рис. 3. Анализ показал практически равномерное распределение температуры по толщине нанесенного слоя. Распределение температур по высоте оболочки показало, что она не изменяется в процессе наплавки 9...10 слоев. Температура подложки не превышает 200...230 °С, и, следовательно, ее структурно-фазовое состояние не меняется.

Расчеты показывают, что наиболее быстрая стабилизация температуры оболочки наблюдается при сварке проволокой из стали 09G2C — через 35...40 с. Для алюминиевого сплава 1561 это время составляет 65...70 с., тогда как для титанового сплава Grade 2 стабилизации не происходит.

Расчеты показывают, что в зависимости от состава используемой проволоки максимальная температура наплавки превышала температуру плавления данного материала на 50...75 °С (для алюминиевого сплава 1561), на 100...150 °С (для стали 09G2C) и на 200 °С (для титанового сплава Grade 2).

Анализ распределения температур по высоте наплавки показывает (рис. 4), что в зависимости от типа используемого материала влияние расплавленной проволоки на уже нанесенные слои наплавки различно. Так, наибольшее влияние в результате воздействия предыдущих слоев достигается при наплавке алюминиевого сплава 1561, которое распространяется на нижележащие 8...10 слоев (рис. 4, а). При нанесении расплавленной проволоки из стали 09G2C или титанового сплава Grade 2 это влияние существенно ниже. Для стали

оно составляет 3...4 слоя, для титанового сплава — 1...2 слоя (рис. 4, б). Полученные результаты объясняются заметно более высокой теплопроводностью алюминиевого сплава (100...150 Вт/(м·К)) по сравнению со сталью (23...28 Вт/(м·К)) или титановым сплавом (17...25 Вт/(м·К)).

Цилиндрическая конструкция из алюминиевого сплава 1561 остывает заметно быстрее и повторный разогрев достигает более глубоких слоев, что приводит к росту размера зерна и снижению механических свойств из этих сплавов. Использование в аддитивном процессе стали 09G2C и титанового сплава Grade 2 приводит к формированию более однородной структуры наплавки и снижает остаточные напряжения, образующиеся при формировании цилиндрической оболочки.

В ходе расчетов было проанализировано влияние алгоритма нанесения аддитивной цилиндрической наплавки — наплавление по кольцу или по спирали — на температуру наплавки и параметры устойчивости аддитивной оболочки к внешним нагрузкам (рис. 5).

В большинстве работ по моделированию аддитивной наплавки эффект формы наплавки не учитывается. Это связано с тем, что в этом случае в расчетах необходимо учитывать гидродинамику капли, процессы кристаллизации, взаимодействие капель между собой и т. д. Для того, чтобы избежать этих сложностей и приблизиться к реальной геометрии наплавки форма нанесенного слоя по

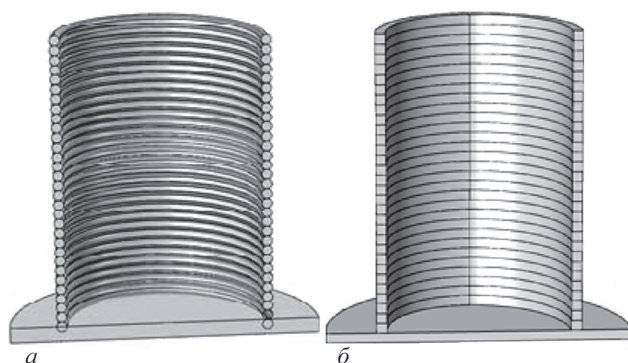


Рис. 5. Характер нанесения аддитивных слоев: а — по спирали; б — по кольцу

сечению задавалась заранее. В большинстве случаев вид боковой поверхности оболочки имеет волнообразный «ребристый» характер, причем он зависит от толщины слоя и скорости наплавления.

В ходе работы было принято, что при спиралевидной наплавке формируется волнообразная геометрия боковой стенки, тогда как при наплавке по кольцу — плоская. Это предположение обосновано тем, что реальная наплавка осуществляется непрерывно по всей высоте изделия и при этом формируется «ребристая» поверхность, тогда как наплавка по кольцу более идеализированный вариант, который используется для расчетов.

Анализ полученных результатов показал, что спиралевидная наплавка нагревается до более высоких температур по сравнению с кольцевой наплавкой. Это, по-видимому, связано с пониженной передачей тепла между слоями. При этом наплавленный слой быстрее остывает, что определяется большей площадью охлаждаемой поверхности.

Параметры охлаждения цилиндрической оболочки менее теплопроводного титанового сплава Grade 2 по сравнению с оболочкой из стали 09Г2С обеспечивают более высокие уровни температур. Как следствие, возможно повышение перегрева жидкой ванны и выход из диапазона температур твердожидкого состояния для данного сплава (T_{sol}/T_{liq}). Тем самым повышается риск «протекания» жидкого расплава по боковой поверхности цилиндрической оболочки.

В работе было проанализировано различие в механической устойчивости цилиндрических аддитивных оболочек, полученных различными методами.

При анализе устойчивости цилиндрических оболочек, полученных аддитивным методом, необходимо принимать во внимание наличие остаточных напряжений, которые формируются на границе нанесенных слоев. В случае нанесения

слоев по кольцу остаточные напряжения на границах составляют 40...50 МПа, в то время как при нанесении слоев по спирали остаточные напряжения оказываются несколько ниже и составляют 10...30 МПа. При этом, как показали предыдущие исследования [10], наибольший уровень напряжений наблюдается на границе аддитивных слоев и подложки. В этом случае уровень напряжений составляет 100...150 МПа.

Характер распределения напряжений в цилиндрических оболочках, полученных различными методами, под действием осевой сжимающей нагрузки $P = 50$ МПа приведен на рис. 6. Как видно из приведенных результатов, наличие напряжений, образующихся в процессе аддитивного наплавления, изменяет в целом характер распределения напряжений в оболочках под действием осевой сжимающей нагрузки.

Анализ полученных результатов (рис. 6) показывает, что характер формирующихся напряжений существенным образом зависит от способа формирования оболочки. Отличия, прежде всего, заключаются в уровне напряжений, образующихся в них. Наибольшие напряжения (55...60 МПа) формируются в оболочке, выполненной кольцевыми слоями, тогда как наименьшие (35...40 МПа) формируются в многослойной наплавке, выполненной по спирали. Этот результат, возможно, объясняется некоторым демпфированием внешней осесимметричной нагрузки слоями наплавки, расположенной по спирали.

Анализ устойчивости оболочек, полученных различными методами, к действию осевой сжимающей нагрузки представлен на рис. 7. Под потерей устойчивости подразумевалась потеря формы конструкции под действием внешних сил. Для определения начала образования пластических деформаций использовалось условие текучести по Мизесу (5):

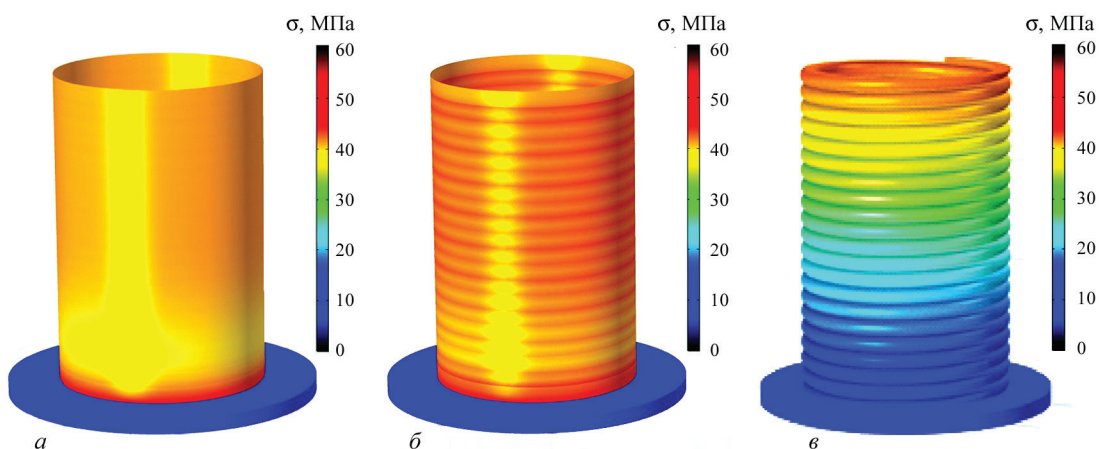


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в цилиндрических оболочках из титанового сплава Grade 2 под действием осевой нагрузки $P = 50$ МПа, полученных различными методами: а — традиционным из листа; б — многослойной наплавкой по кольцу; в — многослойной наплавкой по спирали

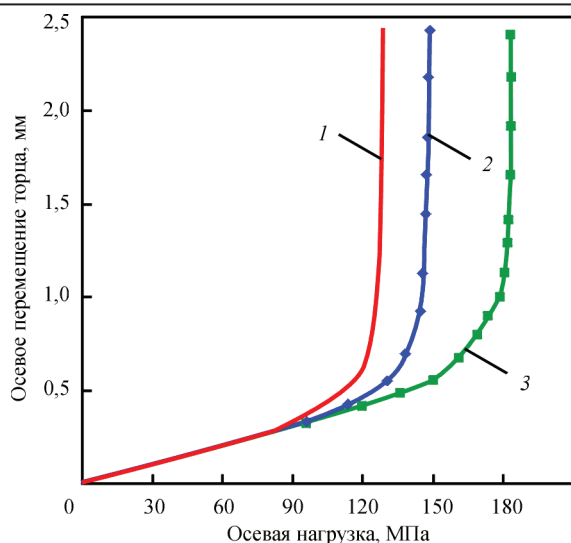


Рис. 7. Устойчивость цилиндрических оболочек, полученных различными методами, к действию осевой сжимающей нагрузки: 1 — из сплошного листа; 2 — из многослойной наплавки по кольцу; 3 — из многослойной наплавки по спирали

$$g(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_T^2} \right)} - 1 \geq 0, \quad (5)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные нормальные напряжения; σ_T — предел текучести.

Исследование цилиндрических оболочек, выполненных различными методами, показало, что при многослойной наплавке по спирали достигается наибольший уровень критических напряжений (180...200 МПа), при которых она теряет устойчивость по сравнению с оболочками, полученными из сплошного листа (150...165 МПа) и многослойной наплавкой по кольцу (145...150 МПа).

Таким образом, на основании проведенной работы можно заключить, что при формировании цилиндрических оболочек аддитивным методом целесообразно использовать технологию аддитивного наплавления по спирали.

Список литературы

1. Кривошапко С.Н. (2013) О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, **1**, 51–56.
2. Барвинков В.А., Кирилин А.Н., Комаров А.Д. (2002) *Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов*. Москва, Наука и технологии.

3. Григоренко Г.М., Шаповалов В.А., Жуков В.В. (2016) Аддитивное производство металлических изделий (Обзор). *Автоматическая сварка*, **5-6**, 148–153.
4. Kaufui V.Wong, Aldo Hernandez. (2012) A Review of Additive Manufacturing. *International Scholarly Research Network – Mechanical Engineering*, 2012, Article ID 208760, 10 pages, Doi:10.5402/2012/208760.
5. ВМС США напечатали готовый к погружению подводный аппарат. <https://hi-news.ru/technology/vms-sshanapechatali-gotovyj-k-pogruzheniyu-podvodnyj-apparat.html>
6. Jandric Z., Labudovic M., Kovacevic R. (2004) Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44(7-8)**, 785–796.
7. Ковальчук Д.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. (2017) Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing (Обзор). *Автоматическая сварка*, **12**, 26–33.
8. Шаповалов Е.В., Долиненко В.В., Коляда В.А. и др. (2016) Применение роботизированной и механизированной сварки в условиях возмущающих факторов. *Там же*, **7(754)**, 46–51.
9. 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.
10. Костин В.А., Григоренко Г.М., Жуков В.В. (2017) Моделирование металлургического аддитивного процесса создания конструкций из стали 09Г2С. *Там же*, **2(127)**, 35–44.

References

1. Krivoshapko, S.N. (2013) On possibilities of shell constructions in modern architecture and building. *Stroit. Mekhanika Inzhen. Konstruktsij i Sooruzhenij*, **1**, 51-56 [in Russian].
2. Barvinok, V.A., Kirilin, A.N., Komarov, A.D. (2002) *High-efficient technological processes of manufacturing of piping and fuel systems of aircrafts*. Moscow, Nauka i Tekhnologii [in Russian].
3. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, **5-6**, 137-142.
4. Kaufui, V.Wong, Aldo Hernandez (2012) A review of additive Manufacturing. *Ont. Scholarly Res. Network – Mechanical Engineering*, Art. ID 208760, Doi: 10.5402/2012/208760.
5. NAVY USA printed the underwater apparatus ready to immersion. <https://hi-news.ru/technology/vms-sshanapechatali-gotovyj-k-pogruzheniyu-podvodnyj-apparat.html>
6. Jandric, Z., Labudovic, M., Kovacevic, R. (2004) Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts build by welding-based deposition. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, **44(7-8)**, 785-796.
7. Kovalchuk, D.V., Melnik, V.I., Melnik, I.V., Tugaj, B.A. (2017) New possibilities of additive manufacturing using xBeam 3D Metal Printing technology (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 16-22.
8. Shapovalov, E.V., Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A. et al. (2016) Application of robotic and mechanized welding under disturbing factor conditions. *Ibid.*, **7**, 42-46.
9. Kostin, V.A., Grigorenko, G.M. (2017) Peculiarities of formation of 3D structure of S460M steel product in additive metallurgical technology. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 33-42 [in Russian].
10. Grigorenko, G.M., Kostin, V.A., Zhukov, V.V. (2017) Modeling of metallurgical additive process of manufacture of 09G2S steel structures. *Ibid.*, **2**, 35-44 [in Russian].

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ, НАПРУГ ТА ДЕФОРМАЦІЙ У ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНКАХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

В.А. Костін, Г.М. Григоренко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі представлено результати моделювання температурних полів, напружень та деформацій при формуванні адитивної багатошарової конструкції з алюмінієвого сплаву 1561, низьколегованої конструкційної сталі марки 09Г2С і титанового сплаву марки Grade 2. На підставі експериментальних результатів, отриманих раніше у ІЕЗ ім. Є.О. Патона при наплавленні адитивних шарів з даних матеріалів, було проведено комп'ютерне моделювання з метою підвищення продуктивності адитивного процесу. В ході розрахунків було проаналізовано алгоритм послідовності нанесення адитивних шарів — наплавлення циліндричної оболонки по кільцю або по спіралі — на розподіл температур в оболонці та параметри її стійкості до зовнішніх навантажень. Встановлено, що при формуванні циліндричних оболонок адитивним методом доцільно використовувати технологію наплавлення по спіралі і застосовувати менш теплопровідні матеріали — конструкційні сталі та титанові сплави. Бібліогр. 10, рис. 7.

Ключові слова: адитивне виробництво, моделювання, наплавлення по спіралі, циліндричні оболонки, стійкість, залишкові напруження

MODELLING OF TEMPERATURE FIELDS, STRESSES AND DEFORMATIONS IN CYLINDER CASINGS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

V.A. Kostin, G.M. Grigorenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of modelling of temperature fields, stresses and deformations in formation of additive multi-layer structure of aluminum alloy 1561, low-alloy structural steel of 09G2S grade and titanium alloy of Grade 2 grade. Based on the experimental results obtained earlier at the E.O. Paton Electric Welding Institute during application of additive deposits of these materials the computer modelling was carried out for improvement of technology of additive process. In course of calculations there was analyzed an effect of algorithm of sequence of additive layers deposition, namely deposition of cylinder casing on circle and on spiral, on distribution of temperatures in deposition and its resistance to external loads. It is determined that the spiral deposition technology is reasonable to be used in formation of cylinder casings by additive method and apply less heat-conducting structural materials, i.e. structural steels and titanium alloys. 10 Ref., 7 Fig.

Keywords: additive manufacturing, modelling, spiral deposition, cylinder casings, resistance, residual stresses

Поступила в редакцию 08.04.2019

Календарь выставок и конференций на 2019 г.

Дата	Место проведения	Название
3–6 сентября	Томск, Россия	Международная конференция «Сварка в России 2019: современное состояние и перспективы»
9–13 сентября	Одесса, Украина	9-я Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»
16–17 сентября	Росток, Германия	DVS – студенческий конгресс
14–16 октября	Гданьск, Польша	61-я научно-техническая конференция сварщиков
23–24 октября	София, Болгария	Семинар «Обучение персонала сварочного производства»
19–22 ноября	Київ, Україна	18-й Международный Промышленный Форум-2019 с разделом «Укрсварка»