

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДДИТИВНОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

В. А. Костин, Г. М. Григоренко

Институт электросварки 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, низколегирующей конструкционной стали марки 09Г2С и титанового сплава марки Grade 2. На основании экспериментальных результатов, полученных в ИЭС им. Е. О. Патона, при аддитивных наплавках данных материалов проведено компьютерное моделирование с целью улучшения технологии проведения процесса. В ходе расчетов проанализировано влияние алгоритма последовательности нанесения аддитивных слоев (наплавление цилиндрической оболочки по кольцу или по спирали) на распределение температур при наплавке и ее устойчивость к внешним нагрузкам. Установлено, что при формировании цилиндрических оболочек аддитивным способом целесообразно использовать технологию наплавления по спирали и применять менее теплопроводные конструкционные материалы (конструкционные стали, титановые сплавы). Библиогр. 21, табл. 1, ил. 10.

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 приобретает использование тонкостенных цилиндрических оболочек, выполненных из различных материалов [1–3].

Такие оболочки могут использоваться для корпусов ракетных двигателей твердого топлива, строительных куполообразных сооружений, резервуаров для хранения активных и криогенных жидкостей, т. е. как конструкции, работающие при высоких внутренних давлениях при осесимметричной внешней нагрузке.

В качестве исходных материалов для их производства часто используются различные конструкционные (низколегируемые высокопрочные, нержавеющие, коррозионностойкие) стали, титановые и алюминиевые сплавы, композиционные материалы на основе титана, алюминия и керамики [4–7].

Без таких материалов невозможно развитие современной авиационной и ракетно-космической техники, создание совершенных пространственных конструкций, удовлетворяющих определенному сочетанию эксплуатационных свойств, устойчивых к самым сложным механическим и тепловым нагрузкам.

Использование тонкостенных оболочек позволяет значительно уменьшить вес конструкции при сохранении максимального объема, обеспечить

необходимую прочность и жесткость, позволяет использовать большое разнообразие сложных форм при проектировании конструкций различного вида.

Традиционно такие оболочки получают различными методами штамповки: инструментальной, магнито-импульсной, электрогидравлической, взрывом, а также способом ротационной вытяжки, изгиба тонколистового проката и последующего соединения его краев сваркой [8, 9].

В случае использования оболочек переменной толщины возникает проблема удаления лишнего материала. Это достигается путем механического фрезерования или химического травления, что значительно увеличивает длительность процесса ее изготовления и заметно повышает себестоимость производства. Возникающие в процессе этих операций механические дефекты на поверхности оболочки делают ее не пригодной к восстановлению в случае ремонта.

Возобновление интереса к исследованию тонкостенных конструкций в последние годы вызвано не только появлением новых перспективных материалов и сплавов, бурным развитием средств вычислительной техники, но и возможностью использования новых способов их получения — аддитивных технологий [10–12].

Аддитивные технологии — это новый высокоэффективный способ создания деталей и конструкций, основанный на добавлении небольших порций материала в отличие от традиционных

технологий, где создание детали происходит путем удаления «лишнего» материала.

Изделия создаются за счет расплавления концентрированными источниками энергии металлического порошка [11], проволоки сплошного сечения или порошковой [13].

Использование в аддитивном процессе металлической проволоки вместо порошка позволяет повысить производительность металлургических процессов, обеспечить более высокую энергоэффективность, поднять коэффициент использования материала, понизить остаточные напряжения и деформации, обеспечить требуемый комплекс эксплуатационных свойств.

Применение аддитивного метода в процессе ремонта тонкостенных оболочек может позволить восстановить их структурную целостность и несущую способность.

Вместе с тем создание работающей тонкостенной конструкции требует проведения предварительного лабораторного исследования и компьютерного моделирования с учетом масштабного фактора.

Цель представленной работы — улучшение технологии процесса формирования тонкостенной оболочки, полученной аддитивным методом, на основе моделирования температурных полей, напряжений и деформаций, формирующихся в оболочке, и сравнение параметров устойчивости оболочек, полученных при различной последовательности нанесения аддитивных слоев, с параметрами устойчивости оболочки, полученной существующими способами.

Материалы и методика исследований. Исходя из того, что технология аддитивного производства позволяет послойно создавать изделия размер которых в одном из направлений значительно меньше, чем в других (до 2 мм), было целесообразно исследовать ее возможности для создания тонкостенных конструкций.

В свете того, что тонкостенные конструкции широко используются в аэрокосмической технике, судостроении и промышленном строительстве, для исследований были отобраны два типа конструкционных материалов — титановый сплав марки Grade 2 и конструкционная низколегированная сталь марки 09Г2С.

В связи с особенностями формирования конструкций из титановых сплавов (высокие мощность источника нагрева и вакуум в камере нанесения) использовали специализированную систему аддитивного наплавления xBeam 3D Metal Printing. Данная система разработана и ре-

ализована в полнофункциональном оборудовании ЧАО «НВО «Червона Хвиля» [14]. Система основана на применении полого конического электронного луча (ЭЛ) в качестве источника нагрева и использовании проволоки как расходного материала. Это создает благоприятные условия для расплавления расходного материала и его послойного контролируемого наплавления.

Для формирования изделий из конструкционной стали использовали электродуговую (ЭД) систему создания аддитивных конструкций с помощью сварочного робота «ABB IRB-1600». Данная система разработана в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Разработано программное обеспечение для создания 3D модели, основанное на сканировании аддитивной наплавки, планировании траектории перемещения сварочной горелки с учетом коррекции данных от лазерно-телевизионного и видеопирометрического сенсоров [15].

На рис. 1 представлены тонкостенные изделия из исследуемых материалов, полученные аддитивным способом. В качестве исходного материала для аддитивного наплавления 3D изделий использовали сварочные проволоки соответствующего состава и толщины.

С целью улучшения технологии процесса создания тонкостенной оболочки аддитивным способом, сокращения времени и материальных ресурсов, необходимых на его проведение, применили компьютерное моделирование.

При моделировании использовали титановый сплав марки Grade 2 (BT1-0), содержащий 0,03 % N, 0,1 % C, 0,25 % O, 0,3 % Fe. Предел текучести сплава составлял 275 МПа, предел прочности — 345 МПа.

В расчетах использовали низколегированную сталь марки 09Г2С, применяемую для сварных кон-

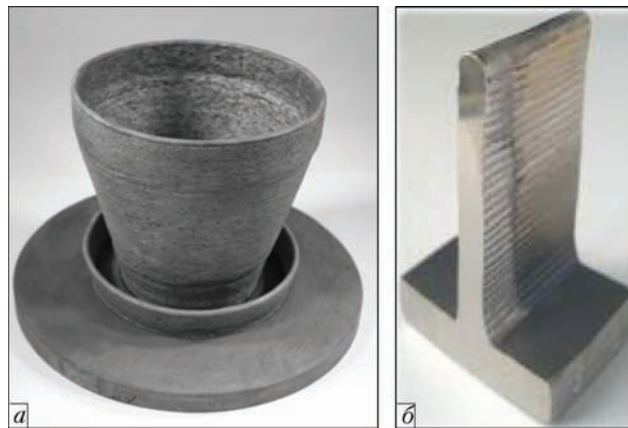


Рис. 1. Внешний вид изделий, полученных аддитивной наплавкой из низколегированной стали марки 09Г2С (диаметр проволоки 1,8 мм) (а) и титанового сплава марки Grade 2 (диаметр проволоки 1,2 мм) (б)

Влияние температуры нагрева на теплофизические свойства сталей и сплавов						
Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Коэффициенты				Модуль упругости, ГПа
		теплопроводности, Вт/м·К	теплоемкости, Дж/кг·К	термического расширения, 10 ⁻⁶ /К	Пуассона	
Титановый сплав Grade 2						
25	4,51	21,62	—	—	0,312	116,99
100	4,5	19,36	567,30	9,08	0,315	112,60
200	4,49	17,93	591,93	9,28	0,318	106,73
300	4,48	17,44	613,61	9,48	0,322	100,86
400	4,46	17,49	633,71	9,67	0,326	94,99
500	4,45	17,87	652,16	9,86	0,330	89,11
600	4,44	18,46	679,62	10,04	0,334	83,23
700	4,42	19,21	716,48	10,22	0,338	77,12
800	4,41	20,08	1024,52	10,37	0,343	70,51
900	4,40	21,22	1152,47	10,21	0,355	56,03
1000	4,39	22,79	640,46	9,44	0,375	40,68
Сталь 09Г2С						
25	7,91	23,61	451,30	—	0,29	201,27
100	7,87	24,72	478,03	19,33	0,30	196,25
200	7,83	25,94	509,11	19,53	0,30	188,83
300	7,78	26,84	540,92	19,73	0,31	180,36
400	7,73	27,40	576,87	19,93	0,31	170,85
500	7,69	27,68	620,39	20,13	0,32	160,42
600	7,64	27,76	677,87	20,34	0,32	149,21
700	7,59	27,77	765,51	20,54	0,32	137,37
800	7,54	27,88	905,33	20,75	0,33	125,06
900	7,53	27,23	611,08	18,88	0,35	114,37
1000	7,48	28,40	626,65	19,59	0,35	104,47
Алюминиевый сплав 1561						
25	2,64	107,83	960,36	22,62	0,331	69,28
100	2,62	118,59	965,47	23,41	0,334	66,72
200	2,60	129,12	1008,35	24,44	0,339	62,91
300	2,58	137,04	1050,27	25,49	0,344	58,65
400	2,5	143,16	1085,28	26,55	0,350	53,94
500	2,54	147,78	2469,84	27,62	0,357	48,77
600	2,45	118,05	6388,35	43,33	0,419	5,19
700	2,33	86,83	—	65,97	0,500	0,00

струкций, содержащую 0,12 % С, 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 проведено моделирование электродуговой наплавки проволокой тонкостенного изделия из деформируемого алюминиевого сплава марки 1561 (АМг61) в защитной среде аргона. Сплав марки 1561 содержит 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.

Для проведения компьютерного моделирования формирования тонкостенной цилиндрической оболочки аддитивным способом использовали пакет междисциплинарных исследований COMSOL Multiphysics и математическую модель аддитивного процесса, представленные в работах [17, 18], а необходимые физико-механические свойства материалов рассчитывали с использованием метода CALPHAD [16]. Расчетная зависимость физико-механических свойств материалов от температуры приведена в таблице.

Для удобства расчета в данной работе использовали цилиндрическую систему координат. Пре-

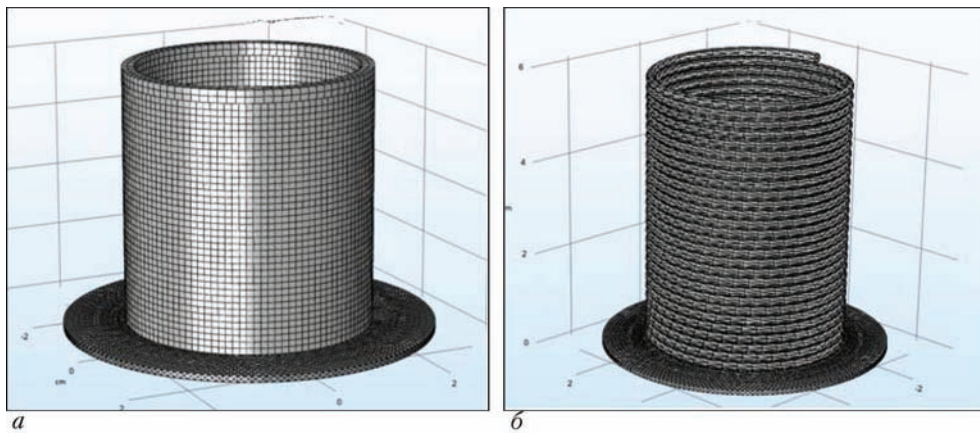


Рис. 2. Последовательность нанесения аддитивных слоев по кольцу (а); спирали (б)

образование декартовой системы координат в цилиндрическую выполняли согласно уравнениям

$$x = R \cos wt, \quad y = R \sin wt, \quad z = ht,$$

где R — радиус оболочки; w — угловая скорость наплавления; h — толщина слоя; t — время.

Геометрия расчетной цилиндрической оболочки представляет собой последовательно наносимые на подложку по окружности радиусом 20 мм слои материала шириной и толщиной по 2 мм. Количество наносимых слоев должно удовлетворять условию «тонкостенности», т. е. оболочка считается тонкой, если $h/R \leq 1/10 \dots 1/20$. Исходя из выбранных параметров это условие выполнялось при количестве слоев больше 10.

Технологические параметры аддитивного наплавления

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

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

Исследовали два способа нанесения аддитивных слоев — по кольцу и спирали (рис. 2). Угловую скорость наплавления одного слоя определяли исходя из технологических возможностей установок и она составила 0,1, 0,5 и 1,0 об/с.

Исходя из результатов эксперимента принято, что в начальный момент времени наносимый материал находится в температурном интервале твердожидкого состояния. Этому состоянию со-

ответствует часть температурного интервала кристаллизации, ограниченная сверху температурой ликвидуса, при которой начинает формироваться жесткий каркас из твердой фазы, а снизу — температурой солидуса, при которой жидкая фаза полностью исчезает. Такой подход позволяет не учитывать в расчетах жидкую фазу при формировании слоев.

В расчетах применяли модель упруго-пластического материала. Напряжения и деформации в модели возникают в результате развития усадочных явлений уменьшения объема материала при охлаждении.

Решение дифференциальных уравнений проводили методом конечных элементов (МКЭ), путем построения неоднородной адаптивной сетки и задания в каждой ячейке сетки интерполяционного многочлена Лагранжа второго порядка. Так как геометрия наплавки имеет симметричный вид, то для сокращения ресурсов вычислительной техники расчет проводили на половине изделия.

Полученные результаты и их обсуждение. В ходе расчетов проанализировано влияние различных параметров наплавления (скорости, типа материала, толщины наплавки) на характер изменения средней и минимальной температур цилиндрической наплавки. Анализ данных параметров необходим для того, чтобы оценить возможное влияние структурных превращений, которые могут проходить в этих материалах при нагреве, на конечную микроструктуру, величину напряжений и деформаций, вызванных фазовыми превращениями. рассчитано поле температур, напряжений, деформаций и перемещений при формировании цилиндрической оболочки аддитивным способом.

Результаты моделирования температурных полей при последовательном наплавлении 20-ти слоев тонкостенной оболочки приведены на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает почти

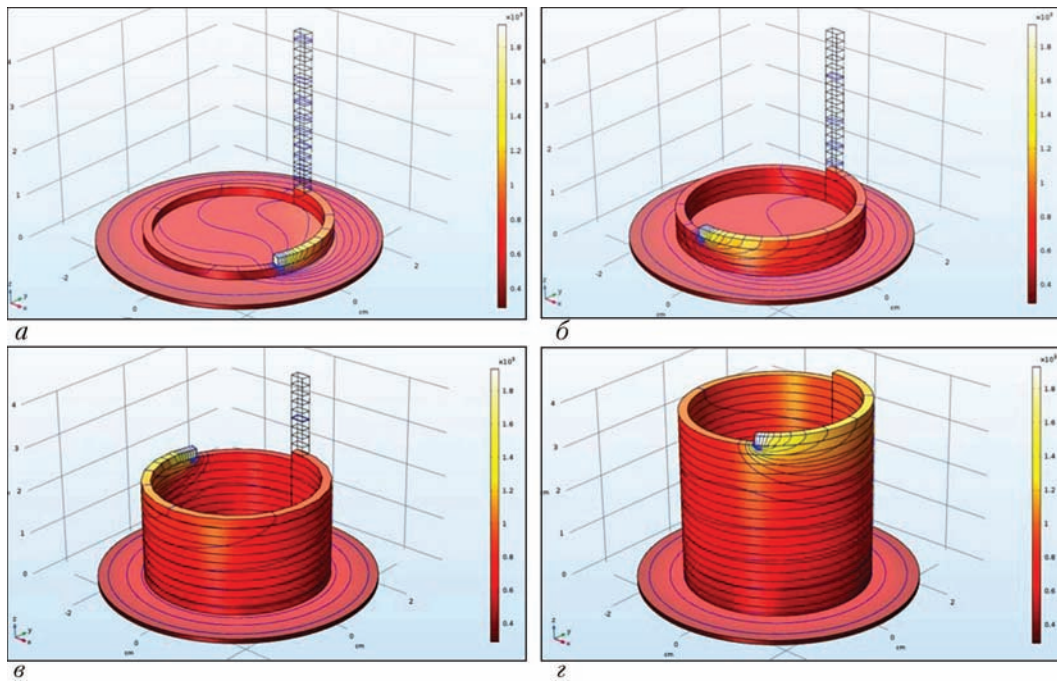


Рис. 3. Распределение температуры (K) в цилиндрической оболочке из титанового сплава Grade 2, полученной со скоростью 0,1 об/с по времени, с: а — 13; б — 35; в — 108; з — 194

однородное распределение температуры по толщине наплавляемого слоя.

Характер распределения температуры оболочки из стали 09Г2С по высоте приведен на рис. 4. Анализ распределения температуры по высоте оболочки показывает, что при нанесении на подложку 9...10-ти слоев температура подложки практически не изменяется и не превышает 500 К (200...230 °С) и, следовательно, ее структурно-фазовое состояние дальше не изменяется.

В работе для исследуемых материалов рассчитаны термические циклы нагрева и охлаждения цилиндрической оболочки, полученной аддитивным способом. На рис. 5 представлены термические циклы, полученные при скорости нанесения 0,2 об/с. Время наплавления одного слоя составляло 5 с.

Расчеты показывают, что самая быстрая стабилизация температуры оболочки наблюдается при

наплавлении проволокой из стали 09Г2С и после 35...40 с температура оболочки в нижней части не меняется (рис. 5, кривая 2). Для алюминиевого сплава 1561 это время составляет 65...70 с (рис. 5, кривая 3). Для титанового сплава Grade 2 стабилизации не происходит (рис. 5, кривая 1).

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), 100...150 °С (для стали 09Г2С) и 200 °С (для титанового сплава Grade 2).

Помимо однородности температурного поля и структурного состояния металла вдоль стенки оболочки необходимо поддерживать стационарным температурный режим наплавки по высоте.

Для оценки однородности температурного поля по высоте оболочки была определена ее средняя и

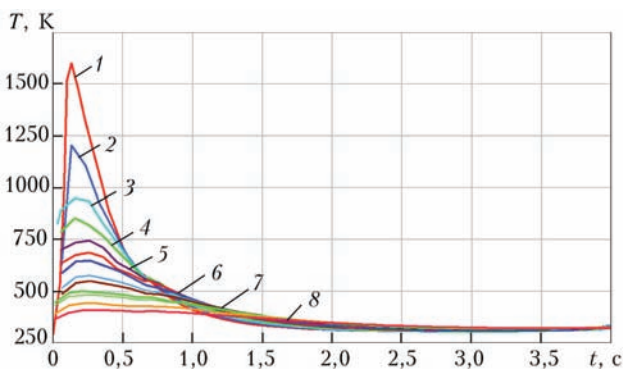


Рис. 4. Распределение температуры по высоте оболочки из стали 09Г2С при нанесении 40-ка слоев, мм: 1 — 40; 2 — 35; 3 — 30; 4 — 25; 5 — 22; 6 — 20; 7 — 15; 8 — 10

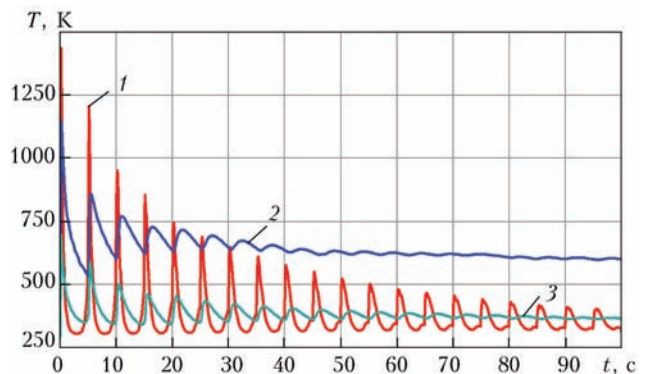


Рис. 5. Термические циклы наплавления цилиндрической тонкостенной оболочки: 1 — титановый сплав Grade 2; 2 — сталь 09Г2С; 3 — алюминиевый сплав 1561

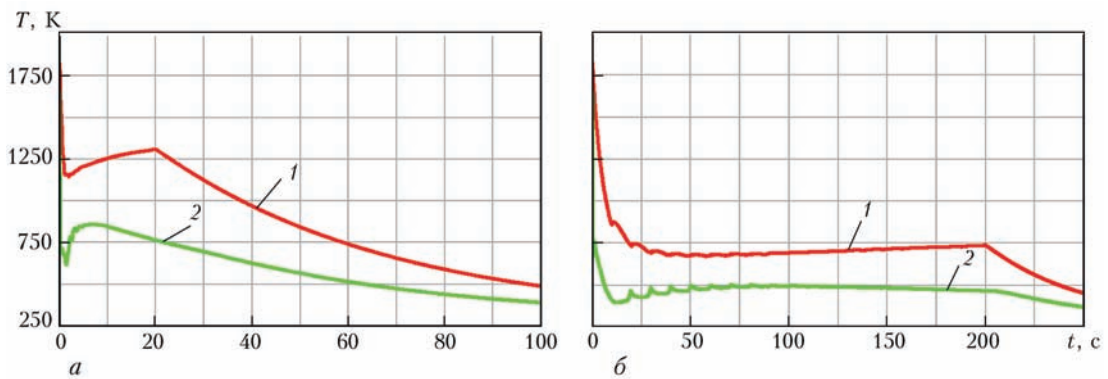


Рис. 6. Влияние скорости наплавления на среднюю (1) и минимальную (2) температуры цилиндрической наплавки титанового сплава Grade 2: а — 1; б — 0,1 об/с

минимальная температуры (усредненные по площади наплавки) в процессе наплавления (рис. 6).

Результаты расчетов показали, что средняя температура наплавки постепенно возрастает, однако с уменьшением скорости наплавления эта тенденция снижается. Так, при наплавлении титанового сплава Grade 2 средняя температура наплавки возрастает примерно с 1100 до 1280 К (приблизительно 1000 °С) при скорости наплавления 1 об/с, и приблизительно с 700 до 770 К (около 500 °С) при скорости наплавления 0,1 об/с. Минимальная температура наплавки постепенно возрастает при наплавлении первых 3...4-х слоев, а затем стабилизируется. Снижение этих параметров после 20 с (рис. 6, а) и 200 с (рис. 6, б) связано с окончанием наплавления и постепенным остыванием наплавки. Остывание наплавки при высокой скорости наплавления происходит значительно медленнее, чем при низкой.

Анализ распределения температур по высоте наплавки показывает, что в зависимости от типа используемого материала влияние расплавленной проволоки на уже нанесенные слои наплавки различно (рис. 7). Так, наибольший отпуск в результате воздействия предыдущих слоев достигается при наплавке алюминиевого сплава 1561, которое распространяется на нижележащие 8...10 слоев (рис. 7, а). При нанесении расплавленной проволоки из стали 09Г2С или титанового сплава Grade 2 это влияние существенно ниже. Для стали оно составляет 3...4 слоя, для титанового сплава — 1...2 (рис. 7, б, в). Полученные результаты объясняются заметно более высокой теплопроводностью алюминиевого сплава (100...150 Вт/м·К, таблица) 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 медленнее и повторный разогрев достигает более глубоких слоев, что приводит к росту размера зерна и заметному

разупрочнению изделий из этих сплавов. Использование в аддитивном процессе стали 09Г2С и титанового сплава Grade 2 приводит к формированию более однородной структуры наплавки и снижает остаточные напряжения, образующиеся при формировании цилиндрической оболочки.

В ходе расчетов проанализировано влияние алгоритма нанесения аддитивной цилиндрической наплавки (наплавление по кольцу или спирали) на

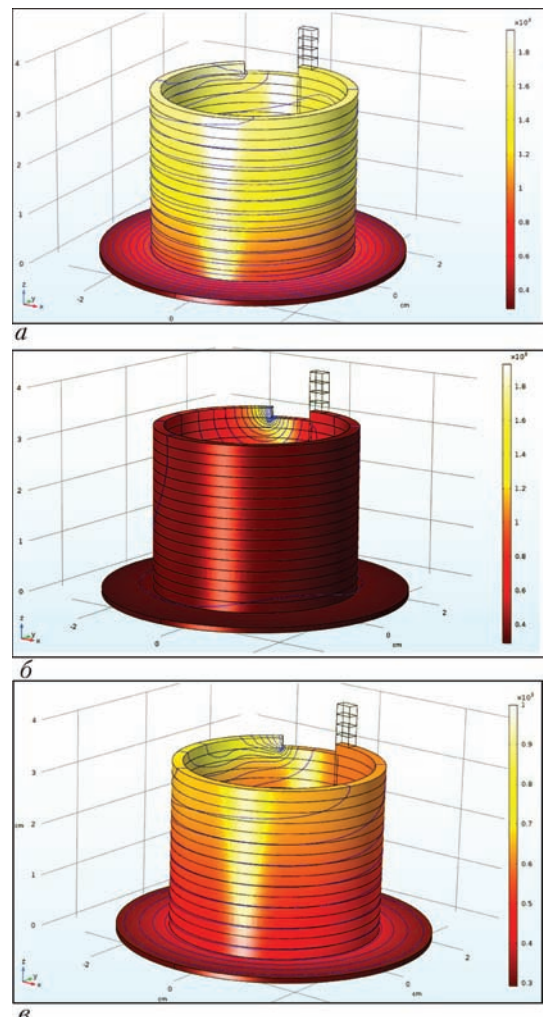


Рис. 7. Влияние материала наплавки на температурное поле в ней: а — сплав 1561; б — сталь 09Г2С; в — сплав Grade 2

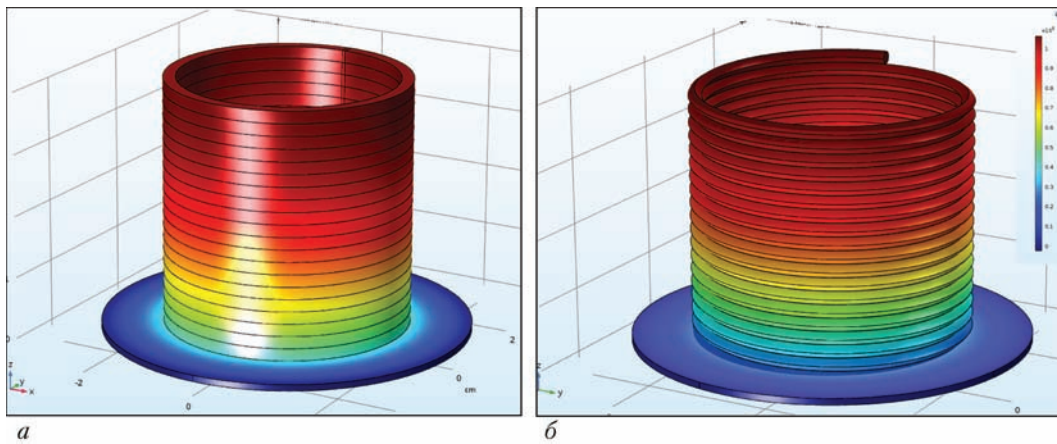


Рис. 8. Влияние последовательности нанесения аддитивных слоев титанового сплава Grade 2 на температурное поле в ней: *а* — по кольцу; *б* — по спирали

температуру наплавки и параметры устойчивости аддитивной оболочки к внешним нагрузкам (рис. 8).

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

Параметры охлаждения цилиндрической наплавки менее теплопроводного титанового сплава Grade 2 по сравнению с наплавкой из стали 09Г2С обеспечивают более высокие уровни температур и, 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 наплавки.

В работе проанализировано различие механической устойчивости цилиндрических аддитивных оболочек, полученных различными способами.

Первые теоретические решения задачи по определению критической нагрузки для сжатой в осевом направлении тонкостенной цилиндрической оболочки были даны Р. Лоренцом и С. Тимошенко в начале прошлого века [19, 20]. Они определяли наименьшую нагрузку, при которой наряду с начальным безмоментным состоянием появлялись смежные изгибные состояния равновесия оболочки. Такую постановку задачи устойчивости оболочек называют классической.

В настоящее время существует большое разнообразие критериев устойчивости оболочек.

Например, критической нагрузкой можно считать нагрузку, при которой происходит переход от одной формы равновесия к другой (часто используется при исследовании устойчивости линейно-упругих оболочек). Можно принять за крити-

ческую нагрузку таковую, при которой происходит бесконечное возрастание прогибов (используется при исследовании ползучести оболочек). Можно использовать критерий, согласно которому при критической нагрузке скорость прогиба стремится к бесконечности (используется при исследовании динамических нагрузок). Существует и ряд других критериев [21].

При анализе устойчивости цилиндрических оболочек, полученных аддитивным способом, 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 [18], 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 способами, под действием внешней нагрузки 50 МПа вдоль оси оболочки, приведен на рис. 9.

Как видно из приведенных результатов, наличие дополнительных малых напряжений (10...20 МПа), которые формируются на границе нанесенных аддитивных слоев, изменяет в целом характер распределения напряжений в оболочках под действием осевой нагрузки.

Для оболочки, полученной традиционным способом из сплошного листа (рис. 9, *а*), максимальные напряжения наблюдаются в верхней части ее и составляют 60...65 МПа. Для оболочки, полученной из последовательно нанесенных по кольцу слоев, максимальные напряжения формируются в нижней ее части (рис. 9, *б*) и состав-

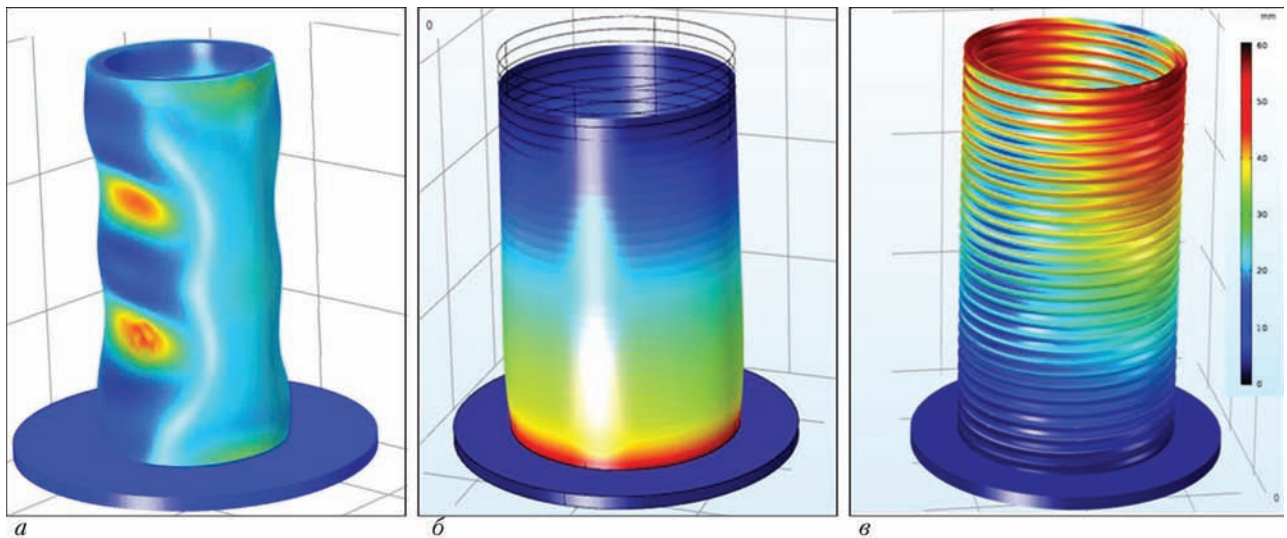


Рис. 9. Распределение напряжений в цилиндрической оболочке из титанового сплава Grade 2 под действием осевой внешней нагрузки 50 МПа, полученной различными способами: *а* — традиционным из листа; *б* — многослойной наплавкой по кольцу; *в* — многослойной наплавкой по спирали

ляют 120...150 МПа. Для оболочки, полученной аддитивным нанесением слоев по спирали, максимальные напряжения формируются по всей оболочке более равномерно (рис. 9, *в*) и составляют 50...70 МПа.

Результаты анализа устойчивости оболочек, полученных различными способами, к действию внешней осевой нагрузки представлены на рис. 10. Исследования цилиндрических оболочек показали, 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).

Повышенная устойчивость цилиндрических оболочек, полученных многослойной наплавкой по спирали, связана с наличием малых остаточных напряжений (10...20 МПа), которые образуются на границе аддитивных слоев вследствие усадочных явлений. Возникновение дополнительных касательных напряжений вдоль спиральной направляющей приводит к возникновению небольшого вращающего момента у цилиндрической оболочки, что увеличивает уровень напряжений на границе оболочки и подложки и повышает риск ее отрыва от подложки.

Таким образом, на основании проведенной работы можно заключить, что при формировании цилиндрических оболочек аддитивным способом целесообразно использовать технологию наплавки по спирали и применять менее теплопроводные конструкционные материалы (стали и титановые сплавы).

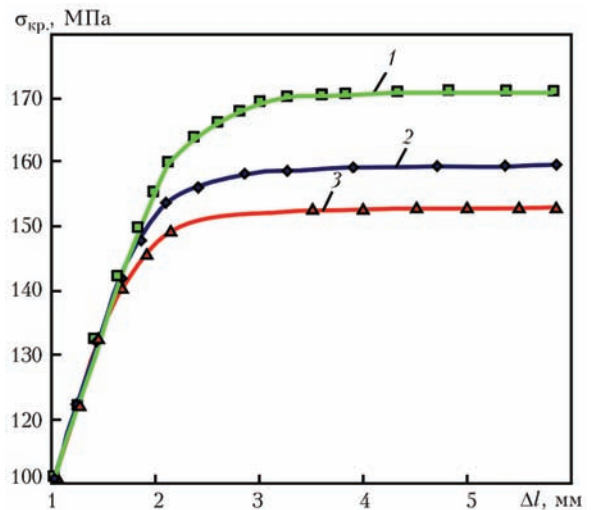


Рис. 10. Устойчивость цилиндрических оболочек, полученных различными способами: *1* — многослойной наплавкой по спирали; *2* — традиционным из листа; *3* — многослойной наплавкой по кольцу

Выводы

1. Показано, что использование деформируемых алюминиевых сплавов в аддитивном процессе создания цилиндрических оболочек не целесообразно в связи с тем, что цилиндрическая конструкция остывает заметно медленнее и повторный разогрев достигает более глубоких слоев, что приводит к росту размера зерна и заметному разупрочнению конструкций из этих сплавов.

2. Для улучшения технологии создания тонкостенной цилиндрической оболочки аддитивным способом целесообразно использовать алгоритм последовательного нанесения аддитивных слоев по спирали и применять менее теплопроводные конструкционные материалы (стали и титановые сплавы).

3. Повышенная устойчивость цилиндрических оболочек, полученных многослойной наплавкой по спирали, к осевой нагрузке связана с наличием малых остаточных напряжений (10...20 МПа), которые образуются на границе аддитивных слоев вследствие усадочных явлений.

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. Буланов И. М., Воробей В. В. (1998) *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*: учеб. для вузов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана.
3. (2017) *ВМС США напечатали готовый к погружению подводный аппарат*. <https://hi-news.ru/technology/vms-ssha-napechatali-gotovuj-k-pogruzeniyu-podvodnyj-apparat.html>
4. Ночовная Н. А., Анташев В. Г. (2007) Титан спускается на Землю. *Мир транспорта*, **4**. <http://www.viam.ru/public>.
5. (2016) Титан — материал XXI века. *Судостроение. Металлургия. Машиностроение. Энергетика*. <http://www.crisp-prometey.ru/about/activities/titanovyue-splavy-60.pdf>
6. Каблов Е. Н. (2007) Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники. *В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007*. Москва, ВИАМ, 20–26.
7. Дубинчик Е. В., Пастушков В. Г., Янковский Л. В. (2013) Особенности применения композитных материалов в строительстве. *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*, **3**, 175–181.
8. Голеньков В. А., Дмитриев А. М., Кухарь В. Д. и др. (2004) *Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением*. Москва, Машиностроение.
9. Барвинок В. А., Кирилин А. Н., Комаров А. Д. (2002) *Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов*. Москва, Наука и технологии.
10. Григоренко Г. М., Шаповалов В. А., Жуков В. В. (2016) Аддитивное производство металлических изделий (Обзор). *Автоматическая сварка*, **5–6**, 148–153.
11. Wong K. V., Hernandez A. (2012) A review of additive manufacturing. *International scholarly research network — mechanical engineering*, **2012**, Article ID 208760, doi:10.5402/2012/208760.
12. Махненко О. В., Миленин А. С., Великоиваненко Е. А. и др. (2017) Моделирование температурных полей для различных типов трехмерных образцов при их послыном формировании на оборудовании электронно-лучевой наплавки xBEAM 3D Metal Printer. *Сб. докл. восьмой между. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка». <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2017.pdf>.
13. 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.
14. 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.

15. Шаповалов Е. В., Долиненко В. В., Коляда В. А. и др. (2016) Применение роботизированной и механизированной сварки в условиях возмущающих факторов. *Там же*, **7**, 46–51.
16. Lukas H. L., Fries S. G., Sundman B. (2007) *Computational Thermodynamics: The Calphad Method*. Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
17. Костин В. А., Григоренко Г. М. (2017) Особенности формирования структуры 3D изделия из стали S460M в аддитивной металлургической технологии. *Современная электрометаллургия*, **3**, 33–42.
18. Григоренко Г. М., Костин В. А., Жуков В. В. (2017) Моделирование металлургического аддитивного процесса создания конструкций из стали 09Г2С. *Там же*, **2**, 35–44.
19. Lorenz R. (1911) Die nicht assensymmetrische. *Knickung dünnwandiger Hohlzylinder Zeitschrift*, **7**, 241–260.
20. Тимошенко С. П. (1914) К вопросу о деформации и устойчивости цилиндрической оболочки. *Вестн. о-ва технол.*, **21**, 785–792.
21. Карпов В. (2010) *Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения*. В 2-х ч. Ч. 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. Москва, ФИЗМАТЛИТ.

References

1. Krivoshapko, S.N. (2013) On possibilities of shell constructions in modern architecture and building industry. *Stroit. Mekhanika Inzh. Konstrukts. i Sooruzhenij*, **1**, 51–56 [in Russian].
2. Bulanov, I.M., Vorobej, V.V. (1998) Technology of rocket and aerospace structures from composite materials. In: *Manual for institutes of higher education*. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman [in Russian].
3. (2017) *3D printed NAVY US vessel ready to immersion*. <https://hi-news.ru/technology/vms-ssha-napechatali-gotovuj-k-pogruzeniyu-podvodnyj-apparat.html>
4. Nochovnaya, N.A., Antashev, V.G. (2007) Titanium goes down to Earth. *Mir Transporta*, **4**. <http://www.viam.ru/public> [in Russian].
5. (2016) Titanium is the material of 21st Century. *Sudostroenie. Metallurgiya. Mashinostroenie. Energetika*. <http://www.crisp-prometey.ru/about/activities/titanovyue-splavy-60.pdf> [in Russian].
6. Kablov, E.N. (2007) Main results and directions of development of materials for prospective aeronautical engineering. In: *75 years. Aircraft materials: Transact. of VIAM 1932–2007*. Moscow, VIAM, 20–26 [in Russian].
7. Dubinchik, E.V., Pastushkov, V.G., Yankovsky, L.V. (2013) Peculiarities of application of composite materials in building industry. *Modernizatsiya i Nauchn. Issledov. v Transportnom Komplekse*, **3**, 175–181 [in Russian].
8. Golenkov, V.A., Dmitriev, A.M., Kukhar, V.D. et al. (2004) *Special technological processes and equipment of pressure treatment*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Barvinok, V.A., Kirilin, A.N., Komarov, A.D. (2002) *High-efficient technological processes for manufacture of components of piping and fuel systems of flying vehicles*. Moscow, Nauka i Tekhnologii [in Russian].
10. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, **5–6**, 148–153.
11. Wong, K.V., Hernandez, A. (2012) A review of additive manufacturing. *International scholarly research network — mechanical engineering*, **2012**, Article ID 208760, doi:10.5402/2012/208760.

12. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modeling of temperature field for different types of 3D samples at their layer-by-layer forming on installation using electron beam surfacing equipment xBeam 3D Metal Printer. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies and Materials Processing*. Kiev, IAW. <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2017.pdf> [in Russian].
13. Jandric, Z., Labudovic, M., Kovacevic, R. (2004) Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 44(7–8), 785–796.
14. 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.
15. 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.
16. Lukas, H.L., Fries, S.G., Sundman, B. (2007) *Computational Thermodynamics: The Calphad Method*. Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
17. 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].
18. 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].
19. Lorenz, R. (1911) Die nicht assensymmetrische. *Knickung dunnwandiger Hohlzylinder Zeitschrift*, 7, 241–260 [in German].
20. Timoshenko, S.P. (1914) To problem of deformation and stability of cylindrical shell. *Vest. O-va Tekhnol.*, 21, 785–792 [in Russian].
21. Karpov, V. (2010) Strength and stability of reinforced rotation shells. In: 2. Pts. Pt 1: *Models and algorithms of strength and stability*. Moscow, FIZMATLIT [in Russian].

МОДЕЛЮВАННЯ АДИТИВНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК

В. А. Костін, Г. М. Григоренко

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі представлені результати моделювання температурних полів, напружень і деформацій при формуванні адитивної багат шарової конструкції з алюмінієвого сплаву 1561, низьколегованої конструкційної сталі марки 09Г2С і титанового сплаву марки Grade 2. На підставі експериментальних результатів, отриманих в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, при наплавленні адитивних шарів з даних матеріалів проведено комп'ютерне моделювання з метою підвищення продуктивності адитивного процесу. В ході розрахунків 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 способом доцільно використовувати технологію наплавлення по спіралі і застосовувати менш теплопровідні матеріали (конструкційні сталі, титанові сплави). Бібліогр. 21, табл. 1, іл. 10.

Ключові слова: адитивне виробництво; моделювання; наплавлення по спіралі; циліндричні оболонки; стійкість; остаточні напруження

MODELING OF ADDITIVE PROCESS OF FORMATION OF THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS

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 work presents the results of modeling the temperature fields, stresses and deformations during formation of the additive multi-layer structure of aluminium alloy 1561, low-alloy structural steel of 09G2s grade and titanium alloy Grade 2. On the basis of experimental results, obtained at the E.O. Paton Electric Institute, the computer modeling was carried out during the additive surfacing of these materials to improve the technique of the process conducting. In the course of calculations the effect of algorithm of successive deposition of additive layers (surfacing of cylindrical shell around the circumference or in spiral) on distribution of temperatures during surfacing and its resistance to external loads was analyzed. It was established that during the formation of cylindrical shells by an additive method it is rational to apply the technology of surfacing in spiral and to use the less heat-conducting structural materials (structural steels, titanium alloys). Ref. 21, Table 1, Fig. 10.

Key words: additive production; modeling; surfacing in spiral; cylindrical shells; resistance; residual stresses

Поступила 22.05.2018