

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАЛОГО ТРЕХМЕРНОГО ОБРАЗЦА ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ФОРМИРОВАНИИ*

**О. В. МАХНЕНКО¹, А. С. МИЛЕНИН¹, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО¹,
Н. И. ПИВТОРАК¹, Д. В. КОВАЛЬЧУК²**

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ЧАО «НПО «Червона Хвиля». 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 15. E-mail: master@chervonahvilya.com

С целью оптимизации процесса послойного формирования титановых конструктивных элементов авиакосмического назначения посредством современных электронно-лучевых технологий xBeam 3D Metal Printer (xBeam) был проведен комплекс исследований кинетики температурных полей и напряженно-деформированного состояния таврового профиля с помощью методов математического и компьютерного моделирования. На основе результатов исследований были показаны способы оптимизации температурных полей для обеспечения равномерного распределения по высоте и по длине изделия путём рационального выбора времени между проходами наплавки формирующих валиков и переменной мощности источника. Кроме того, показаны характерные поля напряжений и деформаций, формирующиеся в изделии в процессе его изготовления, а также возможности применения технологических приемов для снижения остаточного формоизменения. Библиогр. 26, табл. 2, рис. 13.

Ключевые слова: послойное формирование, электронный луч, температурное поле, напряжённно-деформированное состояние, оптимизация, математическое моделирование

В настоящее время аддитивные технологии в производстве титановых конструктивных элементов со сложной геометрией являются перспективной альтернативой традиционному производству, в первую очередь для авиакосмической промышленности и медицины [1–9]. Это обусловлено тем, что стоимость переплава отходов из титановых сплавов в результате механической обработки средних и крупных деталей зачастую выше, чем затраты при послойном формировании такого типа объектов, а для малоразмерных деталей повышается оперативность изготовления единичных экземпляров по индивидуальным заказам.

Существует несколько различных подходов получения металлических конструкций на основе принципа послойного формирования объекта. Эти подходы отличаются по типам расходных материалов и используемым источникам нагрева. По типам используемых расходных материалов эти подходы можно разделить на две основные группы: спекание или сплавление металлических порошков [1, 2, 5–10] и наплавка с подачей расходных материалов (присадочных проволок и т.п.) [1, 4, 11–13].

Методы, использующие порошковые расходные материалы, позволяют получать сложные геометрические объекты с очень высокой точностью

выполнения, в частности, для получения трехмерных пористых конструкций [1–3, 5–8, 10, 14–17]. Такого типа конструкции с успехом используются в медицине в качестве имплантатов [7, 9, 13, 18]. При этом скорость нанесения крайне низка, что ограничивает использование данных технологий для средне- и крупногабаритных конструкций.

Скорость нанесения, при использовании технологий на основе присадочных проволок, значительно выше, в большинстве случаев на порядок. Кроме того, в таких подходах эффективность использования расходных материалов также существенно выше и может достигать 100 % [1].

В качестве источников нагрева в подходах, использующих присадочные проволоки, выступают лазер, электронный луч или электрическая дуга. Подходы на основе лазерных технологий наиболее популярны в настоящее время из-за их точности [1, 4, 12, 19], тем не менее, их энергетическая эффективность мала (2...5 %) [1, 4]. Электронно-лучевая наплавка отличается большим КПД, но требует высокого вакуума. Как показывают результаты исследований структуры металла, электронно-лучевая наплавка позволяет получать детали сложной формы с однородной структурой металла наплавленных слоев, аналогичной струк-

* По материалам доклада, представленного на VIII Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 19–23 сентября 2016 г., Одесса, Украина.

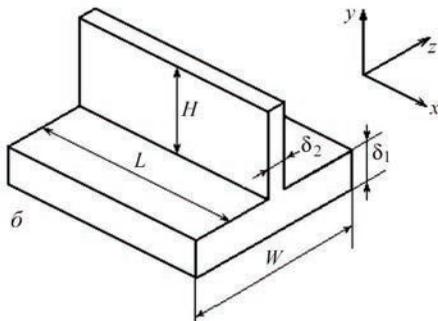
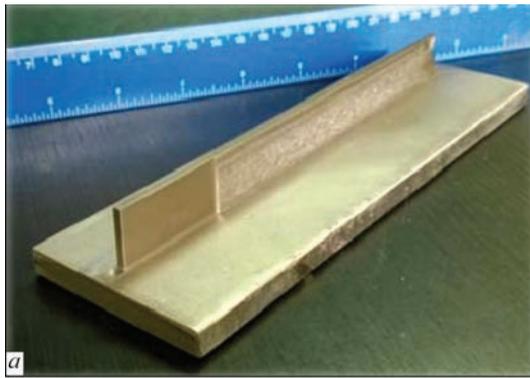


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) таврового профиля из титанового сплава, получаемого путем электронно-лучевого многослойного формирования

туре основного материала (подложки) [20]. По этой причине данная методика наиболее перспективна в авиакосмической промышленности [3, 4].

Основным недостатком подходов, использующих наплавку металлической проволокой, является возникновение значительных остаточных напряжений и деформаций [13]. Высокие остаточные напряжения могут существенно снижать эксплуатационные характеристики полученных компонентов, особенно их долговечность при циклических нагрузках, а остаточные деформации могут приводить к недопустимому искажению формы и отбраковке заготовок деталей.

Оптимизация аддитивных технологий наплавки на основе применения математического мо-

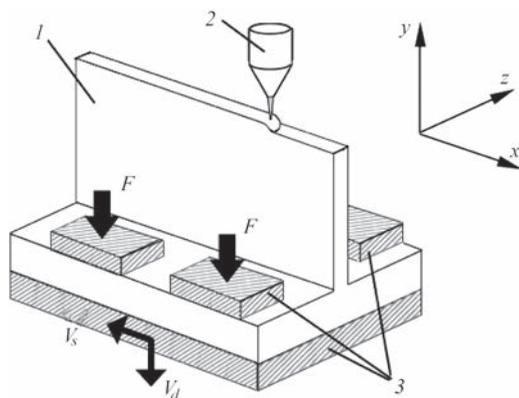


Рис. 2. Технологическая схема процесса электронно-лучевого многослойного формирования образцов таврового сечения: 1 — формируемое изделие; 2 — модуль нагрева и подачи проволоки; 3 — технологическая оснастка

делирования с целью снижения объема экспериментальных исследований требует значительных компьютерных и временных затрат [11, 15]. Тем не менее, выбор оптимальных параметров наплавки на основе компьютерного прогнозирования является наиболее перспективным.

Технологическая схема процесса многослойного формирования трехмерных образцов. Технологическая схема xBeam на примере многослойного формирования таврового профиля (рис. 1) представлена на рис. 2. Процесс проходит в условиях среднего вакуума (в диапазоне 10^{-2} мбар), что, с одной стороны, позволяет избежать загрязнения металла в силу высокого сродства с кислородом и/или азотом, а с другой стороны обеспечивает достаточную фокусировку электронного луча. Подложка формируемого изделия (в рассматриваемом случае это полка таврового профиля) помещается в силовую оснастку, которая прижимает ее к подвижной платформе усилием F , перемещает относительно неподвижного источника нагрева с заданной скоростью V_s в плоскости пластины и периодически, по мере наплавления каждого валика, в перпендикулярном направлении со скоростью V_d .

Источник нагрева представляет собой составной комплекс систем генерирования электронного луча в форме полого конуса, сходящегося максимально близко к поверхности формируемой конструкции и подачи присадочной проволоки (рис. 3, а). Это позволяет реализовать эффективное и достаточно равномерное расплавление присадочной проволоки без существенного ее перегрева, а также создавать ванну расплава на подложке или нанесенном ранее слое для быстрого растекания жидкого присадочного материала по поверхности. Экспериментально определенное распределение потока энергии в таком электронном луче представлено на рис. 3, б.

Согласно лабораторным исследованиям, изделие в результате послойной наплавки получило

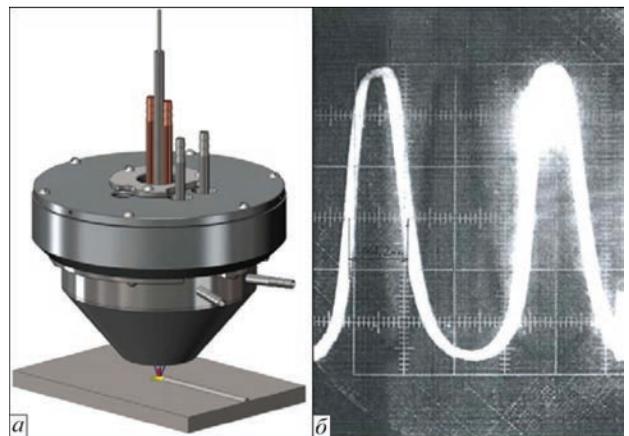


Рис. 3. Схема модуля электронно-лучевого нагрева (а) и экспериментально определенное распределение потока энергии в электронном луче (б)

определенную остаточную изгибную деформацию в результате образования сварочной усадки металла в области наплавки. Кроме того, как показали предварительные эксперименты, торцевые области характеризуются нерегулярной структурой стенки профиля в результате неравномерности нагрева при наплавке. Одним из преимуществ используемой схемы xBeam является возможность программного контроля тепловложения, что дает широкие возможности оптимизации технологических параметров рассматриваемого процесса. Также эффективным параметром оптимизации является варьирование времени задержки между наплавкой каждого из валиков и рациональный выбор способа и степени предварительного подогрева.

Методика исследований. С целью предварительного анализа кинетики состояния образца таврового профиля из титанового сплава был использован программный пакет WeldPrediction, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины для прогнозирования физико-механических процессов в сварке и родственных технологиях [21–23]. Решение задач теплопроводности, напряженно-деформированного состояния металла в процессе предварительного подогрева, последующей наплавки вплоть до остывания изделия и снятия технологической оснастки производилось на совместных прямоугольных сетках разбиения. На каждом этапе наплавки менялась форма изделия в соответствии со скоростью наплавки и геометрией формирующихся при этом валиков. Целесообразным является решение задач нестационарной термопластичности производить в двухмерной постановке путем усреднения трехмерного расчетного поля температур по толщине. Это позволяет не только изучить развитие состояния исследуемого изделия с достаточной точностью, но и снизить ресурсоемкость исследований.

Так, для численного анализа кинетики температурного поля $T(x, y, z)$ от времени t при xBeam наплавке изделия, показанного на рис. 1, использовалось конечно-разностное решение трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T], \quad (1)$$

где $c\gamma$, λ — удельная теплоемкость и теплопроводность материала, соответственно.

Граничные условия, необходимые для решения задачи (1), зависят от теплоотвода с поверхности изделия. Так, в области контакта с технологической оснасткой теплоотдача может быть описана законом Ньютона, тогда как на свободной поверхности характеризуется тепловым излучением (закон Стефана–Больцмана) с дополнительным вложением энергии с наплавляемого торца изделия в

случае расположения там источника нагрева. Таким образом, граничные условия для решения задачи теплопроводности в рассматриваемом случае имеют вид:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_T(T - T_C), & \text{в области контакта с оснасткой} \\ \varepsilon\sigma_{SF}(T^4 - T_C^4) - q, & \text{на свободных поверхностях,} \end{cases} \quad (2)$$

где n — нормаль к поверхности; α_T — коэффициент теплоотдачи; T_C — температура окружающей среды; ε — степень черноты материала; σ_{SF} — константа Стефана–Больцмана; q — поток энергии электронно-лучевого нагрева.

Связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций может быть сформулирована на основе обобщенного закона Гука с учетом температурных объемных изменений и ассоциированного закона пластического течения [24, 25]:

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon_{ij} = \psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m) + \delta_{ij}(K\sigma_m + \Delta\varepsilon_T) - b_{ij} \\ b_{ij} = \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m)^* + (K\sigma_m)^* \end{cases} \quad (3)$$

$$(i, j) = (x, y, z),$$

где $K = (1 - 2\nu) / E$; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $G = E / (2(1 + \nu))$; $\Delta\varepsilon_T$ — приращение деформаций, обусловленное термическим расширением металла; ψ — функция состояния материала, определяемая условием текучести, а именно

$$\begin{cases} \Psi = \frac{1}{2G}, & \text{если } \sigma_i < \sigma_T(T), \\ \Psi > \frac{1}{2G}, & \text{если } \sigma_i = \sigma_T(T), \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}.$$

Пластические деформации определяются из уравнения

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \left(\Psi - \frac{1}{2G} \right) (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m), \quad (i, j = x, y, z). \quad (5)$$

Реализация условий (4) производится на каждом шаге прослеживания, при этом на каждой итерации по ψ напряжения σ_{ij} представляются из (5) в виде

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \frac{1}{\psi} \left(\Delta\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta\varepsilon \right) + J_{ij}; \\ J_{ij} = \frac{(b_{ij} - \delta_{ij}b) + \delta_{ij} \left(K\sigma^* - \frac{\Delta\varepsilon_T}{K} \right)}{\psi}, \end{cases} \quad (6)$$

Т а б л и ц а 1. Технологические параметры процесса многослойного формирования лабораторного образца из титанового сплава (рабочий газ — гелий)

Параметр	Значение	Примечания
Расходный материал (пруток)	Диаметр 1,6 мм	Титан марки ВТ1-0
Подложка (плита)	8×30×70 мм	Титан марки ВТ1-0
Вакуум	5·10 ⁻¹ Па	После начала подачи газа вакуум снизился до 1 Па
Ускоряющее напряжение	15 кВ	-
Ток электронного луча	300 мА	-
Мощность электронного луча	4,5 кВт	-
Скорость подачи расходного материала	14 мм/с	-
Скорость перемещения подложки по оси X	14 мм/с	-
Смещение по оси Y перед каждым новым циклом наплавки	0,5 мм	-
Количество наплавленных слоев	37	-

где

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \epsilon_{xx} + \Delta \epsilon_{yy} + \Delta \epsilon_{zz}}{3}, \quad b = \frac{b_{xx} + b_{yy} + b_{zz}}{3}.$$

Связь между тензором $\Delta \epsilon_{ij}$ и вектором приращений перемещений ΔU_i представляется в виде

$$\Delta \epsilon_{ij} = \frac{\Delta U_{i,j} + \Delta U_{j,i}}{2}, \quad (7)$$

где запятая соответствует дифференцированию.

Разрешающая система алгебраических уравнений относительно вектора приращений перемещений в узлах конечных элементов на каждом шаге прослеживания и итерации по ψ определяется в результате минимизации функционала (вариационный принцип Лагранжа)

$$\Theta_i = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta \epsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_p^{m,n,r}, \quad (8)$$

где \sum_V, \sum_{S_p} — оператор суммы по внутренним и поверхностным конечным элементам, соответственно; P_i — силовой вектор внешнего воздействия ($i = x, y, z$).

Таким образом, система уравнений, которая позволяет получить решение относительно приращений вектора перемещений на каждом шаге прослеживания и итерации по ψ для соответствующего конечного элемента, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta_i}{\partial \Delta U_{m,n,r}} = 0; \\ \frac{\partial \Theta_i}{\partial \Delta V_{m,n,r}} = 0; \\ \frac{\partial \Theta_i}{\partial \Delta W_{m,n,r}} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Решение указанных задач нестационарной термопластичности согласно приведенному математическому описанию проводилось путем численного прослеживания упругопластических деформаций, начиная с этапа предварительного подогрева подложки, наплавки каждого валика вплоть до полного остывания изделия и снятия

технологической оснастки, в рамках соответствующего конечно-элементного описания [26].

Результаты моделирования. Рассматриваемый технологический процесс моделировался на основе результатов лабораторных исследований по наплавке таврового изделия из титанового сплава (рис. 1). Основные параметры данного технологического цикла приведены в табл. 1.

В результате решения температурной задачи (рис. 4) показано, что температурные поля для рассматриваемого случая имеют трехмерный характер, при этом в наплавляемой тонкой стенке таврового профиля температура распределена достаточно равномерно в поперечном сечении, а состояние полки характеризуется относительно невысокими температурами градиентами.

Одной из основных задач, которая рассматривалась на данном этапе исследований, было изучение потенциальных возможностей достижения стационарного температурного поля в изделии при наплавке каждого из слоев. Это позволит получить благоприятные условия формирования валиков, а также обеспечить равномерность структурного состояния металла по всему сечению изделия, и, соответственно, гомогенность его физико-механических и эксплуатационных свойств. Как показывают результаты численного моделирования согласно изложенной выше методике, при наплавке валиков не наблюдается значительного перегрева жидкого металла после того, как он попадает на поверхность формируемого изделия, что свидетельствует об эффективном отводе тепла в металл изделия и окружающую среду. Это позволяет получать достаточный прогрев металла для обеспечения сплавления валиков и избежать перегрева и чрезмерной текучести жидкого металла.

Характерной особенностью распределения максимальных температур в области наплавки является локально более низкие температуры в начале валика и небольшой перегрев в конце. Это может быть компенсировано, в частности, переменной по длине мощностью электронно-лучевого источника нагрева. Для примера было рассмотрено три режима наплавки валиков (табл. 2): базовый режим (1) и

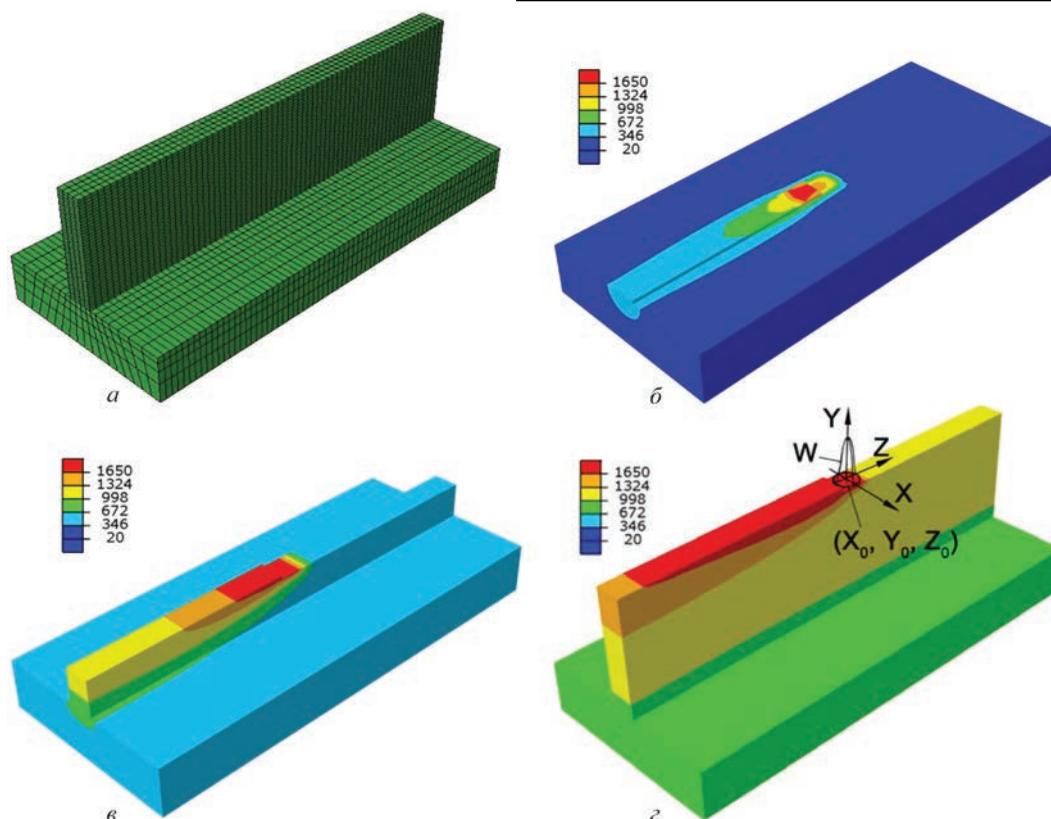


Рис. 4. Конечно-элементная модель (а) и распределение температур в тавровом образце в процессе послойного формирования: б — наплавка 1-го валика; в — наплавка 12-го валика; г — наплавка 37-го валика и схема модели распределенного источника нагрева

режимы избыточной мощности в начале наплавки (2) и сниженной в конце (3).

Выбранные режимы позволяют путем изменения мощности источника на относительно небольших отрезках наплавляемого валика компенсировать избыточный отвод тепла в неразогретое изделие в начале наплавки и избыточное накопление тепла возле конечной части кромки, и достичь более равномерного распределения максимальных температур (в качестве примера на рис. 5 приведено расчетное распределение температур при наплавке десятого валика). Дальнейшее увеличение мощности на начальном этапе формирования стенки таврового профиля (более 160 %) нецелесообразно, так как вызовет локальный перегрев данной области конструкции.

Кроме обеспечения однородности структурного состояния металла вдоль направления наплавки валиков важным является поддержание

Таблица 2. Модельные режимы наплавки валиков в процессе формирования изделия таврового профиля при переменной мощности электронно-лучевого источника нагрева

Номер режима	Мощность источника на различных участках наплавляемого элемента, кВт (%)		
	0...2 мм	2...68 мм	68...70 мм
1	4,5 (100)	4,5 (100)	4,5 (100)
2	6,3 (140)	4,5 (100)	4,3 (95)
3	7,2 (160)	4,5 (100)	4,3 (95)

максимально приближенного к стационарному температурного режима наплавки каждого из слоев стенки рассматриваемого профиля для однородности металла по высоте. Как показывают результаты расчетов (рис. 6), на примере температуры, усредненной по площади валика через $2,7 \cdot 10^{-3}$ с после его наплавки в центральной части изделия таврового профиля, стационарный режим имеет место после восьмого валика.

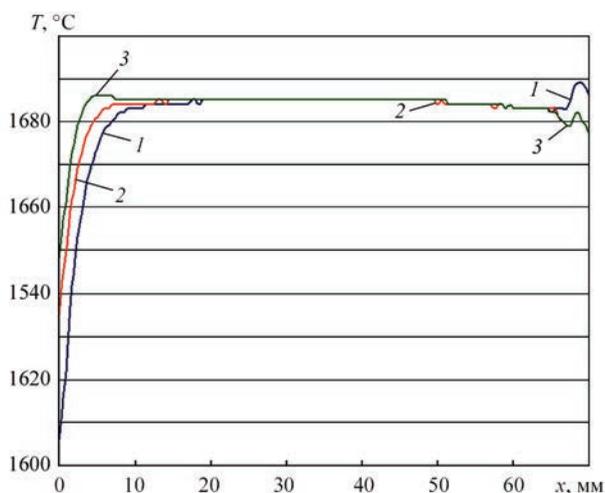


Рис. 5. Распределение максимальных температур по всей длине наплавленного валика для различных режимов теплового воздействия источника (режимы 1–3 согласно табл. 2)

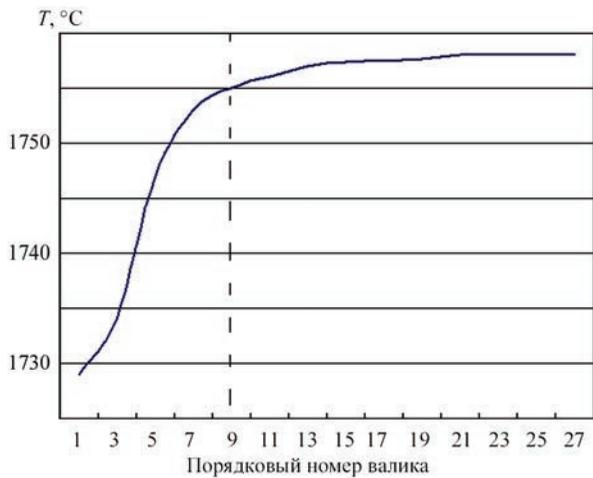


Рис. 6. Зависимость пространственно-усредненной по площади валика максимальной температуры наплавленного металла в центральном сечении профиля от порядкового номера валика

Еще одним важным фактором, который необходимо учитывать при выборе рациональных параметров наплавки рассматриваемого образца, является время задержки t_r между наплавкой каждого из валиков. С одной стороны, увеличение времени задержки позволяет более равномерно перераспределять тепло от каждого из валиков наплавки, с другой, уменьшение t_r ведет к снижению энергоемкости рассматриваемого процесса и меньшему накоплению профилем тепловой энергии. На рис. 7 показано влияние величины t_r на величину установившейся температуры в центральной части изделия. Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что при $t_r < 25$ с наблюдается перегрев наплавляемой кромки изделия вплоть до переплава предыдущего наплавленного слоя. При $t_r > 40$ с стационарный режим является более благоприятным с точки зрения качества формируемого элемента, но при этом на начальном этапе наплавки может быть несплавление слоев металла между собой в резуль-

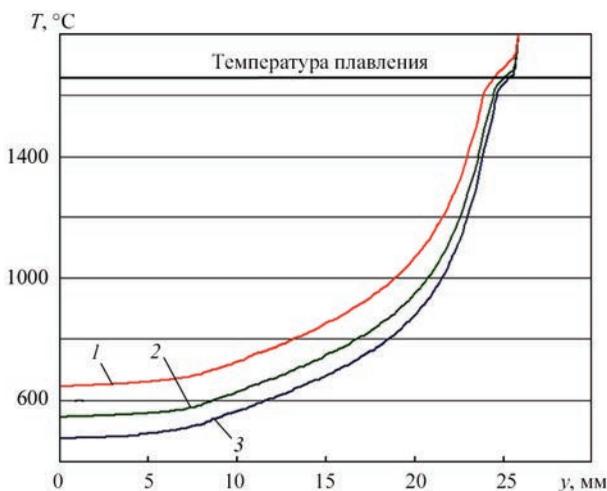


Рис. 7. Распределение максимальных температур по высоте профиля при наплавке 37-го валика для различного времени задержки между валиками: 1 — $t_r = 20$ с; 2 — 30; 3 — 40

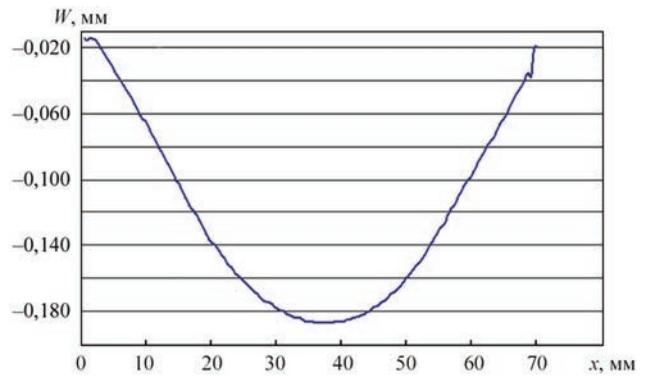


Рис. 8. Остаточное формоизменение нижней плоскости подложки изделия таврового профиля после завершения ЭЛН, полного остывания и снятия силовой оснастки

тате интенсивного отвода тепла в конструкцию. Поэтому диапазон $25 \text{ с} < t_r < 35 \text{ с}$ можно считать рациональным при выборе регулярной задержки наплавки каждого из валиков по всей высоте наплавляемого элемента.

Остаточное формоизменение и внутренние напряжения в сформированном изделии могут являться факторами, ограничивающими применение рассматриваемой технологии. Необратимые деформации подложки рассматриваемого элемента таврового профиля в результате продольной усадки могут превышать допуски, предписанные конкретными конструктивными решениями, тогда как высокие остаточные напряжения снижают сопротивляемость к усталостному воздействию и повышают склонность к стресс-коррозионному разрушению. Наиболее часто для улучшения эксплуатационных характеристик конструкций, в частности, сварных, используют термомеханическую обработку. Но дополнительный технологический этап обработки изделий влечет повышение себестоимости производства, поэтому рациональным является оптимизация процесса xBeam с учетом особенностей кинетики напряженно-деформированного состояния конструкции конкретной геометрии. Так, для рассматриваемого изделия таврового профиля характерным и наиболее неблагоприятным является остаточное деформирование по механизму продольной усадки, в результате чего вся конструкция получает изгиб в продольной плоскости (рис. 8). Ввиду относительно небольшой длины данного элемента его остаточное формоизменение невелико (около 0,2 мм), но при необходимости увеличения длины конструкции остаточный прогиб может выходить за пределы требуемых допусков (рис. 9).

Напряженное состояние в плоскости изделия (рис. 10) характеризуется относительно невысоким уровнем остаточных напряжений как в продольном направлении, так и в поперечном. Характерной особенностью является некоторая концентрация напряжений σ_{yy} в результате кон-

цевых эффектов. Кроме того, в области перехода полки тавра в стенку имеются повышенные растягивающие продольные напряжения σ_{xx} , обусловленные общим изгибом конструкции.

Эффективным технологическим приемом снижения остаточных деформаций сварных конструкций является предварительный прогиб (выгиб), который может реализовываться за счет силовой оснастки. На рис. 11 представлены результаты расчета прогиба продольной оси таврового наплавленного образца длиной $L = 300$ мм после послыйного формирования на изначально ровную подложку и с учетом предварительного прогиба W_0 . Видно, что оптимальная величина предварительного прогиба может существенно снижать остаточные деформации общего формоизменения.

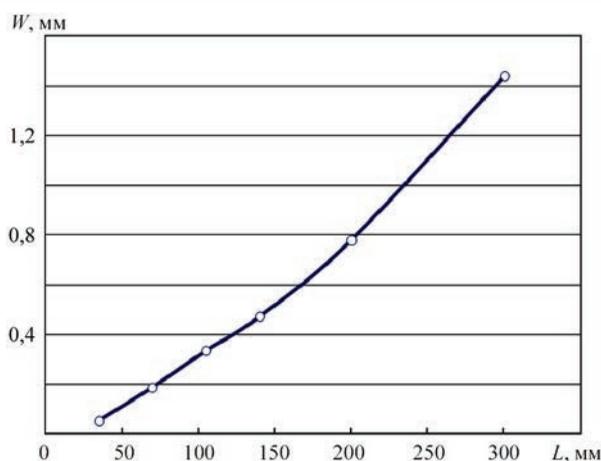


Рис. 9. Зависимость остаточного прогиба таврового профиля W от его длины L после снятия оснастки

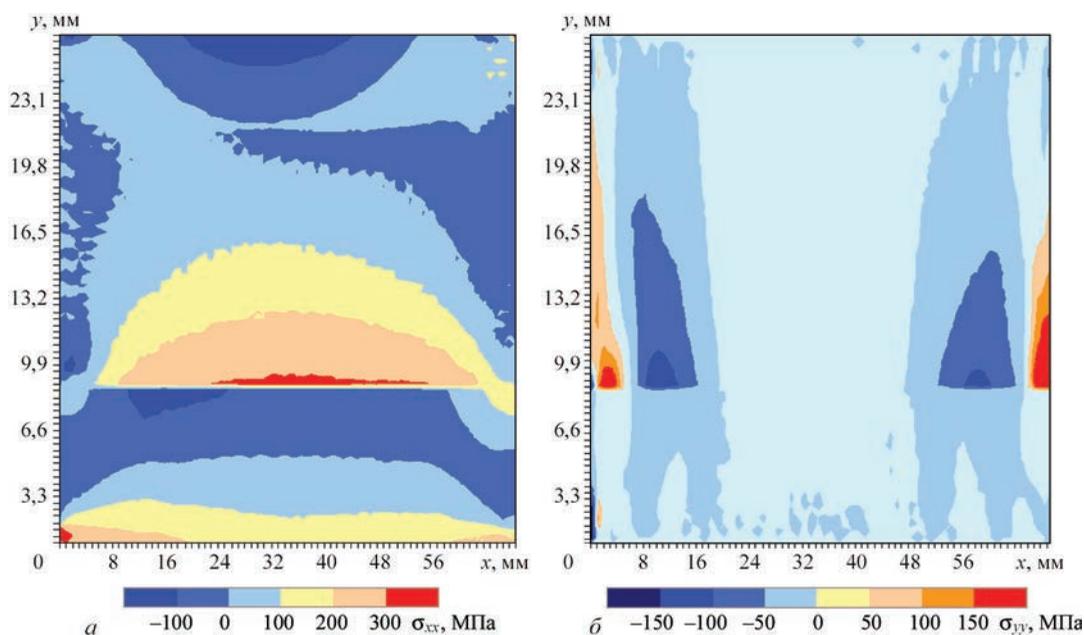


Рис. 10. Распределение остаточных напряжений σ_{xx} (а) и σ_{yy} (б) в изделии после его формирования при режиме 1 (см. табл. 2)

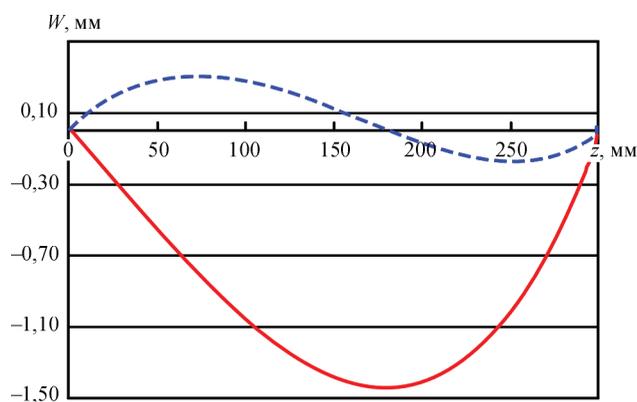


Рис. 11. Форма продольной оси таврового наплавленного образца $L = 300$ мм после послыйного формирования на изначально ровную подложку (сплошная кривая) и с учетом предварительного прогиба $W_0 = 1,5$ мм (штриховая)

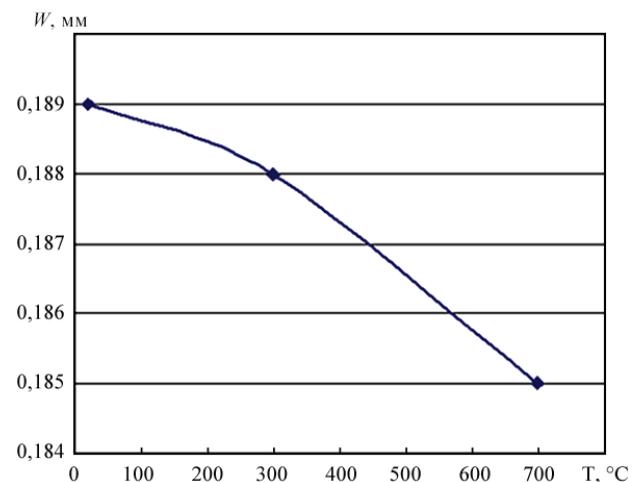


Рис. 12. Зависимость остаточного прогиба W наплавленного образца $L = 70$ мм после снятия оснастки от температуры предварительного подогрева T_0

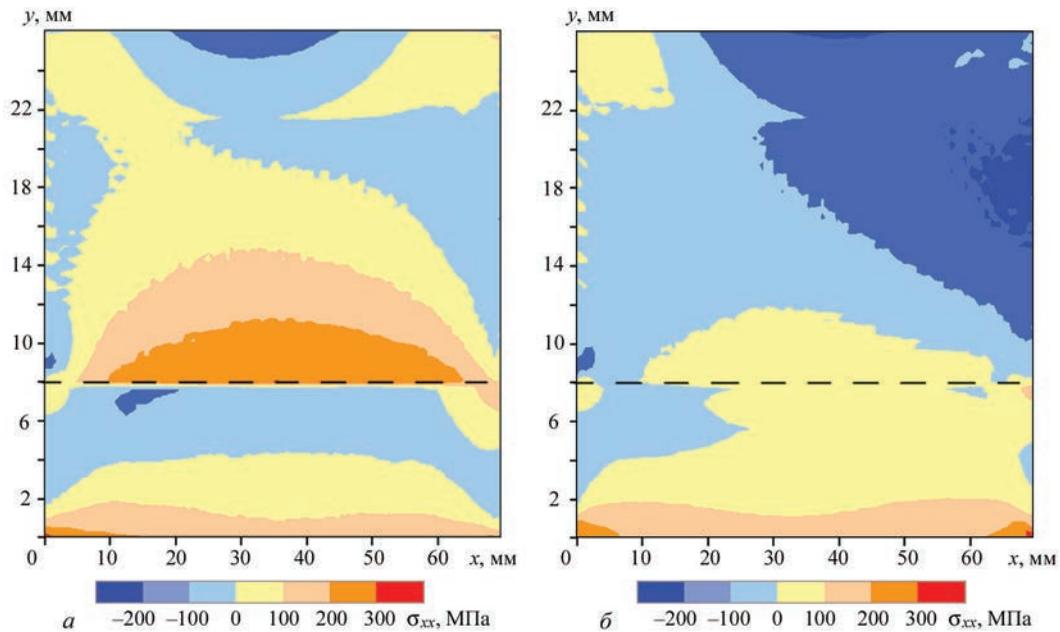


Рис. 13. Распределение продольных остаточных напряжений σ_{xx} в изделии после его формирования при предварительном подогреве подложки до $T_0 = 300$ (а) и 700 °С (б)

Результаты оценки влияния предварительного подогрева подложки на остаточные деформации таврового образца длиной 70 мм показаны на рис. 12. Величина остаточного прогиба при подогреве подложки от комнатной температуры до 700 °С практически не меняется (2 %), а остаточные напряжения в области перехода полки в стенку существенно падают при увеличении температуры подогрева (рис. 13).

Выводы

1. Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования кинетики температурного и напряженно-деформированного состояний конструкции таврового профиля из титанового сплава в процессе электронно-лучевой наплавки xBeam 3D Metal Printing. На основе базовых параметров получения лабораторных образцов таврового профиля исследованы характерные особенности распределения температурного поля. Показано, что определенная стабилизация температурных циклов по длине наплавляемой стенки может быть достигнута путем задания переменной мощности источника нагрева: до 160 % мощности на начальном этапе с целью более существенного прогрева кромки изделия и менее 95 % мощности на конечном этапе для компенсации процесса накопления тепла в конце образца.

2. Показано существенное влияние длительности задержки между наплавкой каждого из формирующих валиков на характер распределения температуры: сокращение времени задержки менее 20 с приводит к существенному накоплению

тепла в металле изделия и, как результат, значительному перегреву и чрезмерному проплавлению, что может снизить качество формируемого изделия.

3. Путем численного прогнозирования развития деформированного состояния изделия в процессе наплавки, последующего остывания и снятия усилий технологической оснастки показано формирование остаточных продольных изгибных деформаций на уровне 0,2 мм. При этом изменение длины изделия существенно влияет на величину продольного изгиба, что может потребовать соответствующей термомеханической правки. Эффективным технологическим приемом снижения остаточных деформаций является предварительный прогиб (выгиб), который может реализовываться за счет силовой оснастки.

4. На основе анализа результатов прогнозирования остаточного напряженного состояния рассматриваемой модельной конструкции показано формирование избыточных растягивающих продольных напряжений в области перехода полки таврового профиля в стенку, что вызвано общим изгибом конструкции. Кроме того, в области ее торцов формируются выраженные концентраторы напряжений σ_{yy} . Результаты оценки влияния предварительного подогрева подложки на напряженно-деформированное состояние таврового образца показали, что остаточные напряжения в области перехода полки в стенку существенно падают при увеличении температуры подогрева и при $T_0 = 700$ °С практически обеспечиваются условия высокого отпуска.

Авторы выражают признательность Г. Ф. Розынке и Д. С. Гаврилову за участие в подготовке статьи.

1. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / Ding D. et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – 81(1). – P. 465–481.
2. Cellular titanium by selective electron beam melting / Heisl P. et al. // Adv. Eng. Mater. – 2007. – № 9. – P. 360–364.
3. Kristofer Ek. Additive manufactured material // Master of Science Thesis Stockholm. – 2014. – 88 p.
4. Additive manufactured Ti–6Al–4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications / Brandl E. et al. // Physics Procedia. – 2010. – December. – P. 595–606.
5. Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties / Mandil G. et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – Iss. 5. – P. 1835–1846.
6. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting / Murr L. E. et al. // Acta Materialia. – 2010. – Vol. 58. – Iss. 5. – P. 1887–1894.
7. Characterization of cellular solids in Ti6Al4V for orthopaedic implant applications: Trabecular titanium / Marin E. et al. // Mechanical Behaviour of Biomedical Materials. – 2010. Vol. 3. – Iss. 5. – P. 373–381.
8. Preliminary fabrication of thin-wall structure of Ti6Al4V for dental restoration by electron beam melting / Wahyudin P. Syam et al. // Rapid Prototyping Journal. – 2012. – April. – P. 230–240.
9. Assessment by X-ray CT of the effects of geometry and build direction on defects in titanium ALM parts / Leonard F. et al. // Conference on Industrial Computed Tomography (ICT). – 2012. – P. 85–93.
10. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / Golkovski M. G. et al. // Materials Science & Engineering A. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317.
11. Effect of interpass temperature on in-situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding / Yan Ma et al. // Adv. Manufacturing. – 2015. – Vol. 8. – P. 71–77.
12. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti–6Al–4V components / Blanka A. Szost et al. // Materials and Design. – 2015. – Vol. 89. – P. 559–567.
13. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties / Baurfeld B. et al. // Materials and Design. – 2010. – Vol. 31. – P. 106–111.
14. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance / Edwards P. et al. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – Vol. 135. – Iss. 6. – P. 061016/1–061016/7.
15. Powder-bed electron-beam-melting additive manufacturing: powder characterization, process simulation and metrology / Gong X. et al. // ASME Early Career Technical Journal. – 2013. – № 12. – P. 59–66.
16. Recent Progress of Additive Manufactured Ti–6Al–4V by Electron Beam Melting / Nai M. L. S. et al. // Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference 2016. – P. 691–704.
17. Additive manufacturing solutions for improved medical implants / Petrovic V. et al. // Biomedicine, InTechOpen. – 2012. – March. – P. 147–180.
18. Electron beam melting fabrication of porous Ti6Al4V scaffolds: cytocompatibility and osteogenesis / Jia Lv. et al. // Adv. Eng. Mater. – 2015. – P. 1–8.
19. Evaluation of titanium alloys fabricated using rapid prototyping technologies – electron beam melting and laser beam melting / Mari Koike et al. // Materials. – 2011. – № 4. – P. 1776–1792.
20. 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей / С. В. Ахонин и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 5–6 (753). – С. 141–144.
21. Махненко В. И. Проблемы экспертизы современных сварных конструкций ответственного назначения // Там же. – 2013. – № 5. – С. 22–29.
22. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций // Там же. – 2008. – № 5. – С. 5–10.
23. Міленін О. С. Імовірнісний аналіз стану магістральних трубопроводів із виявленими дефектами та ресурс їх експлуатації після ремонту під тиском // Вісник Тернопільського національного технічного університету. Спеціальний випуск. – 2011. – Ч. 1. – С. 73–81
24. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320 с.
25. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Там же, 2006. – 618 с.
26. Методы и технологии параллельных вычислений для математического моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом вязкого разрушения / Е. А. Великоиваненко и др. // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 6. – С. 42–52.

Махненко О. В.¹, Міленін О. С.¹, Великоіваненко О. А.¹,
Півторак Н. І.¹, Ковальчук Д. В.²

¹ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua
²ПрАТ «НВО «Червона Хвиля».
03680, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 15.
E-mail: master@chervonahvilya.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ
І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
МАЛОГО ТРИВИМІРНОГО ЗРАЗКА
ПРИ ЙОГО ПОШАРОВОМУ ФОРМУВАННІ

З метою оптимізації процесу пошарового формування титанових конструкційних елементів авіакосмічного призначення за допомогою сучасних електронно-променевиx технологій xBeam 3D Metal Printer (xBeam) було проведено комплекс досліджень кінетики температурних полів і напружено-деформованого стану таврового профілю за допомогою методів математичного та комп'ютерного моделювання. На основі результатів досліджень було показано способи оптимізації температурних полів для забезпечення рівномірного по висоті та по довжині виробу розподілу шляхом раціонального вибору часу між проходами наплавлення формуючих валиків і змінної потужності джерела. Крім того, показані характерні поля напружень та деформацій, що формуються у виробі в процесі його виготовлення, а також можливості використання технологічних заходів для зниження залишкової формозміни. Бібліогр. 26, табл. 2, рис. 13.

Ключові слова: пошарове формування, електронний промінь, температурне поле, напружено-деформований стан, оптимізація, математичне моделювання.

Поступила в редакцію 14.02.2017