

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО АДДИТИВНОГО ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ 09Г2С

Г. М. Григоренко, В. А. Костин, В. В. Жуков

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

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

Представлены результаты моделирования термических полей, напряжений, деформаций и перемещений при формировании аддитивной конструкции из стали 09Г2С на подложке. Для проведения компьютерного моделирования использовали расчетный пакет междисциплинарных исследований COMSOL Multiphysics. В работе учитывалось влияние температуры на физико-химические параметры стали. Результаты для моделирования получены с использованием комплекса имитации термомеханического состояния термического цикла сварки металла под действием растяжения Gleeble 3800 (коэффициент линейного расширения) и установки высокотемпературного термического анализа ВДТА-8М (теплоемкость, теплопроводность). Выполненные исследования показали, что при аддитивном нанесении слоев стали 09Г2С на подложку наибольший уровень остаточных напряжений и деформаций достигается на границе первого слоя и подложки и составляют 280...320 МПа. Напряжения между слоями наплавленного металла существенно ниже (до 50 МПа). Установлено, что с увеличением количества наносимых слоев уровень напряжений на границе аддитивный слой/подложка возрастает нелинейно и со временем не зависит от количества наносимых слоев. При аддитивном процессе для предотвращения заметной деформации подложки следует использовать предварительный подогрев до температур не ниже 300...320 °С. Разработанное программное обеспечение может быть использовано для математического моделирования аддитивного процесса формирования конструкций из сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Библиогр. 13, табл. 1, ил. 7.

Ключевые слова: аддитивное производство; моделирование; сталь; наплавление; напряжение; микроструктура

Введение. Аддитивные технологии — новый высокоэффективный металлургический метод создания конструкций в современном промышленном производстве [1–3]. Аддитивные технологии (additive manufacturing) или технологии послойного нанесения материала путем наплавления, напыления или синтеза сегодня являются наиболее динамично развивающимся направлением «цифрового» производства. Они позволяют значительно ускорить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки и обеспечить быстрое создание новой готовой продукции.

Существует множество технологий, которые условно можно назвать аддитивными. Все эти технологии объединяет процесс формирования детали путем добавления нового материала (от англ. «add» — добавлять) в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления «лишнего» материала.

Термином аддитивное производство (АП) принято называть группу технологических методов быстрого проектирования и создания изделий, которые позволяют создавать цельные, объемные изделия из различных материалов по трехмерной компьютерной модели [4]. Стандарт ASTM F2792-

12А дает определение термину АП как «метод соединения материалов, при котором происходит послойное создание объекта по заданной цифровой трехмерной модели». Первые методы аддитивного производства появились в начале 80-х годов прошлого века. В основном они были ориентированы на производство изделий из полимерных материалов, пластика и резина. В настоящее время эти методы нашли успешное коммерческое применение в металлургии, машиностроении, архитектуре, космическом и аэрокосмическом производстве, медицине, военной промышленности [5]. Помимо традиционных методов аддитивного производства развивались новые подходы, использующие для создания изделий металлические материалы и сплавы.

По сравнению с классическими методами производства методы АП имеют ряд преимуществ:

возможность полной автоматизации процесса получения изделия (включая этап создания цифровой трехмерной модели), что снижает количество времени необходимого на его изготовление в целом;

высокая конкурентоспособность методов АП для изготовления изделий из дорогостоящих титановых, никелевых сплавов и сплавов из туго-

Классификация методов АП		
Принцип формирования изделий	Название метода / оригинальное название (англ.)	Расходуемый материал
Сплавление порошковой подложки	Выборочное лазерное спекание / Selective laser sintering (SLS)	Металлический порошок
	Выборочное лазерное оплавление / Selective laser melting (SLM)	»
	Электронно-лучевое оплавление / Electron beam melting (EBM)	»
Впрыскивание связующего материала	Струйная 3D печать на порошковой подложке / Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	»
Наплавление концентрированным источником энергии	Лазерное изготовление конечных форм / Laser engineered net shaping (LENS)	»
	Лазерная наплавка расходуемой проволокой / Wire fed laser beam (WFLB)	Проволока
	Изготовление форм электронным лучом / Electron beam freeform fabrication (EBF)	»
	Дуговое аддитивное производство проволокой / Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	»
Ламинирование металлических листов	Ультразвуковое аддитивное производство / Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)	Листовой металл, фольга

плавких материалов ввиду низкого коэффициента потерь материала. Это преимущество особенно важно в аэрокосмической промышленности, изготовление деталей в которой зачастую связано с высоким коэффициентом расхода материала.

Методы АП не лишены недостатков. Они имеют сравнительно низкую производительность, относительно низкую точность изготовления и характерную ребристость или «слоистость» поверхности, требуют наличия вакуумной камеры или камеры с защитной атмосферой, в процессе наплавления деталей формируются высокие остаточные напряжения и деформации.

В таблице приведены современные методы аддитивного производства и их наиболее широко используемые в литературе названия. Стандарт ASTM F2792-12A предлагает подразделять методы АП металлических изделий по используемым ими принципам, которые основаны на: сплавлении (спекании) порошковой подложки; впрыскивании связующего материала на порошковую подложку; постоянном наплавлении концентрированным источником энергии; ламинировании листового металлического материала.

Все методы АП, которые основаны на сплавлении, спекании или склеивании порошка условно могут рассматриваться как варианты одного и того же процесса. Отличие заключается лишь в способе соединения частиц металлического порошка.

В методах АП, основанных на сплавлении или спекании металлического порошка, используют в качестве нагревающего устройства высококонцентрированные источники энергии (лазер или электронный луч), которые непосредственно воз-

действуют на слой порошковой подложки, производя его выборочное сплавление. Смещаясь в вертикальном направлении происходит послойное наращивание монолитного изделия.

Применение метода выборочного лазерного спекания позволяет создавать изделия из металлических композиций различного химического состава и физико-металлургических свойств.

Методы АП, основанные на сплавлении металлических порошковых материалов, проводятся в камере с вакуумной или защитной атмосферой.

На данный момент методы АП, при которых используют в качестве расходуемого материала порошок, более широко применяются по сравнению с методами, использующими металлическую проволоку.

Применение металлического порошка в АП дает ряд преимуществ, которые присущи методам порошковой металлургии. Например, позволяет производить изделия из различных порошковых металлических композиций.

Производительность порошковых методов АП достаточно низкая и составляет несколько грамм в минуту. Это сильно ограничивает возможности промышленного применения данных технологий при изготовлении крупногабаритных изделий. Использование защитной камеры и особенности работы с порошковыми материалами заметно снижают эффективность применения порошковых методов АП.

Методы АП, в которых используют в качестве расходуемого материала проволоку, обладают большей эффективностью по сравнению с порошковыми. Они имеют более высокую энер-

гоэффективность, высокий коэффициент использования материала, дают большую массовую производительность при создании крупногабаритных изделий.

Микроструктуры образцов, выполненных разными аддитивными методами, подобны [6]. Тем не менее, следует отметить более высокую пористость металла изделия, полученного порошковыми методами АП.

В зависимости от типа использования источника концентрированной энергии методы АП подразделяются на лазерные, электронно-лучевые, электродуговые и дуговые.

Лазерные и электронно-лучевые способы АП отличаются повышенной точностью создания изделий. По сравнению с лазерным и электронно-лучевым, электродуговое наплавление металлических проволок обладает более высокой эффективностью использования расходных материалов. Тем не менее, все методы АП проволокой имеют ряд общих особенностей, а именно: высокие остаточные напряжения и деформации, перегрев подложки, относительно низкую точность формы изготовления детали.

С точки зрения формирования структуры наплаваемого металла применение аддитивных методов позволяет сформировать более однородную и дисперсную структуру металла по сравнению с традиционной литой. Отсутствие химической неоднородности, дендритной и зональной ликвации связано с малым размером жидкой ванны и высокой скоростью кристаллизации наплаваемого металла [7, 8].

Для получения оптимальных свойств аддитивных конструкций необходимо выбрать соответствующий способ нанесения и тип используемого материала, предварительно создать математическую 3D модель. В процессе аддитивного наплавления необходимо контролировать формирующиеся температурные поля, деформации и напряжения в наплаваемых слоях с целью обеспечения формирования необходимой формы изделия, его структурного состояния и механических свойств.

Вместе с тем, непосредственное экспериментальное определение этих параметров в процессе наплавления является довольно сложной практической задачей. В решении ее могут помочь современные методы анализа металлургического производства — компьютерное моделирование 3D аддитивных процессов.

Необходимо также учитывать высокие остаточные напряжения и деформации, которые возникают при наплавлении металлической проволокой и

могут значительно понижать эксплуатационные характеристики изделий.

Цель настоящей работы заключалась в оптимизации параметров аддитивного процесса послойного формирования заготовки из стали 09Г2С на основе расчета температурных полей, напряжений и деформаций, формирующихся в процессе наплавления.

Материал и методика исследований. В качестве материала для компьютерного моделирования выбрана хорошо известная сталь 09Г2С. Выбор данной стали обусловлен как необходимостью учесть в процессе моделирования зависимость свойств стали (плотность, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент термического расширения) от температуры, так и отсутствием у этой стали в рассматриваемом температурно-временном интервале охлаждения структурных превращений.

Последнее обстоятельство важно в связи с тем, что в этом случае при моделировании достаточно решать только температурную и деформационную задачу. Это значительно упрощает расчетную модель и сильно уменьшает время расчетов.

Одной из важных проблем, которые возникают при моделировании процессов, использовании новых материалов и сплавов, является отсутствие исходных экспериментальных данных о зависимости свойств материалов от температур, скоростей охлаждения, нагрузок. Наличие свойств новых материалов в открытом доступе достаточно ограничено.

В представленной работе температурную зависимость свойств моделируемой стали 09Г2С определяли экспериментально путем использования комплекса имитации термомеханического состояния термического цикла сварки металла под действием растяжения Gleeble 3800 (физические свойства) и метода высокотемпературного дифференциального термического анализа ВДТА-8М (термические свойства).

Коэффициент термического расширения и характер изменения плотности стали 09Г2С в зависимости от температуры нагрева изучали с использованием комплекса имитации термомеханического состояния металла Gleeble 3800, оснащенного быстродействующим дилатометром.

Комплекс Gleeble 3800 позволяет имитировать физические процессы, которым подвергается металл в процессе обработки стали, — прокатку, штамповку, ковку, осадку (прессование), термическую обработку и т. д.

Исследования выполняли на цилиндрических образцах диаметром 6 мм и длиной 80 мм, изго-

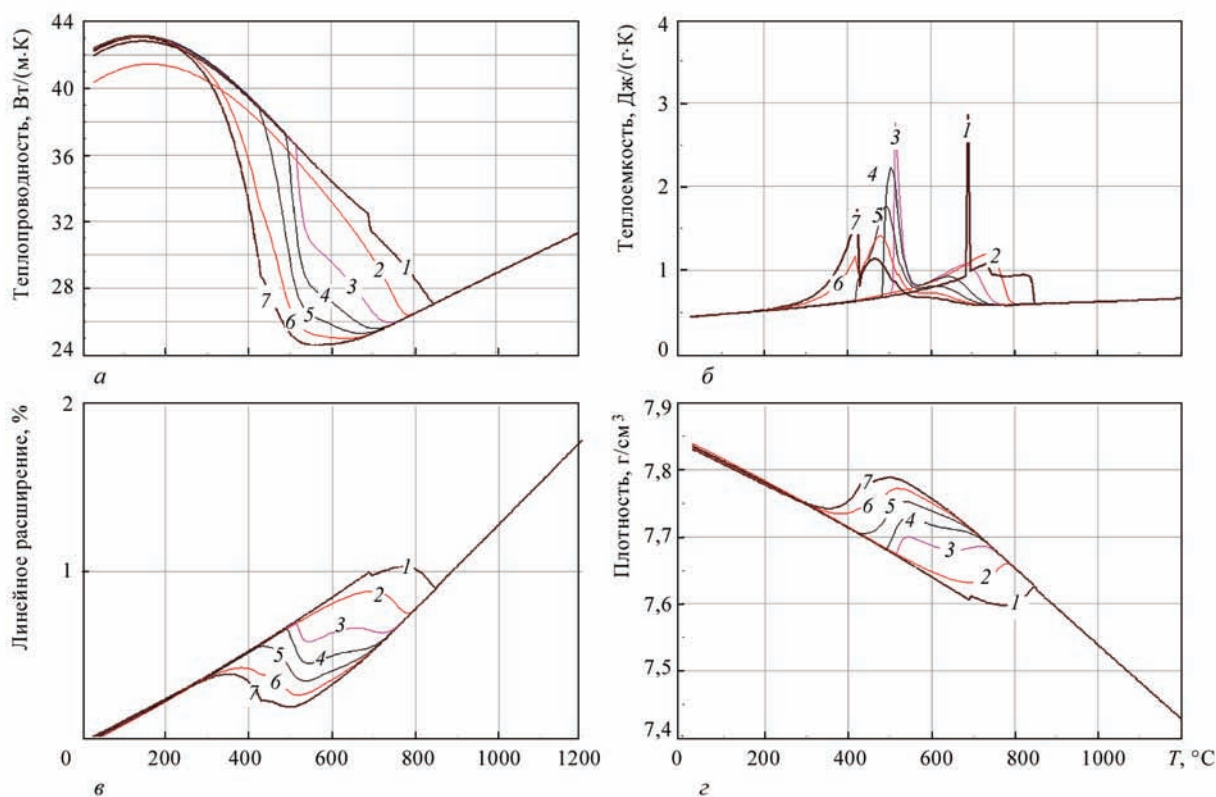


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на физико-термические свойства стали 09Г2С: а — теплопроводность; б — теплоемкость; в — линейное расширение; г — плотность при различных скоростях охлаждения, °C/c: 1 — 0,1; 2 — 1; 3 — 5; 4 — 10; 5 — 15; 6 — 20; 7 — 25

товленных из листового проката стали 09Г2С толщиной 20 мм. В соответствии с разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона методикой, по заданной программе образцы нагревали в вакуумной камере до температуры 1170 °С, выдерживали при этой температуре в течение 5 мин, а затем охлаждали с разными скоростями. Скорости охлаждения составляли 1; 5; 10; 15; 20; 25 °C/c в интервале температур 500...800 °С. Выбор таких скоростей охлаждения позволяло достаточно точно воспроизводить параметры охлаждения термических циклов при электродуговом наплавлении (тепловые и временные).

Термическая система комплекса Gleeble 3800 позволяет проводить высокоточные дилатометрические измерения коэффициентов линейного расширения, температур фазовых превращений и расчет количества образующихся фаз. Обработку данных эксперимента выполняли интерактивно в приложении Origin 9.0.

Коэффициенты теплоемкости и теплопроводности стали 09Г2С определяли с использованием установки высокотемпературного дифференциального термического анализа ВДТА-8М, в которой образцы нагревали до расплавления и автоматически фиксировали величину эндотермических и экзотермических эффектов и температуру плавления стали.

Влияние температуры нагрева на физико-термические свойства стали 09Г2С представлены на рис. 1.

Для проведения компьютерного моделирования использовали расчетный пакет междисциплинарных исследований COMSOL Multiphysics [9, 10], который позволяет объединить задачи диффузии, тепло- и массопереноса, гидродинамики, механики деформируемого твердого тела в одну взаимосвязанную задачу.

Пакет COMSOL Multiphysics включает в себя набор предварительно сконфигурированных пользовательских интерфейсов, модулей и инструментов моделирования, которые значительно облегчают процесс создания математической модели и задания 3D модели расчетной области.

Физическую модель аддитивного процесса нанесения слоев строили исходя из ряда допущений. Геометрия наплавки состоит из слоев материала из стали 09Г2С толщиной 1 мм, шириной 3 мм и длиной 28 мм. Количество наплавленных слоев определялось условием, при котором нанесение последующих слоев материала уже не оказывало влияние на уровень напряжений на границе слои/подложка, т. е. выходило на стационарный режим — «полочку». Исходя из результатов эксперимента было

принято, что в начальный момент времени капли расплавленного металла стали 09Г2С имели температуру равную температуре плавления металла $T_{пл} = 1823$ К. Слои наносили на подложку из стали марки Ст3. Для упрощения геометрии построения модели предполагалось, что капли представляют собой элементы правильной формы в виде параллелепипедов размером $1 \times 3 \times 1$ мм. Свойства исходного материала аддитивных слоев (плотность, теплоемкость, линейное расширение) однородны и зависят от температуры (рис. 1). Движение жидкой фазы не учитывали. В работе сделано предположение, что дуговой источник нагрева или лазер не нагревают подложку.

В расчетах принята модель линейно-упругого материала. Напряжения и деформации в модели возникают в результате развития усадочных явлений — уменьшения объема материала при охлаждении. Теплопередача в слоях осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением в окружающую среду с температурой $T_{внеш}$.

Кинетика изменения температурных и деформационных полей для рассматриваемого случая нанесения аддитивных слоев носит трехмерный характер, в результате чего нельзя ограничиться рассмотрением 2D модели.

Математическая модель нанесения аддитивных слоев может быть описана рядом математических уравнений.

Для численного анализа кинетики изменения температурных полей в наплавляемых слоях от времени использовали решение трехмерного нестационарного уравнения 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 — теплопроводность материала.

Граничные условия, необходимые для решения уравнения (1), определяются балансом подвода и стока тепла с поверхности наплавляемой детали. Так, в области контакта наплавляемого изделия с подложкой сток тепла может быть описан законом Ньютона, тогда как на свободной поверхности тепловое излучение подчиняется закону Стефана–Больцмана. В случае достаточно близкого расположения источника нагрева (например дугового) к торцу наплавляемого изделия необходимо учитывать дополнительный разогрев от источника нагрева.

Граничные условия для решения уравнения теплопроводности (1) имеют следующий вид:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} h(T - T_{внеш}) & \text{в области контакта с подложкой} \\ \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{внеш}^4) - q & \text{на свободных поверхностях} \end{cases}, \quad (2)$$

где n — нормаль к поверхности; $h = 10$ Вт/м²·К — коэффициент теплоотдачи [11]; $\varepsilon = 0,8$ — степень черноты материала; σ_0 — константа Стефана–Больцмана; $T_{внеш} = 293$ К — температура окружающей среды; q — поток тепла от источника нагрева. На данном этапе исследований этот поток не учитывался ($q = 0$ Вт/м²). В дальнейших работах предполагается учитывать этот дополнительный поток тепла и использовать в качестве источника нагрева лазерный, электронно-лучевой и электродуговой, которые характеризуются различным пространственным распределением тепловой мощности.

Связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций (закон Гука в тензорной форме) и перемещениями во времени может быть записана в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla(FS) + f_{vol}, \quad S = C : E_{el}, \quad (3)$$

где u — перемещение; F — градиент деформаций; S — тензор напряжений Кирхгофа; E_{el} — тензор упругих деформаций; C — тензор модулей упругости; f_{vol} — объемные силы, связанные с термическим расширением материала на основе уравнений термоупругости для: малых деформаций — $E_{th} = \alpha(T - T_{внеш})$, больших — $J_{th} = (1 + \alpha(T - T_{внеш}))^3$, где α — коэффициент термического расширения.

В работе нанесение слоев рассматривали как последовательный процесс нанесения капель-«кубиков». Реальную форму капель и действие сил поверхностного натяжения на ее поверхности пока не учитывали. Решение дифференциальных уравнений проводили методом конечных элементов (МКЭ) путем построения неоднородной адаптивной сетки и задания в каждой ячейке сетки интерполяционного многочлена Лагранжа второго порядка. Максимальный размер элементов сетки составлял 0,1 мм. Алгебраическую систему уравнений, полученную дискретизацией обыкновенных дифференциальных уравнений, вычисляли в решателе MUMPS (time dependent solver), который является составной частью пакета COMSOL Multiphysics.

Результаты моделирования. В результате проведенных численных экспериментов рассчитано поле температур (рис. 2), напряжений (рис. 3, а), деформаций и перемещений (рис. 3, б) в каждый

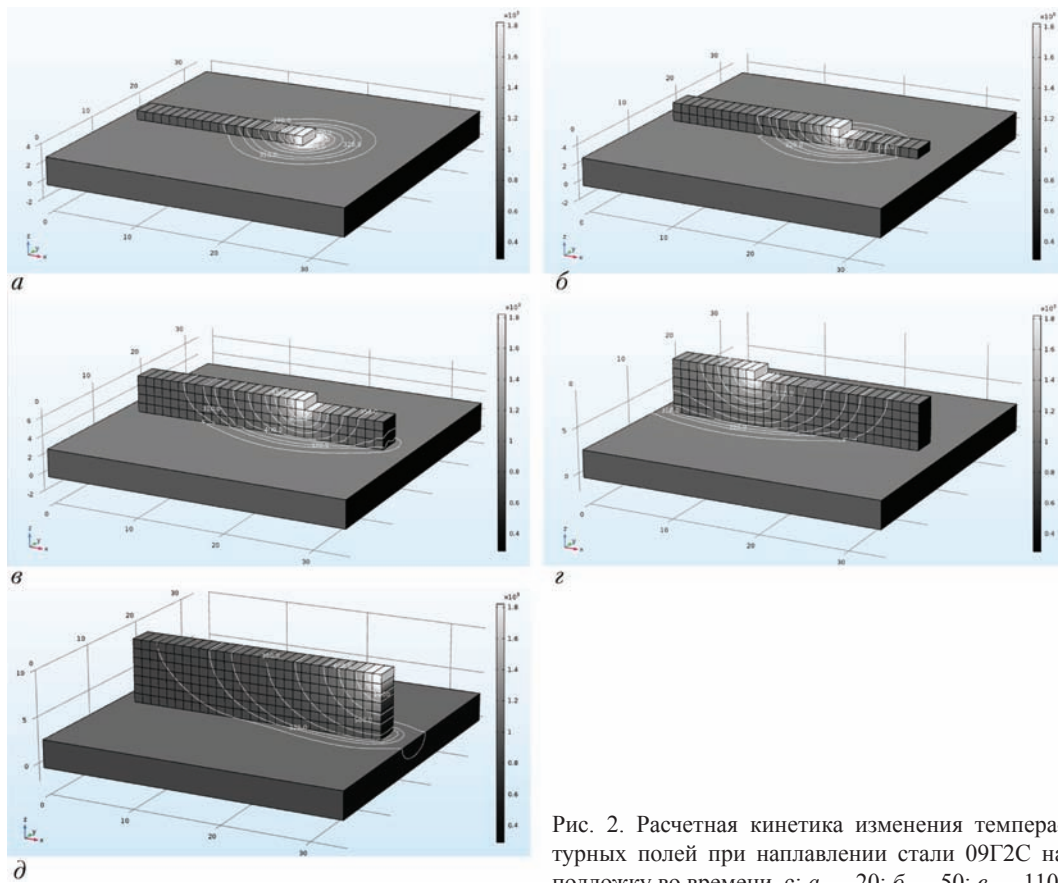


Рис. 2. Расчетная кинетика изменения температурных полей при наплавлении стали 09Г2С на подложку во времени, с: а — 20; б — 50; в — 110; г — 160; д — 210

момент времени при последовательном наплавлении аддитивных слоев на подложку.

По результатам решения температурной задачи (рис. 2) видно, что кинетика изменения температурного поля имеет трехмерный характер, однако в наплавляемой тонкой стенке температура в поперечном направлении распределена достаточно однородно.

Одной из важных задач, которые решали на данном этапе исследований, было изучение возможности достижения стационарного температурного поля и поля напряжений при последовательном нанесении валиков. Решение этой задачи позволит оптимизировать технологический процесс, а также обеспечить равномерность струк-

турного состояния наносимых аддитивных слоев по всему сечению изделия и, следовательно, обеспечить однородность механических и эксплуатационных свойств.

Анализ кинетики изменения температурных полей (рис. 2) показал, что наносимый слой оказывает заметное влияние в основном на предыдущий, что связано с малым размером толщины слоя и его быстрым охлаждением.

Проведенный анализ результатов моделирования аддитивного процесса нанесения слоев из стали 09Г2С показал, что уровень напряжений на границе аддитивный слой/подложка изменяется от 280 до 320 МПа. На границах наносимых аддитивных слоев напряжения практически отсутствуют (не превышают 50 МПа) и, следовательно, исполь-

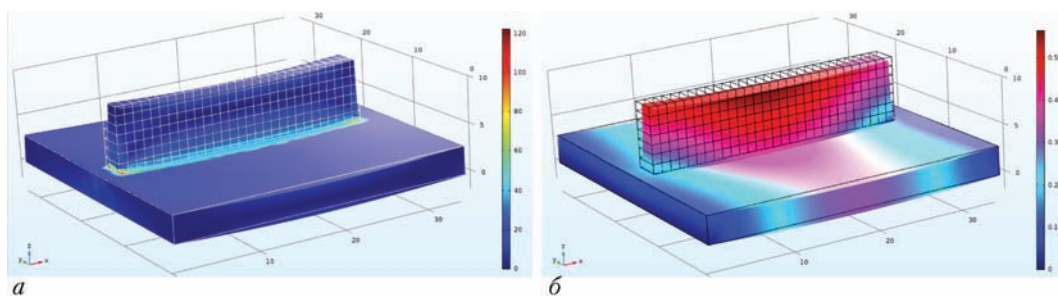


Рис. 3. Расчетные значения напряжений (а) и суммарных перемещений (б) при нанесении 7-ми аддитивных слоев из стали 09Г2С

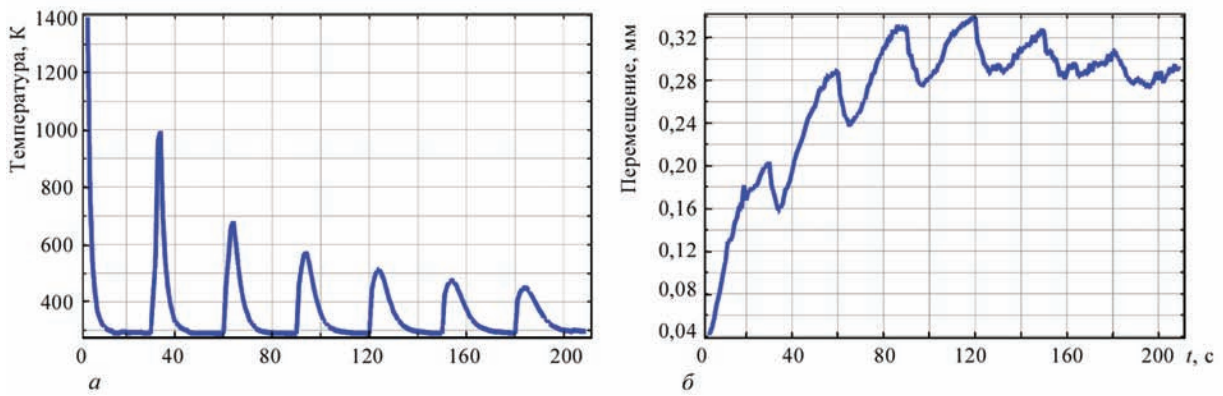


Рис. 4. Влияние времени (t) нанесения аддитивных слоев стали 09Г2С на: a — термический цикл; b — общий прогиб подложки в центральной части

зубая в расчетах модель линейно-упругого материала дает достаточно достоверные результаты.

Анализ влияния количества наносимых слоев на уровень напряжений и деформаций на границе слой/подложка показал (рис. 4), что с увеличением количества слоев эти параметры постепенно возрастают, однако величина приращения напряжений и перемещений постепенно снижается.

В ходе моделирования установлено, что после 50...60 с от начала процесса наплавления слоев, т. е. после нанесения 3-го слоя, дальнейшего возрастания напряжений на границе аддитивная стенка/подложка не происходит. Это позволяет ограничиться расчетом первых 3–4-х слоев и заметно снизить ресурсоемкость численных исследований. Несмотря на это, полученные результаты с достаточной точностью и достоверностью описывают процесс аддитивного наплавления.

В работе моделировали оснастку изделия, при которой фиксировались оба края пластины. Такой вид оснастки приводит к тому, что изделие в результате послойной наплавки получает остаточную изгибную деформацию в продольном направлении в результате развития усадочных

явлений — сокращения объема материала при охлаждении. Расчеты показали заметную деформацию подложки в ходе последовательного нанесения слоев. Максимальный прогиб в средней части подложки составил 0,32 мм (рис. 4, б).

Для предотвращения заметной деформации конструкции, по-видимому, следует использовать предварительный подогрев подложки или выполнять ее предварительный прогиб. Расчеты показывают (рис. 5, кривые 3, 4), что чем выше температура предварительного подогрева подложки, тем ниже напряжения на границе слой/подложка и меньше ее изгиб.

Анализ полученных результатов показывает (рис. 5), что повышение температуры предварительного подогрева на 300 °С позволяет снизить уровень напряжений на границе аддитивный слой/подложка в 2,5 раза и уменьшить изгиб конструкции в 2...3 раза. Уровень напряжений снижается с 300...320 МПа при 20 °С (без подогрева) до 90...100 МПа при температуре предварительного подогрева 320 °С (рис. 5, a , кривая 3, 4). Деформация конструкции снижается с 0,30...0,32 до 0,12...0,14 мм. Дальнейшее повышение температуры предварительного подогрева подложки

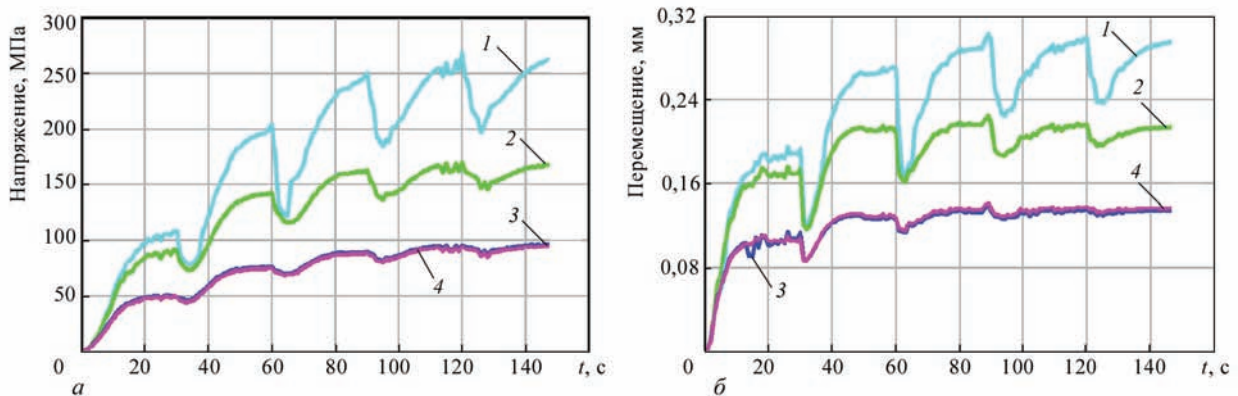


Рис. 5. Влияние температуры предварительного подогрева подложки на величину: a — напряжений по границе слой/подложка; b — перемещений; температура предварительного подогрева: 1 — 20; 2 — 120; 3 — 320; 4 — 420 °С

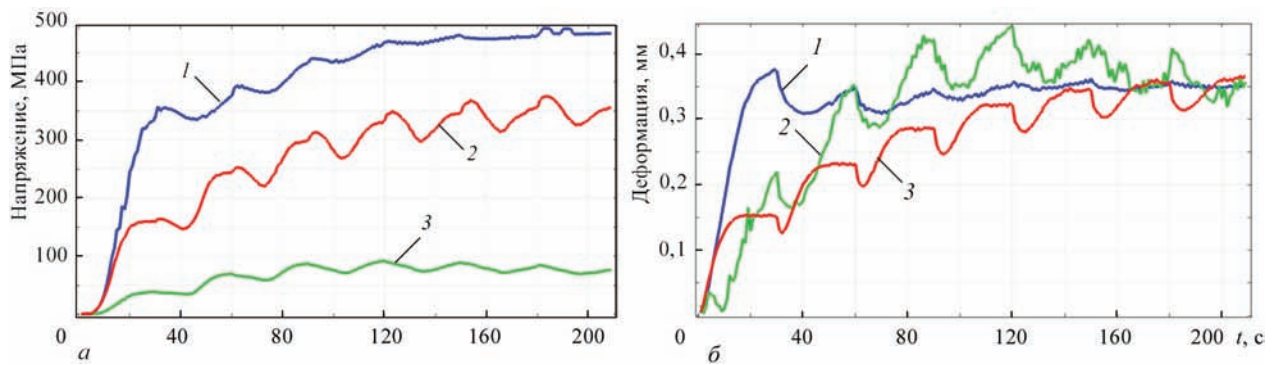


Рис. 6. Влияние толщины слоя на величину напряжений (а) и деформаций (б) аддитивной конструкции: 1 — 5,0; 2 — 1,0; 3 — 0,5 мм

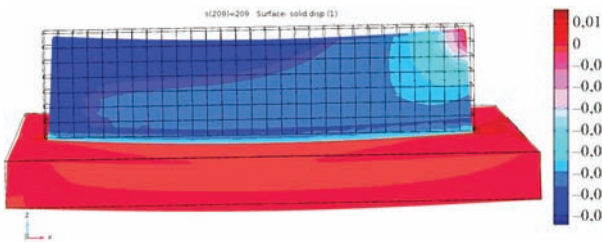


Рис. 7. Геометрия аддитивных слоев стали 09Г2С с учетом пластической деформации

выше 320 °С не влияет на величину напряжений и перемещений аддитивной конструкции.

Одна из задач, которую решали в процессе моделирования, состояла в том, чтобы установить влияние толщины наплавляемого слоя на параметры аддитивной конструкции.

С одной стороны, эффективность аддитивного процесса связана с количеством материала, нанесенного в единицу времени. Исходя из этого желательно увеличивать толщину слоя одного прохода. Это достигается либо за счет увеличения количества расплавленного металла, либо за счет снижения скорости процесса.

С другой стороны, увеличение количества расплавленного металла ограничивается тепловложением, получаемым от источника нагрева, а снижение скорости будет заметно сказываться на величине перегрева жидкого металла, что отрицательно повлияет на свойства изделия. В процессе наплавления слоев желательно добиваться создания температурного режима, который максимально приближен к стационарному, для получения однородных свойств изделия по высоте наплавки.

Поэтому в работе определяли влияние толщины слоя, которая в процессе моделирования составляла 0,5, 1,0 и 5,0 мм, на величину напряжений на границе слой/подложка, деформаций и средней температуры аддитивной конструкции.

Авторами работы [12] показано, что стационарный температурный режим в центральной части

таврового профиля достигается после нанесения на подложку 8-го слоя.

Установлено, что достижение стационарного режима аддитивного наплавления зависит от толщины наплавки. Для тонких слоев (0,5 мм) стационарный режим достигается после нанесения 3-го слоя (рис. 6, а, кривая 3), тогда как для более толстых слоев (1,0 и 5,0 мм) стационарный режим достигается после нанесения 6-ти, 7-ми слоев (рис. 6, а, кривая 1, 2).

Использование в расчетах модели поведения упруго-пластического материала вместо модели поведения линейно-упругого позволяет определить формоизменение наплавленных слоев при охлаждении вследствие пластической деформации (рис. 7). Расчеты показывают, что сужение подложки по длине составляет 2,17, а по высоте — до 0,5 мм.

При моделировании аддитивного процесса получения изделий из сталей с более сложным химическим составом необходимо учитывать структурные превращения. Это связано с тем, что, с одной стороны, в процессе охлаждения выделяется теплота превращения, что приводит к локальному повышению температуры, а, с другой стороны, превращение аустенита в бейнит или мартенсит сопровождается изменением свойств моделируемого слоя и заметным изменением его объема. Образование в наплавляемых слоях закалочных (мартенситных) структур может привести к их значительной деформации и даже разрушению.

В результате при моделировании аддитивных слоев к двум выше перечисленным дифференциальным уравнениям необходимо добавить уравнения структурных превращений: аустенит→феррит, аустенит→бейнит и аустенит→мартенсит.

Полученные результаты моделирования температурных полей, напряжений и деформаций могут быть использованы для решения практической задачи улучшения технологических параметров

аддитивного процесса формирования заготовок деталей и конструкций.

Выводы

1. При аддитивном процессе наплавления стали 09Г2С на подложку наибольший уровень остаточных напряжений и деформаций достигается на границе первого слоя и подложки и составляют от 280 до 320 МПа. Напряжения между наплавленными слоями существенно ниже (до 50 МПа).

2. Установлено, что с увеличением количества наносимых слоев уровень напряжений на границе аддитивный слой/подложка постепенно возрастает и со временем становится независимым от количества наносимых слоев. Достижение стационарного режима наплавления достигается после нанесения 6-ти, 7-ми слоев.

3. При нанесении слоев для предотвращения заметной деформации аддитивной конструкции следует использовать предварительный подогрев подложки до температур не ниже 300...320 °С.

4. В случае моделирования аддитивного процесса формирования изделий из сплавов (сталей) более сложного химического и структурного составов необходимо в математическую модель ввести уравнения структурных превращений.

Список литературы

1. Жуков В. В., Григоренко Г. М., Шаповалов В. А. (2016) Аддитивное производство металлических изделий (Обзор). *Автоматическая сварка*, **5–6**, 148–153.
2. Ахонин С. В., Вржижевский Э. Л., Белоус В. Ю., Петриченко И. К. (2016) 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей. *Там же*, **5–6**, 141–144.
3. Коржик В. Н., Хаскин В. Ю., Гринюк А. А. и др. (2016) Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий (Обзор). *Там же*, **5–6**, 127–134.
4. Kaufui V. Wong, Aldo Hernandez (2012) A review of additive manufacturing. International Scholarly Research Network. *Mechanical Engineering*, **2012**, 10 p. doi 10.5402/2012/208760.
5. Rizwan P. M. Ali, Hara Theja C. R., Syed Saheb S. M., Yavaraj C. (2015) Review on diverse materials applied for additive manufacturing. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, **3**, July, 16–20.
6. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. (2015) Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **81**, 465–481.
7. Шаповалов В. А., Григоренко Г. М. (2015) Управление структурой металла в процессе кристаллизации. *Современная электрометаллургия*, **2**, 51–54.
8. Шаповалов В. А., Григоренко Г. М. (2015) Подавление ликвационных процессов в крупных слитках. *Современная электрометаллургия*, **1**, 26–30.

9. <https://www.comsol.com/>.
10. Костин В. А., Жуков В. В. (2016) Моделирование процессов получения металлических изделий методами аддитивных технологий. *Сб. трудов 8-й Межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 19–23 сентября 2016 г., Одесса, Украина*.
11. <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ConvectionHeatTransfer1/Overa.IIHeatTransferCoefficients/>
12. Махненко О. В., Миленин А. С., Великоиваненко Е. А. и др. (2017) Моделирование температурных полей и напряженно-деформированного состояния малого трехмерного образца при его послойном формировании. *Автоматическая сварка*, **3**, 11–19.

References

1. Zhukov V. V., Grigorenko G. M., Shapovalov V. A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding Journal*, **5–6**, 137–142. [in Russian].
2. Akhonin S. V., Vrzhezhevsky E. L., Belous V. Yu., Petrichenko I. K. (2016) Electron beam 3D-deposition of titanium parts. *The Paton Welding Journal*, **5–6**, 130–133. [in Russian].
3. Korzhik V. N., Khaskin V. Yu., Grinyuk A. A. et al. (2016) 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review). *The Paton Welding Journal*, **5–6**, 117–129. [in Russian].
4. Kaufui V. Wong, Aldo Hernandez (2012) A review of additive manufacturing / International Scholarly Research Network. *Mechanical Engineering*, **2012**, 10 p. doi 10.5402/2012/208760.
5. Rizwan P. M. Ali, Hara Theja C. R., Syed Saheb S. M., Yavaraj C. (2015) Review on diverse materials applied for additive manufacturing. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, **3**, July, 16–20.
6. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. (2015) Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **81**, 465–481.
7. Shapovalov V. A., Grigorenko G. M. (2015) Metal structure control during solidification. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, **2**, 51–54. [in Russian].
8. Shapovalov V. A., Grigorenko G. M. (2015) Suppression of liquation processes in large ingots. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, **1**, 26–30. [in Russian].
9. <https://www.comsol.com/>.
10. Kostin V. A., Zhukov V. V. (2016) Modelling the processes of metallic parts production using additive technology methods. *Proceedings of Eighth Inter. Conf. «Mathematical Modeling And Information Technologies in Welding and Related Processes», 19–23 September 2016, Odessa, Ukraine*. [in Russian].
11. <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ConvectionHeatTransfer1/Overa.IIHeatTransferCoefficients/>
12. Makhnenko O. V., Milenin A. S., Velikoivanenko E. A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding Journal*, **3**, 7–14. [in Russian].

**МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО АДИТИВНОГО ПРОЦЕСУ
СТВОРЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ СТАЛІ 09Г2С**

Г. М. Григоренко, В. А. Костін, В. В. Жуков

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

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлені результати моделювання термічних полів, напруг, деформацій і переміщень при формуванні адитивної конструкції із сталі 09Г2С на підложці. Для проведення комп'ютерного моделювання використовували розрахунковий пакет міждисциплінарних досліджень COMSOL Multiphysics. У роботі враховувався вплив температури на фізико-хімічні параметри сталі. Результати для моделювання були отримані з використанням комплексу імітації термодформацийного стану термічного циклу зварювання металу під дією розтягування Gleeble 3800 (коефіцієнт лінійного розширення) і приладу високотемпературного термічного аналізу ВДТА-8М (теплоємність, теплопровідність). Виконані дослідження показали, що при адитивному нанесенні шарів сталі 09Г2С на підложку найбільший рівень залишкових напружень і деформацій досягається на границі першого шару і підложки і складають 280...320 МПа. Напруження між шарами наплавленого металу істотно нижче (до 50 МПа). Встановлено, що зі збільшенням кількості шарів які наносяться, рівень напружень на границі адитивний шар/підложка зростає нелінійно і з часом перестає залежати від кількості шарів, що наносяться. При адитивному процесі для запобігання помітної деформації підложки слід використовувати попередній підігрів до температур не нижче 300...320 °С. Розроблене програмне забезпечення може бути використане для математичного моделювання адитивного процесу формування конструкцій із сталей, титанових і алюмінієвих сплавів. Бібліогр. 13, табл. 1, іл. 7.

Ключові слова: адитивне виробництво; моделювання; сталь; наплавлення; напруження; мікроструктура

**MODELING OF METALLURGICAL ADDITIVE PROCESS OF MANUFACTURE
OF 09G2S STEEL STRUCTURES**

G.M. Grigorenko, V.A. Kostin, V.V. Zhukov

E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.

11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Presented are the results of modeling the thermal fields, stresses, deformations and displacements in formation of additive structures of steel 09G2S on substrate. To carry out the computer modeling, a calculation package of interdisciplinary investigations COMSOL Multiphysics was used. In the work the effect of temperature on steel physical-chemical parameters was taken into account. Results for modeling were obtained by using a complex Gleeble 3800 of simulation of thermodeformational state of a thermal cycle of metal welding under the action of tension (coefficient of linear expansion) and unit VDTA-8M of high-temperature thermal analysis (heat capacity, heat conductivity). The carried out investigations showed that at the additive deposition of steel 09G2S layers on substrate the highest level of residual stresses and deformations is reached at the interface of the first layer and substrate and amounts to 280...320 MPa. The stresses between the deposited metal layers are significantly lower (to 50 MPa). It was found that with increase in the number of depositing layers the level of stresses at the additive layer/substrate interface is increased and does not depend with time on the deposited layer number. During the additive process it is necessary to apply the preheating up to temperatures of not lower than 300...320 °C to prevent a noticeable deformation of the substrate. The developed software can be used for the mathematical modeling of the additive process of formation of structures of steels, titanium and aluminium alloys. Ref. 13, Table 1, Figures 7.

Key words: additive production; modeling; steel; deposition; stress; microstructure

Поступила 14.03.2017

Международная конференция
«Титан 2018: производство, обработка, применение»
11–12 июня 2018 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Тематика конференции

- прогрессивные технологии и оборудование для получения титана и сплавов на его основе;
- деформационная обработка титана;
- новые сплавы на основе титана и его интерметаллидных соединений;
- особенности структуры и термической обработки титановых сплавов;
- аддитивные и порошковые технологии в производстве изделий из титановых сплавов;
- прогрессивные технологии сварки и пайки изделий и конструкций из титановых сплавов;
- применение изделий и конструкций из титановых сплавов в авиадвигателестроении и других отраслях промышленности.

Организационный комитет конференции ТИТАН 2018

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 200-82-77; E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.pwi-scientists.com/rus/titan_2018