

УДК 669.71.535.241

UDC 669.71.535.241

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences and Engineering

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ МАТЕРИАЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА**SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD DURING LASER MELTING OF MATERIAL WITH A SHAPE MEMORY BASED ON TiNi**

Бледнова Жесфина Михайловна
д.т.н., профессор, зав. Кафедрой
E-mail: blednova@mail.ru

РИНЦ SPIN-код: 2616-8410
SCOPUS Author ID 6602468603

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия,
ул. Московская. 2, кафедра ДиПМ*

Blednova Zhesfina Mikhailovna
Dr.Sci.Tech., professor, Head of Department
SPIN-code: 2616-8410

SCOPUS Author ID 6602468603

E-mail: blednova@mail.ru
*Kuban state technological university, Krasnodar,
Russia*

Степаненко Майя Александровна
к.т.н., старший научный сотрудник
*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия,
ул. Московская. 2, кафедра ДиПМ*

Stepanenko Maya Alexandrovna
Cand.Tech.Sci., senior researcher
*Kuban state technological university, Krasnodar,
Russia*

Разработана тепловая физико-математическая модель процесса лазерной наплавки TiNi на сталь, позволяющая осуществлять мониторинг формирования структуры и свойств поверхностного слоя. Описание модели включает этапы: предположения и упрощения; анализ энергетического баланса; численное моделирование тепловых процессов; оценку распределения поля температур; экспериментальную проверку полученных решений. Композиция сталь-сплав TiNi рассматривалась в виде двухслойного материала с различающимися теплофизическими характеристиками. Энергетический баланс системы описан уравнением теплопроводности в трехмерной постановке. Учитывались основные каналы затрат энергии излучения: на поглощение поверхностью изделия, потери вследствие отражения поверхностью, энергию, поглощаемую покрытием и не дошедшую до материала основы. Для решения дифференциального уравнения теплопроводности использовался метод интегральных преобразований Фурье. При оценке распределения температур рассматривалась одномерная задача при воздействии точечным источником с гауссовским распределением в импульсном режиме. С помощью расчета на ЭВМ с использованием пакета MathCAD построены графики изменения температуры на разной глубине слоя TiNi и стальной основы. Полученные результаты позволили выработать рекомендации по оптимизации технологических параметров лазерной наплавки TiNi. Выполненное моделирование тепловых процессов значительно сокращает затраты времени и ресурсов на разработку технологии, позволяет прогнозировать

A thermal physical and mathematical model of laser cladding with TiNi on steel was developed which allows us to monitor the formation of the structure and the properties of the surface layer. A description of the model included assumptions and simplifications; analysis of the energy balance; numerical modeling of thermal processes; evaluation of the temperature distribution; experimental verification of the obtained solutions. The composition of the steel and TiNi alloy was examined as a two-layer material with different thermal characteristics. The energy balance of the system was described with a heat equation in a three-dimensional form. The main channels of the radiation energy costs were taken into account: absorption surface of the product, loss owed to the reflection surface, energy absorbed by the coating which did not come down to the base material. To solve the differential equation of heat conduction we used the Fourier integral method. In assessing the temperature distribution we have reviewed a dimensional problem when exposed to a point source of the Gaussian distribution in a pulsed mode. Computer calculations used MathCAD graphs of temperature changes at different depths of the TiNi layer and the steel substrate. The results obtained allowed us to develop the recommendations for optimizing the technological parameters of laser cladding of TiNi. The simulation of thermal processes significantly reduces the time and resources required to develop the technology, allowing prediction of the quality of the surface layer during the development of the technology and promoting the adoption of efficient technical and technological solutions

качество поверхностного слоя на этапе разработки технологии и способствует принятию эффективных технических и технологических решений

Ключевые слова: ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА, ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА, ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Keywords: SHAPE MEMORY EFFECT, PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS, HEAT PROBLEM, LASER CLADDING, OPTIMAL PARAMETERS

Работа выполнена по проекту № 9.555.2014/К (государственное задание) при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

Введение. Приоритетными направлениями развития материалов и технологий является разработка интеллектуальных, адаптивных материалов и покрытий, в том числе материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), и высокоэффективных ресурсосберегающих технологий их получения. К числу наиболее широко используемых в технике и медицине материалов с ЭПФ относится никелид титана, интерметаллид на основе $TiNi$ эквиатомного состава, отличительной особенностью которого является способность подвергаться аномально высокой деформации с последующим полным или частичным ее восстановлением в процессе снятия внешней нагрузки, высокая демпфирующая способность, коррозионная стойкость, износостойкость. В связи с высокой стоимостью никелида титана целесообразно использовать его в качестве материала для поверхностного модифицирования (ПМ), обеспечивая уникальные свойства материала с ЭПФ в наиболее нагруженных поверхностных слоях.

Большая часть современных технологий ПМ осуществляется в условиях высокоэнергетических воздействий (лазерных, плазменных, электронно-лучевых, магнетронных) и сопровождается нагревом, охлаждением, давлением. Это обуславливает неравномерность распределения свойств и термодинамических параметров (плотности, теплоемкости, температуры, давления, химического потенциала, энтропии). В настоящее время уже разработан ряд технологий ПМ материалами с ЭПФ [1], среди которых одной из эффективных является

технология лазерной наплавки (ЛН) *TiNi* [2,3]. Основой этой технологии является тепловое воздействие лазерного излучения на слой *TiNi* в виде проволоки, порошка или обмазки.

ЛН, как перспективная технология, имеет ряд преимуществ: позволяет осуществлять послойное нанесение материала, что дает возможность создавать трехмерные объекты любой степени сложности и любой пространственной ориентации [4]; создавать детали с необходимым чередованием слоев или с формированием слоев в различных зонах детали и таким образом обеспечить изготовление детали с заданными свойствами [5]. Для описания процесса лазерной наплавки и обеспечения возможности прогнозирования свойств изделия необходима разработка физико-математических моделей, построение эффективных численных алгоритмов и их экспериментальной верификации [6].

Одной из особенностей теплофизических процессов при реализации ЛН является довольно значительные градиенты температуры по толщине наплавляемого слоя, что вызывает термические напряжения при кристаллизации. Поскольку функциональные свойства материала с ЭПФ определяются температурами фазовых превращений, то основной характеристикой процесса ЛН является температурное поле в материале [7]. Знание распределения температуры в материале позволяет выработать рациональные технологические режимы обработки, обеспечивающие проявление ЭПФ. Поэтому разработка физико-математических моделей, позволяющих осуществлять мониторинг формирования структуры и свойств поверхностных слоев *TiNi*, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка тепловой физико-математической модели процесса ЛН материала с ЭПФ *TiNi* на сталь с использованием импульсного лазерного излучения (установка «Квант»). Описание модели включает следующие этапы: предположения и упрощения, используемые при построении модели; анализ энергетического

баланса процесса ЛН; численное моделирование тепловых процессов ЛН; оценка распределения поля температур в поверхностном слое $TiNi$; экспериментальная оценка полученных решений.

Энергетические характеристики импульсной лазерной наплавки $TiNi$. Использование энергии лазерного излучения при формировании поверхностных слоев $TiNi$ требует решения ряда задач [1,2,7,8]. Согласно известным энергетическим условиям лазерной обработки с оплавлением энергия излучения E расходуется на поглощение поверхностью E_{abs} , на потери вследствие отражения поверхностью E_{dis} , на энергию, поглощаемую покрытием E_{co} и не дошедшую до материала основы [2,9].

$$\bar{E} = \bar{E}_{abs} + \bar{E}_{dis} + \bar{E}_{co} \quad (1)$$

Изучение тепловых процессов внутри этой системы необходимо для прогнозирования структурно-фазового состояния покрытия и микроструктурных изменений в материале основы вследствие воздействия лазерного излучения при наплавке. Энергетический баланс системы в трехмерной постановке может быть описан уравнением (2) (рис. 1):

$$\rho \cdot c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[\lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[\lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + E_{abs} - E_{dis} \quad (2)$$

где λ – теплопроводность составляющих материалов, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; x, y, z –

пространственные координаты.

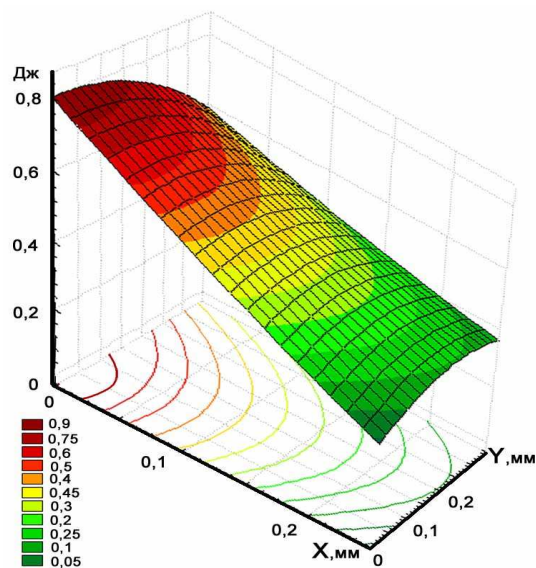


Рис. 1. Пространственный характер распределения энергии по площади пятна нагрева $0,3 \text{ мм}^2$ на поверхности слоя *TiNi*

На рис. 1 приведены построенные с помощью программы *Statistica* 6,0 кривые равного уровня, описывающие пространственный профиль энергетического воздействия лазерного излучения при постоянном диаметре пятна фокусировки. Неравномерное распределение энергии обуславливает гетерогенное строение формируемого слоя. Наряду с энергетическими характеристиками процесса, определяющими организацию структуры поверхностных слоев, существенное влияние на структуру и свойства оказывают теплофизические характеристики нагрева материала по глубине в зоне воздействия лазерного луча.

Численное моделирование тепловых процессов при лазерной наплавке *TiNi* на сталь. Краевые задачи, описывающие нагрев материалов концентрированными потоками энергии (КПЭ), являются во многих случаях задачами теплопроводности с граничными условиями второго рода [2], решение которых позволяет получить информацию о распределении температуры, глубине и скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя. К настоящему времени выполнено большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных вопросам математического моделирования тепловых процессов при

лазерной обработке различных материалов [6-8,10,11]. Однако, как показал анализ источников информации, в настоящее время сведения о решении подобного рода задач для TiNi-покрытий ограничены [7].

Аналитически описать теплофизические процессы при импульсной лазерной наплавке можно соотношениями для линейного случая одномерной тепловой модели [2]. Очевидно, что одномерная модель вносит ряд ограничений, но с ее помощью можно получить необходимую оценку процессов и явлений в простой удобной форме. Композиция сталь-сплав *TiNi* может быть представлена в виде двухслойного материала с различающимися теплофизическими характеристиками (рис. 2).

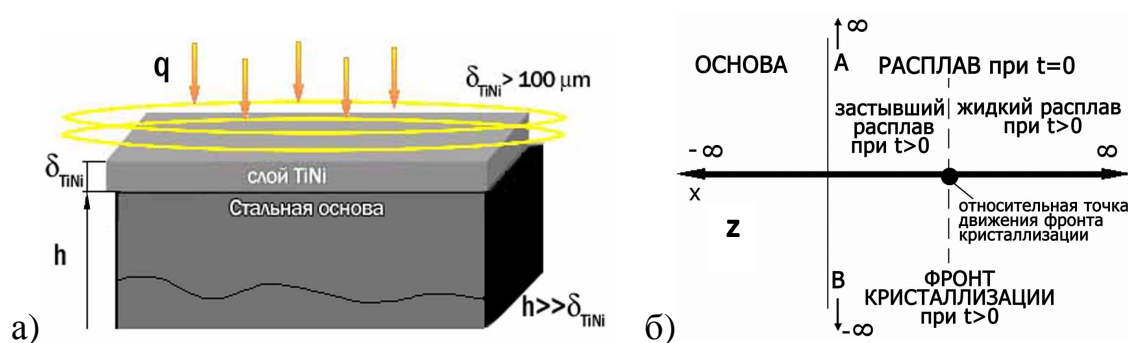


Рис. 2. Модель двухслойной полубесконечной среды при ЛН *TiNi* – а); геометрия зоны плавления – б) (повернута на 90° по часовой стрелке).

Для упрощения решения задачи приняты следующие допущения: постоянный во времени импульс; плотность потока по поверхности имеет Гауссово (нормальное) распределение; процесс кристаллизации имеет место при постоянной скорости; покрытием поглощается 50% вкладываемой энергии; наплавка производится из обмазок; в качестве защитного газа используется аргон. Задавались условием идеального теплового контакта материалов (т.е. отсутствием термического сопротивления на границе слоев), теплофизические характеристики которых не зависят от времени. При решении такой задачи может быть использована модель полубесконечной среды (рис.2,а). Геометрическое

представление рассматриваемой модели в виде планарного расположения зоны плавления и кристаллизации расплава показано на рис.2, б

При квазистационарном режиме генерации импульсного лазера решение задачи определения поля температур в одномерной постановке для композиции «сталь – TiNi» описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности общего вида [2]:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{a_1}\right) \cdot \left(\frac{\partial T_1}{\partial \tau}\right) = \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}, \text{ при } \tau > 0, h \geq z \geq 0; \\ \left(\frac{1}{a_2}\right) \cdot \left(\frac{\partial T_2}{\partial \tau}\right) = \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, \text{ при } \tau > 0, \infty > z \geq h. \end{cases} \quad (3)$$

где z – координата от поверхности облучения в центре пятна нагрева;

a_1, a_2 – коэффициенты температуропроводности, м/с², материалов.

В общем случае коэффициент температуропроводности определяется:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (4)$$

$$\text{Краевые условия: } z = 0 \quad - \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} = q_0. \quad (5)$$

Для нахождения распределения температуры по глубине зоны термического влияния (ЗТВ) использовался метод интегральных преобразований Фурье (ИПФ). Решение задачи при идеальном тепловом контакте между слоями было ранее получено Г.Я. Дульневым с помощью преобразования Лапласа по τ [Ошибка! Залка не определена.].

$$T_1(z, \tau) = \left(2Aq_0 \cdot \frac{\sqrt{a_1 \tau}}{\lambda_1} \right) \cdot \left\{ ierfc \left[\frac{z}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} (-g)^n \left[ierfc \left(\frac{2nh+z}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right) + ierfc \left(\frac{2nh-z}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right) \right] \right\}; \quad (6)$$

$$T_2(z, \tau) = \left(2Aq_0 \cdot \frac{\sqrt{a_2 \tau}}{\lambda_2} \right) \cdot (1-g) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-g)^n \left[\frac{ierfc \left((2n+1)h + (z-h) \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \right)}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right], \quad (7)$$

где A – коэффициент поглощения ($A=0,5$);

q_0 – плотность подводимого потока энергии, Вт/м²;

$$\text{коэффициент } g = \frac{\frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} - \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}}}{\frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}}}; \quad (8)$$

функция $ierfc(x)$ - интеграл от функции интеграла вероятности:

$$ierfc(x) = \int_x^{\infty} erfc(x) dx = \left(\frac{1}{\frac{1}{\pi^2}} \right) \cdot e^{-x^2} - x \cdot erfc(x). \quad (9)$$

Для рассматриваемой модели основополагающие уравнения теплопередачи согласно представлениям о геометрии зоны плавления (рис.2, б) следующие:

1) зона 1 (жидкий расплав):

$$\frac{1}{a_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}, \text{ при } \tau > 0, h(\tau) \leq z \leq \infty; \quad (10)$$

2) зона 1-2 (твёрдый раствор):

$$\frac{1}{a_{12}} \cdot \frac{\partial T_{12}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_{12}}{\partial z^2}, \text{ при } \tau > 0, 0 \leq z \leq h(\tau); \quad (11)$$

3) зона 2 (основа)

$$\frac{1}{a_2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, \text{ при } \tau > 0, -\infty \leq z \leq 0, \quad (12)$$

где T_1, T_{12}, T_2 – температуры, и a_1, a_{12}, a_2 – теплопроводности зон 1, 1-2, 2; $h(\tau)$ - положение фронта кристаллизации поверхности раздела «твердый раствор – жидкий расплав».

Если ввести обозначения теплопроводностей зон I, I-II, II $\lambda_1, \lambda_{12}, \lambda_2$, и температур – окружающей среды T_0 , точки охлаждения расплавленного слоя $T_{но}$, и начальной температуры ванны расплава $T_{сп}$, дополнительные условия для теплопередачи записываются:

$$T_2(-\infty, \tau) = T_0, T_2(z, 0) = T_0, \frac{\partial T_2}{\partial z} = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_2} \cdot \frac{\partial T_{12}}{\partial z}, \text{ при } z = 0; \quad (13)$$

$$T_2(0, \tau) = T_{12}(0, \tau), T_{12}(0, \tau) = T_1(z, \tau) = T_{но}, \text{ при } z = h(\tau),$$

$$\lambda_{12} \cdot \frac{\partial T_{12}}{\partial z} - \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} = \rho \cdot L \cdot \frac{dh}{d\tau}, \text{ при } z = h(\tau); \quad (14)$$

$$T_1(\infty, \tau) = T_{сп} \text{ при } h(0) = 0, T_1(z, 0) = T_{сп} \text{ при } h(0) = 0, \quad (15)$$

где ρ - плотность сплава, L – скрытая теплота кристаллизации.

В случае формирования покрытия из обмазки трудность представляет нахождение величины теплопроводности λ_{12} , так как при расплавлении порошок консолидируется, что сопровождается изменением теплопроводности и плотности. В расчете примем, что теплопроводность после расплавления обмазки равна теоретической для объемного сплава $TiNi$, λ_{1C} . Теплопроводность несвязанного порошка, $\lambda_{1П}$, рассчитывается из условия представления в виде слоя обмазки твердых частиц:

$$\lambda_{12} = \lambda_{1П} = V_{1П} \cdot N_k \cdot 2 \ln(\lambda_{1C}), \quad (16)$$

где N_k – координационное число частиц порошка ПН55Т45;

$V_{1П}$ – объемная фракция частиц.

Таким образом, с учетом (10-16) получаем скорректированное решение тепловой задачи. При её решении на стадии охлаждения в условии задают нулевой поверхностный лазерный источник, а начальное условие тождественно равно распределению температуры в момент окончания лазерного импульса. Тогда решение на стадии охлаждения будет иметь симметричный с нагревом вид.

Задание теплофизических характеристик материалов. Физическая модель процесса импульсного лазерного излучения, определяется рядом параметров: радиусом или диаметром пятна нагрева - r или d , м; длительностью импульса лазерного воздействия - τ_l , с и энергией в импульсе - E , Дж. Производилось расплавление предварительно нанесенной обмазочной пасты порошка *никелида титана* ПН55Т45 толщиной $\delta=0,21$ мм на сталь 30ХГСА. Размер частиц порошка составлял 50-150 мкм,. Температура плавления порошка ПН55Т45 $T_{пл}=1583$ К. В интервале температур нагрева, когда материал достигнет температуры плавления, плотность определяется интерполяцией и составляет $\rho_1=6,45 \cdot 10^3$ кг/м³. В интервале температур A_{c1}, A_{c3}, M_n согласно справочным данным [13] плотность стали $\rho_2=7,66 \cdot 10^3$ кг/м³ и определяется интерполяцией значений плотности для 20, 300, 600°C. Теплоемкость ($c_1=838$ Дж/кг·К; $c_2=913$ Дж/кг·К) и теплопроводность после расплавления порошковой обмазки рассчитывалась через теоретическую теплопроводность объемного сплава *TiNi* λ_{1C} , $\lambda_{1C}=18$ Вт/м·К; $\lambda_2=29,33$ Вт/м·К. Температуропроводность, определяемая по формуле (4) составляет: $a_1=3,33 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a_2=4,19 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $h_1=0,00021$ м; $b_2=0,01$ м; $l_2=0,055$ м. Высота, ширина, длина образца $h_2=0,01$ м; $b_2=0,01$ м; $l_2=0,055$ м. Максимальная глубина зоны обработки $0,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Задание параметров процесса лазерной обработки. Для реализации технологии лазерной наплавки использовали установку импульсного

действия Квант 12М (рис. 3). Технологические параметры лазерной наплавки приведены в табл. 1.

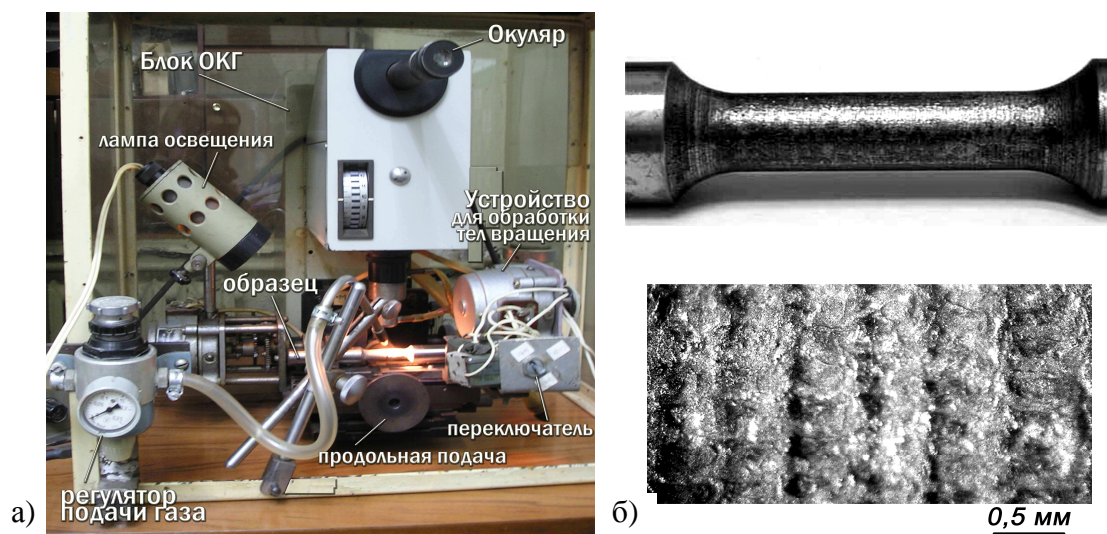


Рис. 3. Лазерная установка импульсного действия Квант 12М – а); поверхность образца после лазерной наплавки

В процессе моделирования приняты следующие параметры лазерной наплавки. Радиус пятна лазерного излучения $r = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м, мощность $P = 10$ Вт. Плотность мощности лазерного воздействия:

$$q = \frac{P}{\pi \cdot r^2} = \frac{10}{3,14 \cdot (0,25 \cdot 10^{-3})^2} = 81 \cdot 10^6 \frac{Вт}{м^2}.$$

Скорость сканирования лазерного пучка по поверхности определяется линейной скоростью перемещения детали $v = 2,09 \cdot 10^{-3}$ м/с. Длительность импульса: $\tau = \frac{2rP}{v} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с.

Теплофизические оценки выбора расчетной модели. Для подтверждения правомерности выбора расчетной модели необходимо произвести сопоставление. Поскольку $h_{\tau} \sim r$, то источник КПЭ является точечным. В этом случае при определении технологических режимов обработки КПЭ можно пренебречь отводом тепла по направлению X движения лазерного луча. Рассчитывается распространение тепла только

по направлению Z , т.е. вглубь материала. Расстояние, на которое распространяется тепловой фронт вглубь материала за время действия КПЭ:

$$h_{\tau} = 2\sqrt{a_1\tau} = 2\sqrt{(3,33 \cdot 10^{-6}) \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,185 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Расчет показывает, что тепловая задача может рассматриваться как одномерная, так как размеры образца много больше ЗТВ, следовательно, достаточно вычислить распределение температуры по глубине. Толщина обрабатываемого слоя меньше расстояния, на которое распространяется тепловой фронт за время действия КПЭ. Таким образом, реализуется теплофизическая модель *тонкой пластины*, т.е. прогрев происходит на весь ее минимальный размер. Для стальной основы реализуется модель *полубесконечного тела*. Скорость распространения теплового фронта в материале поверхностного слоя за время действия КПЭ:

$$v_t = \sqrt{\frac{a_1}{\tau}} = \sqrt{\frac{3,33 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-3}}} = 0,0365 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Распределение поля температур в слое $TiNi$. При оценке распределения температур в процессе лазерной наплавки рассматривалась одномерная задача при воздействии точечным источником с гауссовским распределением в импульсном режиме. Для решения дифференциального уравнения теплопроводности в процессе лазерной наплавки сплава $TiNi$ использовали метод ИПФ. Решали пошаговую задачу при числе разбиений $N=5$, $i=0 \dots n$, и $L=1$, $j=1 \dots L$:

$$z_i = \frac{\delta \cdot i}{N}, \quad t_j = \frac{\tau_i \cdot j}{L}. \quad (17)$$

Значение коэффициента g определяли по формуле (8). В любой момент времени $t \leq \tau_i$ одномерное распределение температур в слое $TiNi$ рассчитывалось по формулам (10) – (15).

Методом расчета на ЭВМ с помощью пакета *MathCAD* построены зависимости изменения температуры на разной глубине слоя $TiNi$ и

стальной основы (рис 3). Расчет на стадии охлаждения имеет симметричный с нагревом вид.

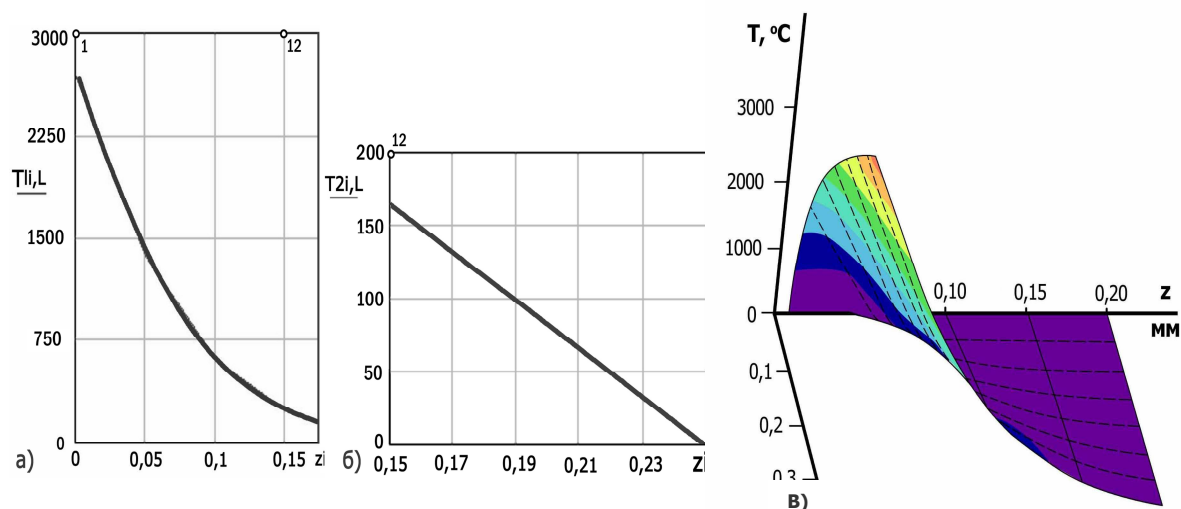


Рис. 3. Распределение температуры в поверхностном слое *TiNi* – (а) и в стальной основе – (б) на момент окончания лазерного импульса; поле температур – в)

Как показывает расчет, для наплавляемого никелида титана особенности движения фронта кристаллизации могут определить формирование структуры. Количественная оценка распределения температур в процессе лазерного воздействия является важным элементом управления микроструктурой поверхностных слоев *TiNi*. Температура зоны плавления, ее пространственная ориентация, форма и размеры зависят от параметров обработки. Для формирования структуры поверхностного слоя *TiNi*, определяющей эксплуатационные свойства изделия, необходима оптимизация технологических параметров импульсной лазерной наплавки, что выполнено экспериментально [14]. Кроме того, на основе полученного распределения температур в процессе лазерной наплавки и анализа энергетического баланса системы, можно приближенно оценить толщину наплавляемого слоя.

Модельная линейная толщина определяется из уравнения радиуса полуцилиндрического валика R_g наплавки сплава *TiNi*:

$$R_e = \left(\frac{2A \cdot P}{[(T_1 - T_0) \cdot c + Q_c] \cdot \pi \cdot v \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

где A – коэффициент поглощения энергии наплавленным $TiNi$ -покрытием; P – мощность лазерного луча, Вт; v – скорость обработки, м/с; c – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; Q_c – скрытая теплота сплава $TiNi$, Дж/кг.

Для получения заданной толщины наплавки R_e на единицу длины сплава $TiNi$ с концентрацией связующего X можно определить объем порошковой обмазки $V\delta_{об}$ по уравнению (19):

$$V\delta_{об} = \frac{2A \cdot P}{X \cdot ((T_1 - T_0) \cdot c + Q_c) \cdot v \cdot \rho}. \quad (19)$$

Полученные решения (18-19) являются теплофизическими выражениями для слоя $TiNi$, связанными с параметрами процесса лазерной обработки.

Экспериментальная верификация модели. При решении технологической задачи ЛН формализованными являются этапы планирования эксперимента, моделирования и регрессионного анализа. К основным параметрам лазерной наплавки, влияющим на формирование наплавленных слоев, относятся: мощность лазерного излучения и ее распределение в пятне фокусирования, размер пятна, количество и состав наносимого порошка, скорость наплавки. Меняя параметры наплавки, можно изменять геометрию и структуру наплавленного слоя, управлять его физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. При разработке технологического процесса лазерной наплавки *никелида титана* варьировали параметрами, представленными в табл. 1. [15] Результаты анализа совместного и отдельного влияния технологических параметров и микроструктура наплавленного слоя $TiNi$ представлены на рис. 4.

Таблица 1. Технологические параметры лазерной наплавки

Параметры	Величина
Плотность энергии в импульсе лазерного излучения q , МДж/м ²	2,5÷4,5
Плотность мощности, $\times 10^8$ Вт/м ²	6,25÷30
при изменении энергии излучения E , Дж	1÷3
Частота следования импульсов, Гц	10÷15
Длительность импульса, мс	1,5 2,0 2,5 4,0
Степень дефокусировки луча, определяемая диаметром пятна d , мм	0,3÷1,0
Скорость перемещения детали	
- линейная v , мм/мин	15÷17
- угловая ω , об/мин	4÷5,5
Количество и состав слоев обмазки N	1÷4
Толщина насыщающей обмазки δ , мм	0,04÷0,3

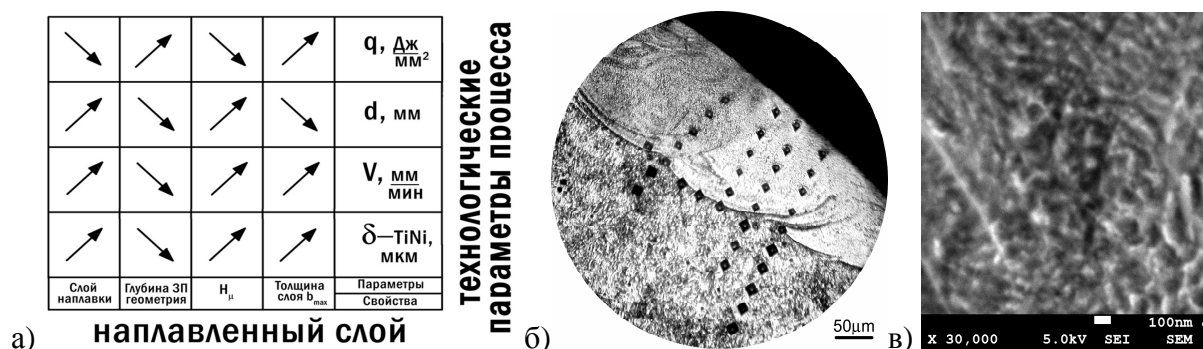


Рис. 4. Влияние технологических параметров (увеличение значений) на геометрические характеристики и свойства слоя $TiNi$ – а); микроструктура наплавленного слоя на сталь 30ХГСА при различном увеличении – б), в)

На основе статистической обработки результатов экспериментов по отработке технологии импульсной лазерной наплавки $TiNi$ на сталь установлена связь толщины наплавленного слоя и параметров технологического процесса в кодированном и явном виде:

$$Y = \delta_{TiNi} = \beta_0 \cdot v^{\beta_1} \cdot d_n^{\beta_2} \cdot \delta^{\beta_3}, \tag{20}$$

$$\delta_{TiNi} = 562587 \cdot \frac{1}{(v^{1,6262}) \cdot (d^{1259615})} \cdot (\delta^{0,444}), \tag{21}$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – истинные значения коэффициентов, которые являются случайными нормально распределенными величинами, определенными с

помощью статистического анализа; δ – толщина наносимой обмазки, мм; v – скорость наплавки, мм/мин; d_n – диаметр пятна излучения, мм.

Графическая интерпретация статистической модели показана на рис.5.

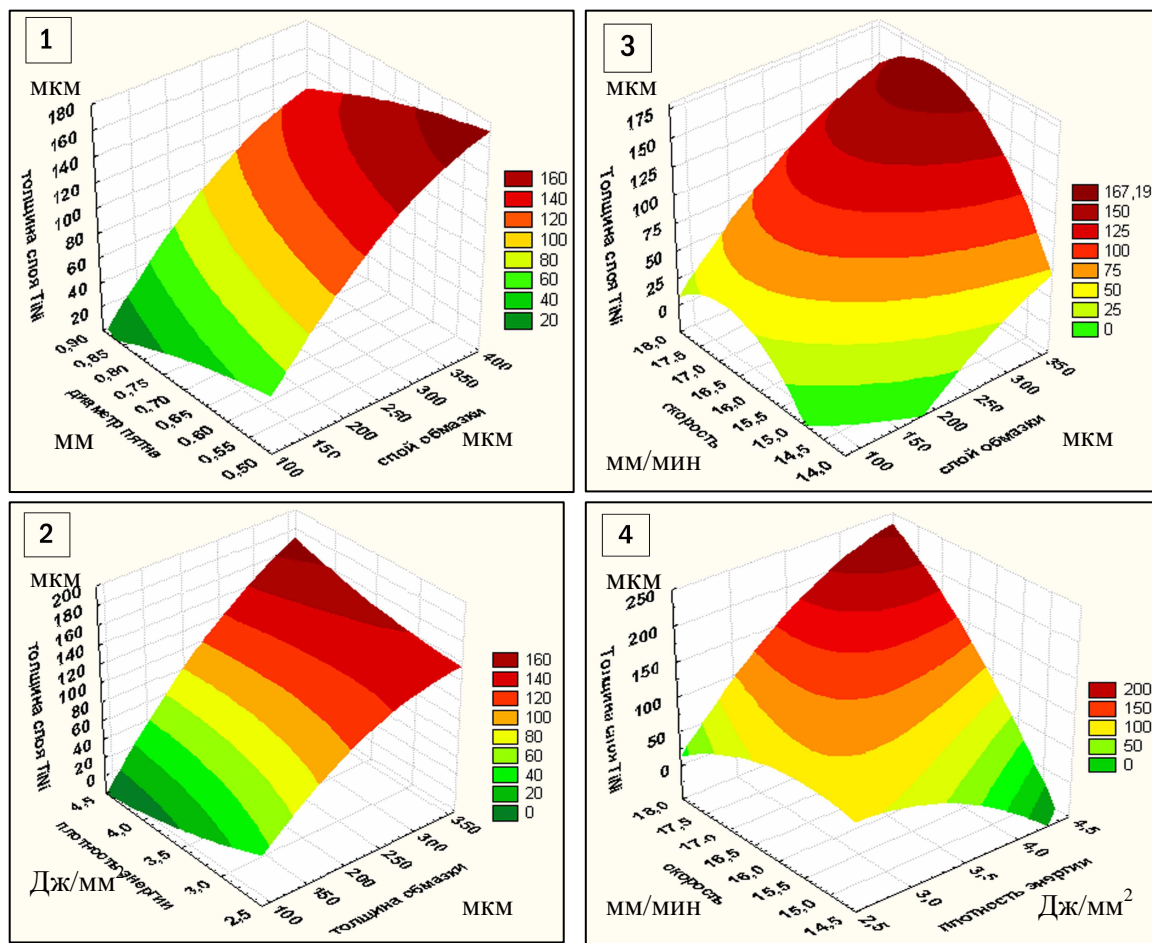


Рис. 5. Влияние параметров лазерной наплавки на толщину формируемого слоя *TiNi*

Анализ микроструктуры поверхностных слоев *TiNi*, полученных по отработанной технологии, показал отсутствие пор, дефектов структурных неоднородностей, (рис. 4,б). Наплавленный слой имеет характерную геометрию в форме равномерно чередующихся сегментов, обусловленных импульсным лазерным воздействием, и узкой зоны термического влияния.

Основная структурная составляющая покрытия сплава *TiNi*–аустенитная В2-фаза, наблюдается небольшое количество оксидов титана, фазы В19' (В2-фаза – ~94,5÷95%, В19' – ~4,5÷5,5%) [16]. При увеличении

количества наплавляемых слоев (более трех) формируется побочная интерметаллидная фаза $TiNi_3$. Исследования химического и фазового анализа наплавленных слоев свидетельствует о соответствии материала с эффектом памяти формы.

Заключение

Разработана тепловая модель импульсной лазерной наплавки функционального материала с эффектом памяти формы на основе $TiNi$, позволяющая осуществлять мониторинг температур и, как следствие, определяющая структуру и свойства поверхностного слоя.

Выполненное моделирование значительно сокращает затраты времени и ресурсов на разработку технологии, позволяет прогнозировать качество поверхностного слоя еще на этапе разработки технологии и, в конечном итоге, способствует принятию эффективных технических и технологических решений.

Экспериментально показано, что импульсное лазерное воздействие позволяет эффективно модифицировать поверхность изделий. Полученные статистические модели технологических параметров процесса импульсной лазерной наплавки $TiNi$, позволяют оптимизировать структуру и функционально-механические свойства поверхностного слоя.

Список использованных источников

1. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Чаевский М.И., Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы. Краснодар: Издательский дом-Юг. 2009. 354 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 663 с.
3. Gladush G. G., Smurov I. Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment Berlin, Springer-Verlag, 2011, 534 p.
4. Шишковский, И. В., Щербаков В.И. Послойное лазерное спекание функционально-градиентных структур и объемных изделий чередованием титана и нитинола // Материаловедение. - 2012. - № 2. - С. 7-14.
5. Васильцов В.В. Послойная лазерная наплавка металлических порошков: аналитическая теория и эксперимент. В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин, И.Н. Ильичев,

А.И. Мисюров, В.Я. Панченко // Инженерный журнал: наука и инновации. М.: Изво: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. № 6. С. 69-77.

6. Mirzade F.Kh., Khomenko M.D., Niziev V.G., Grishaev R.V., Panchenko V.Ya. "Three dimensional model of melting and crystallization kinetics during laser cladding process"// SPIE Proceedings of 19th International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications (2012) 8677-15.

7. Шишковский И.В. Моделирование термомеханических и электротермических гистерезисных явлений в пористом никелиде титана // Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 2. С. 145-151.

8. Максименко А.В., Мышковец В.Н., Шаповалов П.С. Импульсная лазерная наплавка конструкционных сталей кольцевыми пучками // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2010. № 4. С.63-68.

9. Бровер А.В., Пустовойт В.Н., Бровер Г.И. Структурная организация и свойства композиции покрытие – металлическая основа при импульсном лазерном воздействии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 3. С. 15-18.

10. Анякин Н.И. Повышение производительности и качества лазерной обработки материалов / Н.И. Анякин, В.С. Коваленко, А.С. Козырев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2001. - №12. - с.39-46.

11. Oberfell K. Simulation of phase transformations and temperature profiles by temperature controlled laser hardening: influence of properties of base material / K. Oberfell, V. Schulze, O.Vohringer // Surface Engineering. – 2003. - Vol.19, №5. - p. 359-363.

12. Углов А.А. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А. Углов, И.Ю. Смуров, А.М. Лашин, А.Г. Гуськов. М.: Наука, 1991. 288 с.

13. Таблицы физических величин // Справочник: Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. - 1008 с.

14. Бледнова Ж.М., Степаненко М.А. Структура и свойства TiNi-покрытий с ЭПФ, полученных лазерной наплавкой // Известия вузов. Сев.- Кавказ. регион. Технические науки. 2005. №12. С. 21-27.

15. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Степаненко М.А. Особенности структуры и свойств поверхностных слоев из сплава с эффектами памяти формы, используемых в термомеханических соединениях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т.72. №5. С. 42-49.

16. Бледнова Ж.М., Степаненко М.А. Эволюция структурообразования при поверхностном модифицировании стали материалом с эффектом памяти формы на основе TiNi // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. №1 С. 60-67.

References

1. Blednova Zh.M., Mahutov N.A., Chaevskij M.I., Poverhnostnoe modifitsirovanie materialami s jeffektom pamjati formy. Krasnodar: Izdatel'skij dom-Jug. 2009. 354 s.

2. Grigor'janc A.G., Shiganov I.N., Misjurov A.I. Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki. M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2006. 663 s.

3. Gladush G. G., Smurov I. Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment Berlin, Springer-Verlag, 2011, 534 p.

4. Shishkovskij, I. V., Shherbakov V.I. Poslojnoe lazernoje spekanie funkcional'no-gradientnyh struktur i ob#emnyh izdelij cheredovaniem titana i nitinola // Materialovedenie. - 2012. - № 2. - S. 7-14.

5. Vasil'cov V.V. Poslojnaja lazernaja naplavka metallicheskih poroshkov: analiticheskaja teorija i jeksperiment . V.V. Vasil'cov, M.G. Galushkin, I.N. Il'ichev, A.I.

Misjurov, V.Ja. Panchenko // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. M.: Iz-vo: MGTU im. N.Je. Baumana, 2012. № 6. S. 69-77.

6. Mirzade F.Kh., Khomenko M.D., Niziev V.G., Grishaev R.V., Panchenko V.Ya. "Three dimensional model of melting and crystallization kinetics during laser cladding process" // SPIE Proceedings of 19th International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications (2012) 8677-15.

7. Shishkovskij I.V. Modelirovanie termomechanicheskikh i jelektrotermicheskikh gisterezijsnyh javlenij v poristom nikelide titana // Zhurnal tehničeskoj fiziki, 2014, tom 84, vyp. 2. S. 145-151.

8. Maksimenko A.V., Myshkovec V.N., Shapovalov P.S. Impul'snaja lazernaja naplavka konstrukcionnyh stalej kol'cevymi puchkami // Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. P.O. Suhogo. 2010. № 4. S.63-68.

9. Brover A.V., Pustovojt V.N., Brover G.I. Strukturnaja organizacija i svojstva kompozicii pokrytie – metallicheskaja osnova pri impul'snom lazernom vozdejstvii // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2012. № 3. S. 15-18.

10. Anjakin N.I. Povyshenie proizvoditel'nosti i kachestva lazernoj obrabotki materialov / N.I. Anjakin, V.S. Kovalenko, A.S. Kozyrev [i dr.] // Avtomaticheskaja svarka. – 2001. - №12. - s.39-46.

11. Oberfell K. Simulation of phase transformations and temperature profiles by temperature controlled laser hardening: influence of properties of base material / K. Oberfell, V. Schulze, O.Vohringer // Surface Engineering. – 2003. - Vol.19, №5. - r. 359-363.

12. Uglov A.A. Modelirovanie teplofizicheskikh processov impul'snogo lazernogo vozdejstvija na metally / A. Uglov, I.Ju. Smurov, A.M. Lashin, A.G. Gus'kov. M.: Nauka, 1991. 288 s.

13. Tablicy fizicheskikh velichin // Spravochnik: Pod red. I.K. Kikoina. – M.: Atomizdat, 1976. - 1008 s.

14. Blednova Zh.M., Stepanenko M.A. Struktura i svojstva TiNi-pokrytij s JePF, poluchennyh lazernoj naplavkoj // Izvestija vuzov. Sev.- Kavkaz. region. Tehničeskie nauki. 2005. №12. S. 21-27.

15. Blednova Zh.M., Mahutov N.A., Stepanenko M.A. Osobennosti struktury i svojstv poverhnostnyh sloev iz splava s jeffektami pamjati formy, ispol'zuemyh v termomechanicheskikh soedinenijah // Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2006. T.72. №5. S. 42-49.

16. Blednova Zh.M., Stepanenko M.A. Jevoljucija strukturoobrazovanija pri poverhnostnom modificirovanii stali materialom s jeffektom pamjati formy na osnove TiNi // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenija. 2013. T. 10. №1 S. 60-67.