

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ WC ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ИНЖЕКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ*

ЛЯН ВАН^{1,2}, ЮН ХУ^{1,2}, ШИУИНГ СОНГ^{1,2}, ДЗИНЬХУА ЯО^{1,2}

¹Исследовательский центр лазерных технологий и оборудования, Дзеджанский технологический ун-т.
310014, Хангжоу, ул. Чаованг, 18, Китай. E-mail: ddtwl@foxmail.com

²Центр по разработке и внедрению лазерного оборудования провинции Дзеджан.
310014, Хангжоу, ул. Чаованг, 18, Китай

Метод лазерной инжекционной наплавки (ЛИН) используется для получения слоя металлического композита на поверхности подложки. В процессе ЛИН лазерный луч локально расплавляет поверхностный слой подложки с одновременной инжекцией на него частиц дополнительного материала. Для контроля распределения упрочняющих частиц в слое, полученном ЛИН, можно применять комбинированное магнитное и электрическое поле (КМЭП). Влияние синергетического эффекта КМЭП на распределение упрочняющих частиц при ЛИН было исследовано с помощью экспериментальных и численных методов. В качестве упрочняющих частиц были использованы сферические частицы карбида вольфрама (WC), поскольку правильная форма была наиболее близка к условиям моделирования и хорошей работе индикатора в потоке расплава. Распределение частиц WC в продольном сечении было изучено с помощью сканирующей электронной микроскопии и рассчитано методом компьютерного моделирования с помощью 2D модели с учетом уравнений теплообмена, гидродинамики, силы сопротивления, силы Лоренца и фазового перехода. Результаты моделирования с достаточной точностью соответствуют экспериментальным данным. Исследованиями установлено наличие синергетического влияния КМЭП на распределение упрочняющих частиц при ЛИН. Распределение частиц WC в слое, полученном ЛИН, зависит от направления силы Лоренца, создаваемой КМЭП. Когда сила Лоренца и сила тяжести действуют в одном и том же направлении, подавляющее большинство частиц остаются в верхней области слоя, полученного ЛИН, а когда сила Лоренца и сила тяжести действуют в противоположном направлении, большинство частиц сосредоточены в нижней области. Библиогр. 34, рис. 8.

Ключевые слова: лазерная инжекционная наплавка, частицы WC, сила Лоренца, распределение частиц, комбинированное магнитное и электрическое поле

Металлокомпозиты (МК), армированные керамическими частицами, характеризуются рядом преимуществ по сравнению с монокристаллическими сплавами и широко используются в промышленности [1]. Метод лазерной инжекционной наплавки (ЛИН) используется для получения на поверхности подложки слоя МК, который отличается низкой скоростью растворения частиц, высоким качеством поверхности и низкой склонностью к образованию трещин [2–5]. ЛИН применяется, в основном, для улучшения твердости поверхности и износостойкости металлической подложки, например, нержавеющей сталей [4, 6], алюминиевых сплавов [7, 8], титановых сплавов [1, 2, 9–11], углеродистых сталей [12–16] и инструментальных сталей [3, 5, 17]. В отличие от лазерной наплавки, упрочняющие частицы (обычно керамика), которые вводятся в расплавленную ванну без какого-либо другого порошка металлической матрицы

и перемещаются с потоком расплава, сохраняют твердое состояние или состояние микрорасплава благодаря быстрому затвердеванию расплава во время процесса ЛИН [7].

Градиентные материалы могут быть разработаны на микроструктурном уровне, чтобы адаптировать конкретные материалы для обеспечения их функциональных характеристик в конкретных случаях применения [18, 19]. Контролируемые градиенты механических свойств позволяют находить интересные решения для дизайна поверхностей [9]. Для оптимизации коэффициента использования частиц, характеристик механической обрабатываемости и градиента распределения характеристик в ЛИН-слоях, необходимо контролировать распределение упрочняющих частиц. Ранее в процессе ЛИН, как правило, выбирали специально разработанное боковое сопло в качестве насадки для подачи порошка для предотвращения чрезмерного растворения упрочняющих частиц [16]. Таким образом, угол впрыска по отношению к нормали к поверхности [20], относительное положение пятна порошка и пятна лазера

* По материалам доклада, представленного на 7-й Международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 14–18 сентября, 2015 г., Одесса, Украина.

[21], скорость инъекции порошка [7, 22] являются ключевыми параметрами процесса во время введения порошка, которые существенно влияют на состояние распределения упрочняющих частиц. Следовательно, регулирование распределения упрочняющих частиц является сложным и трудоемким, потому что окно параметров обработки ЛИН с использованием системы подачи порошка с боковым соплом является очень узким [6, 7].

В этом исследовании было выбрано общее коаксиальное сопло, чтобы заменить специально разработанное боковое сопло для упрощения процесса регулирования системы подачи порошка. При этом как угол инъекции по отношению к нормали к поверхности, так и относительное положение пятна порошка и лазерного пятна являются фиксированными при коаксиальном процессе ЛИН. В процессе ЛИН с использованием коаксиального сопла для регулирования распределения частиц WC использовали внешнее силовое воздействие, которое оказывало комбинированное магнитное и электрическое поле (КМЭП) на ванну расплава. При лазерной сварке и лазерном легировании применение КМЭП является положительным фактором, который позволяет управлять распределением добавок (лигатур). Влияние электромагнитного перемешивания на распределение элементов при ЛИН было исследовано методами компьютерного моделирования и экспериментальным путем. Ранее было показано, что изменение распределения материала наполнителя является результатом модуляции потока расплава, возникающей в результате воздействия периодически изменяющихся электромагнитных объемных сил [23]. Частота является основным параметром для определения пространственного распределения элементов, в то время как плотность магнитного потока является параметром, определяющим общий масштаб воздействия магнитного поля [24, 25]. Была построена компьютерная модель для исследования ванны расплавленного лазером алюминия под воздействием статического магнитного поля. В зависимости от приложенной магнитной индукции [26] изменяется распределение растворенного вещества в твердом металле. Другие эффекты электромагнитного поля включают подавление поверхностной волнистости лазерного перепада, демпфирование скорости расплавленной ванны [27], уменьшение дефектов лазерной сварки [28, 29], предотвращение провисания расплава под действием силы тяжести при лазерной сварке с полным проплавлением [30] и др.

Предыдущие исследования воздействий электромагнитных полей были, в основном, посвящены влиянию распределения элементов, температуры, скорости и дефектов в ванне расплава

во время лазерной обработки, вызванных магнитным полем переменного тока или течением расплава в постоянном магнитном поле. В данной работе как внешнее стационарное электрическое поле, так и постоянное магнитное поле были синхронно приложены к расплаву во время процесса ЛИН. Сила Лоренца, создаваемая КМЭП, является своего рода направленной объемной силой в ванне расплава при ЛИН подобно силе тяжести. Эта сила Лоренца является дополнительной объемной силой, действующей на поток расплава. Следовательно, положение частиц WC, захваченных расплавленной ванной, будет меняться без изменения параметров процесса ЛИН.

В данном исследовании построена двухмерная компьютерная модель, учитывающая теплоперенос, гидродинамику, фазовый переход, силу сопротивления, действующую на частицы и электромагнитное поле. Эта модель использовалась для изучения механизма распределения упрочняющих частиц под воздействием электромагнитного поля. Численные расчеты выполнялись с использованием метода конечных элементов и пакета COMSOL Multiphysics, а градиент распределения частиц, микроструктура, твердость были исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭЦП) и прибора для измерения микротвердости.

Экспериментальные методы. Аустенитная нержавеющая сталь AISI 316L была использована в качестве подложки из-за ее парамагнетизма. Химический состав AISI 316L следующий, масс. %: 0,02 C; 0,55 Si; 1,55 Mn; 0,03 P; 0,03 S; 10 Ni; 16,5 Cr; 2,08 Mo; Fe — основа. В качестве упрочняющих частиц были выбраны сферические частицы монокристаллического WC (без W_2C). Частицы сферической формы хорошо прослеживаются в потоке расплава при численном моделировании. Размер частиц WC составил 75...150 мкм (рис. 1). Образцы подложки были изготовлены в виде длинных полосок с размерами 200×20×10 мм. На рис. 2 показана принципиальная схема процесса ЛИН с применением КМЭП. Электромагниты использовали для обеспечения стационарного магнитного поля (максимальная плотность магнитного потока 2,0 Тл), а свинцово-кислотные аккумуляторные батареи большой емкости (2V, 500 А·ч) — для обеспечения требуемой величины электрического тока (постоянное электрическое поле) для ванны расплава. В зоне ванны расплава плотность магнитного потока была приблизительно 0,4...2,0 Тл, а средняя плотность тока составляла около 5 А/мм².

ЛИН была проведена с использованием диодного лазера LASERLINE мощностью 2 кВт и

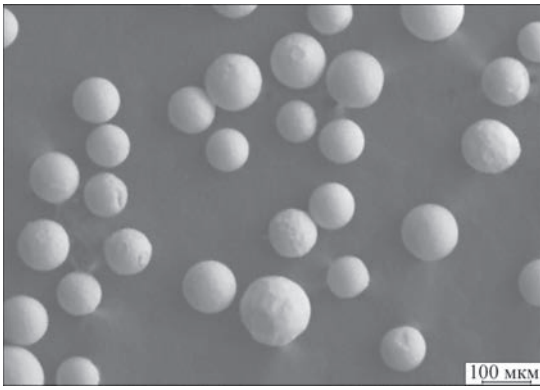


Рис. 1. СЭМ-изображение сферических монокристаллических частиц WC

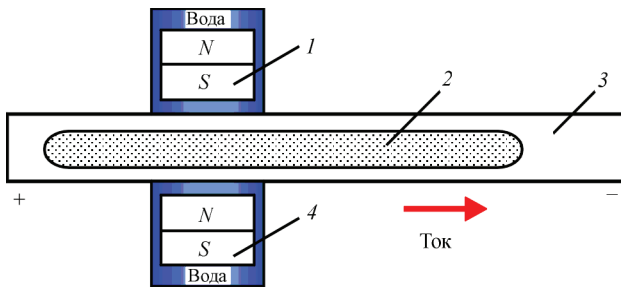


Рис. 2. Принципиальная схема процесса ЛИН с КМЭП (вид сверху): 1, 4 — магниты; 2 — слой ЛИН; 3 — подложка

устройства для подачи порошка. Аргон использовался в качестве защитного газа для уменьшения окисления образца и частиц WC. Диаметр лазерного луча, оптимизированная мощность лазера, скорость сканирования и подачи порошка в этом эксперименте были равны 4 мм, 1,6 кВт, 5 мм/с и 10 г/мин, соответственно. Распределение частиц WC и элементов в ванне расплава были изучены с помощью СЭМ (Carl Zeiss SIGMA HV-01-043) и EDS (Bruker Nano XFlash Detector 5010). Распределение градиента микротвердости определялось на приборе для испытания на микротвердость по Виккерсу (Shimadzu HMV-FA2).

Численное моделирование. Основные уравнения. Численное моделирование процесса ЛИН предполагает использование классического вычислительного подхода в гидродинамике, который касается поля и давления потока жидкости, а также температуры. Движение вводимых частиц рассчитывалось с использованием подхода Лагранжа с сопряжением жидкость-частица [18, 19]. Влияние силы Лоренца, индуцируемой КМЭП, было добавлено в уравнение импульса как объемная сила. Расчетная область первоначально состояла из прямоугольника 30×5 мм. Окружающая газовая фаза не была принята во внимание из-за больших различий в плотности и динамической вязкости между жидким металлом и газовой фазой. Основные допущения по потоку жидкости, температурному полю, инжектированию частиц и КМЭП при моделировании описываются следующим образом.

- Предполагается ламинарный режим течения. Основной причиной такого выбора является то, что скорости за пределами слоев сдвига у поверхностей значительно снижаются, а число Рейнольдса внутри расплавленной ванны оказывается гораздо меньше критического значения турбулентности (10^3) [30]. Кроме того, допущение ламинарного потока облегчает численное решение и уменьшает вычислительные затраты [31].

- Свойства материала зависят от температуры вплоть до температуры испарения.

- Джоулевым теплом, индуцированным высоким током, пренебрегают из-за короткого времени действия и сильного нагрева металла лазерным источником до температуры испарения.

- Подъемная сила ванны расплава определяется с использованием приближения Буссинеска, поскольку изменение плотности, вызванное разницей температур, достаточно мало.

- Теплопроводность должным образом корректируется, поскольку конвективное движение в поперечной плоскости (z -направление) не учитывается в 2D-моделях, что может привести к перераспределению тепла из-за течения жидкости [32].

- Распределение плотности магнитного потока в активной зоне является однородным.

- Направление инжекции частиц перпендикулярно подложке расплавленной ванны. Частицы имеют сферическую форму и равномерно распределены в потоке порошка.

- В процессе ЛИН инжектируемые частицы остаются в нерасплавленном состоянии, а форма инжектируемых частиц является правильной сферической. Таким образом, сила сопротивления (сила Стокса), действующая на частицы, связана только со скоростью течения расплава [7].

- Тепло и конвекция в расплаве не зависят от инжекции частиц.

- Эффектом силы тяжести и сопротивления, оказываемого окружающим газом движению частиц, можно пренебречь, а все частицы имеют одинаковую скорость.

Основные уравнения для сохранения массы, энергии, сохранения импульса (с учетом закона Дарси и силы Лоренца), решаются с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics методом конечных элементов.

Закон сохранения массы выражается как

$$\nabla(\rho u) = 0, \quad (1)$$

Закон сохранения импульса задается как

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla)u = \nabla[-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F_{Buoyancy} + F_{Darcy} + F_{Lorenz}, \quad (2)$$

где ρ — плотность; p — давление; η — вязкость, а $F_{Buoyancy}$, F_{Darcy} , F_{Lorenz} — подъемная сила, Дарси

и сила Лоренца соответственно. Подъемная сила возникает из градиентов плотности, что связано с расширением жидкого металла и обычно выражается с помощью приближения Буссинеска следующим образом:

$$F_{\text{Buoyancy}} = \rho(1 - \beta(T - T_m))g, \quad (3)$$

где β — коэффициент теплового расширения; g — ускорение свободного падения; T — температура; T_m — температура плавления.

Роль F_{Darcy} — снизить скорость на границе фазового перехода, поэтому после перехода она становится скоростью затвердевшей фазы. Этот параметр, как предполагается, изменяется в зависимости от жидкой фракции и может быть выражен в соответствии с уравнением Козени–Кармана [33], как

$$F_{\text{Darcy}} = -A_{\text{mush}} \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3 + c} u, \quad (4)$$

где f_L — объемная доля жидкой фазы; A_{mush} , c — произвольные константы (A_{mush} должна быть многозначной постоянной, учитывающей затухание скорости двухфазной области, c — небольшой постоянной, чтобы избежать деления на ноль в области твердого вещества).

Жидкая фракция f_L , как предполагается, линейно зависит от температуры в двухфазной зоне, которая ограничена температурами солидуса T_S и ликвидуса T_L . Она определяется как

$$f_L = \begin{cases} 0 & T < T_S, \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & T_S \leq T \leq T_L, \\ 1 & T > T_L. \end{cases} \quad (5)$$

F_{Lorenz} — сила Лоренца, вызванная внешним установившимся магнитным полем, установившимся электрическим полем и движением проводящей жидкости, которая описывается следующим уравнением:

$$F_{\text{Lorenz}} = jB = \sigma(E + uB)B = \sigma(EB + uB^2), \quad (6)$$

где j — плотность тока; B — напряженность магнитного потока; E — внешнее электрическое поле; σ — электропроводность.

Взаимодействие внешнего магнитного поля с внешним электрическим полем создает направленный вклад силы Лоренца $\sigma(EB)$. В то же время движение проводящего потока расплава во внешнем магнитном поле генерирует наведенный электрический ток. Этот индуцированный ток в том же внешнем магнитном поле образует ненаправленную силу Лоренца $\sigma(\mu BB)$, которая имеет компонент, направленный против первоначальной

скорости расплава, таким образом, замедляющий расплав.

Баланс тепла определяется как:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q_{\text{source}}, \quad (7)$$

где C_p — теплоемкость; k — теплопроводность; Q_{source} — источник тепла от лазерного луча.

Движение частиц в ванне расплава подчиняется второму закону Ньютона:

$$\frac{d(m_p v)}{dt} = F_D + F_g + F_{\text{Buoyancy}}, \quad (8)$$

$$F_D = m_p \left(\frac{1}{\tau_p} \right) (u - v), \quad (9)$$

$$F_g = m_p g, \quad (10)$$

$$F_{\text{Buoyancy}} = V_p \rho_f g, \quad (11)$$

где F_D — сила сопротивления; F_g — сила тяжести; F_{Buoyancy} — подъемная сила; m_p — масса частицы; u — скорость жидкости; v — скорость частицы; ρ_f — плотность жидкости; V_p — объем одной частицы. Относительное число Рейнольдса изменяется от 1 до 100, а коэффициент сопротивления C_D , основанный на режиме сопротивления Шиллера–Науманна, рассчитывается следующим образом:

$$\text{Re}_r = \frac{\rho_f |u - v| d_p}{\mu}, \quad (12)$$

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_r} (1 + 0,15 \text{Re}_r^{0,637}), \quad (13)$$

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D \text{Re}_r}, \quad (14)$$

где Re_r — относительное число Рейнольдса; d_p — диаметр частицы; μ — динамическая вязкость; ρ_p — плотность частиц.

Граничные условия. Первоначально температура подложки принимается такой же, как и температура окружающей среды T_0 . Распределение энергии лазерного луча считается однородным из-за природы диодного лазера. Поверхностное натяжение добавляется на верхней поверхности в качестве граничного условия, которое относится к температуре поверхности ванны расплава. В этой модели поверхностное натяжение выражается напряжениями сдвига Марангони с помощью тестовой функции вычислительной программы.

$$-\eta \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad -\eta \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (15)$$

где η — вязкость; $\partial \gamma / \partial m$ — температурная производная поверхностного натяжения.

Скорость введения частиц WC рассчитывается следующим образом [34]:

$$u = \frac{3D^2v_0^2 \cos\theta}{32\nu R}, \quad (16)$$

где D — гидравлический диаметр сопла; v_0 — скорость газа-носителя на выходе из сопла; ν — кинематическая вязкость; θ — угол расхождения частицы; R — расстояние между соплом и образцом. Скорость введения частиц считалась равной около 1,1 м/с, а центр пятна порошка совпадал с центром лазерного пятна.

Другие необходимые граничные условия показаны на рис. 3.

Физические свойства материала:

температура плавления 1700 К; плотность жидкости 7800 кг·м⁻³; плотность частиц 15600 кг·м⁻³; теплоемкость 746 Дж·кг⁻¹·К⁻¹; скрытая теплота плавления 30 Дж·кг⁻¹; теплопроводность 30 Вт·м⁻¹·К⁻¹; динамическая вязкость 0,006 Па·с; коэффициент поверхностного натяжения $-0,52 \cdot 10^{-4}$ Н·м⁻¹·К⁻¹; диаметр частиц 80 мкм. Параметры обработки: диаметр лазерного пятна 4 мм; скорость сканирования лазера 4 мм·с⁻¹; мощность лазера 1700 Вт; скорость подачи порошка 15 г·мин⁻¹; расход защитного газа 10 л·мин⁻¹.

Результаты и обсуждение. *Распределение температуры и скорости.* Распределение температуры по поверхности ванны расплавленного металла (направление $x, y = 0$ мм) показано на рис. 4, а. Распределение температуры по глубине ванны расплавленного металла в центре лазерного пятна (направление $y, x = 33,6$ мм) показано на рис. 4, б. Видно, что высокотемпературная зона расплавленной ванны, где действует сила Лоренца, подавляется. Независимо от того, направлена ли сила Лоренца вверх или вниз, распределение температуры при наличии КМЭП всегда ниже, чем при его отсутствии. В отличие от распределения тем-

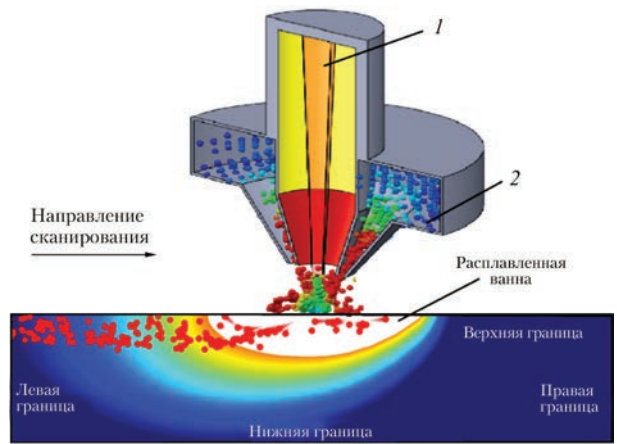


Рис. 3. Граничные условия численной модели: 1 — лазерный луч; 2 — частицы

пературы, распределение скорости жидкости в более значительной степени зависит от КМЭП, как показано на рис. 5. На рис. 5, а приведено распределение скорости по поверхности ванны расплавленного металла, а на рис. 5, б — распределение скорости по глубине ванны расплавленного металла. Максимальная скорость жидкости в ванне расплавленного металла около 0,08 мм/с при отсутствии КМЭП. При воздействии направленной силы Лоренца, индуцированной КМЭП, максимальная скорость жидкости в ванне расплавленного металла снижается до менее чем 0,02 мм/с, независимо от того, направлена ли сила Лоренца вверх или вниз. Двойные пики распределения скорости отражают разницу в максимальной скорости из-за эффекта накопления тепла и эффекта Марангони в процессе лазерного переплава. С каждой стороны от положения пиковой температуры температурные градиенты имеют противоположные знаки, что приводит к скорости потока жидкости, равной нулю в этой точке за счет эффекта Марангони. Тепловые градиенты становятся максимальными на краю лазерного луча, что объясняет наблюдаемые пики скорости [32].

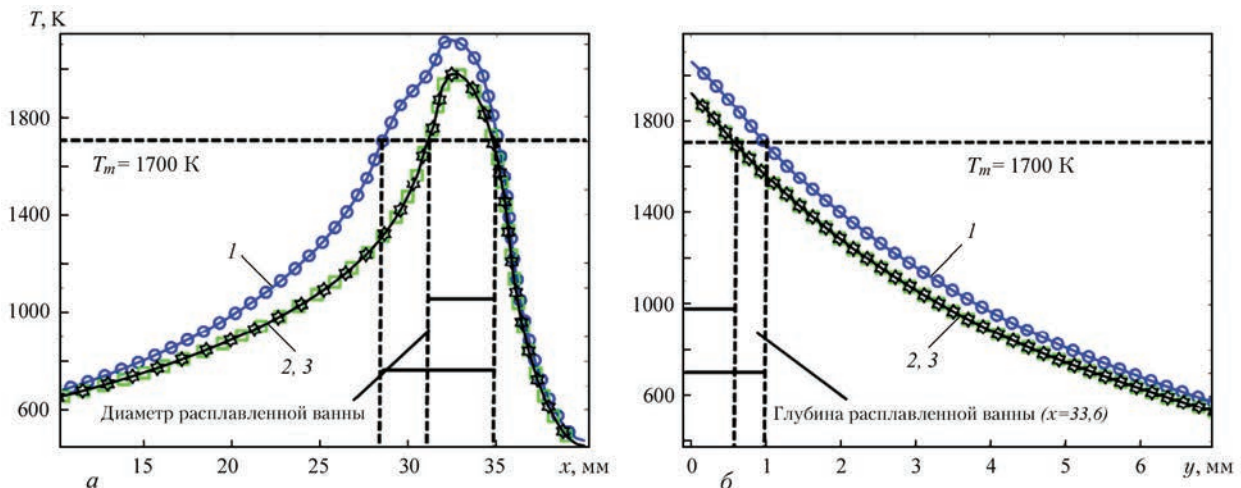


Рис. 4. Распределение температуры расплавленной ванны (время 6,5 с) по поверхности ванны расплавленного металла (а) и по глубине ванны расплавленного металла (б): 1 — $B = 0$; 2 — 0,6; 3 — 1,2 Тл

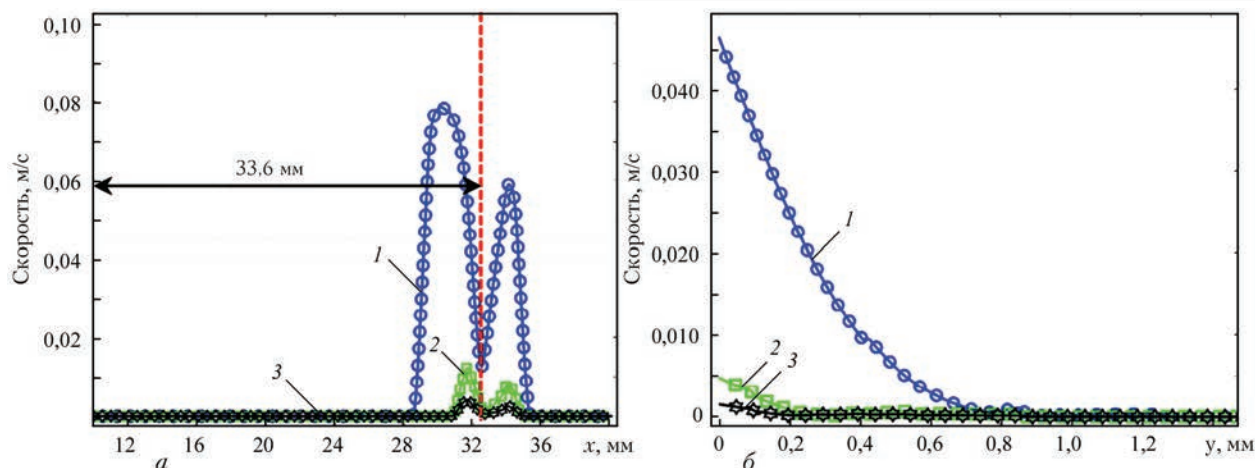


Рис. 5. Распределение скоростей в ванне расплава по поверхности ванны расплавленного металла (а) и по глубине ванны расплавленного металла (б) (обозначения те же, что и на рис. 4)

Распределение частиц. На рис. 6, а, б показаны продольные участки слоев ЛИН с распределением частиц, полученным при разных направлениях силы Лоренца, индуцированной КМЭП. Направление силы Лоренца на рис. 6, а — вверх, а на рис. 6, б — вниз. Рис. 6, в показывает продольное сечение ЛИН-слоя, полученного без внешней силы Лоренца. Благодаря тем же параметрам проводимого ЛИН процесса, толщина слоев ЛИН и доля инжектированных частиц в слое ЛИН почти одинаковая для этих трех образцов. Для того, чтобы исследовать количественное различие между частицами в трех распределениях на рис. 6, все слои ЛИН были разделены на две равные области (верхняя область и нижняя). Пропорции частиц WC в обеих областях были вычислены с помощью обработки с использованием компьютерной графики. Результаты вычислений показаны рядом с соответствующими слоями ЛИН на рис. 6, з.

При воздействии направленной вверх силы Лоренца большинство частиц сосредоточены в нижней области. Доля частиц в нижней области составляет более 50 % по сравнению с верхней областью. Лишь небольшое количество частиц

WC были захвачены приповерхностной частью ЛИН-слоя. Напротив, большинство частиц зафиксированы в верхней области, когда сила Лоренца направлена вниз, как показано на рис. 6, б. Частицы вряд ли могли опуститься в нижнюю часть ванны расплавленного металла. Сравнение распределений частиц при наличии и при отсутствии приложенного КМЭП показывает, что частицы равномерно распределены в слое ЛИН, полученном без приложения КМЭП (рис. 6, в). Сила Лоренца, генерируемая устойчивым магнитным и электрическим полем, является своего рода направленной объемной силой в ванне расплавленного металла. Направление силы Лоренца, действующей на жидкость, является противоположным относительно направления соответствующей силы, действующей на частицы (см. уравнение (2)).

$$L_f = (jB)V, \tag{17}$$

где L_f — сила Лоренца; j — плотность тока; B — плотность магнитного потока; V — объем жидкости, вытесненной одной частицей.

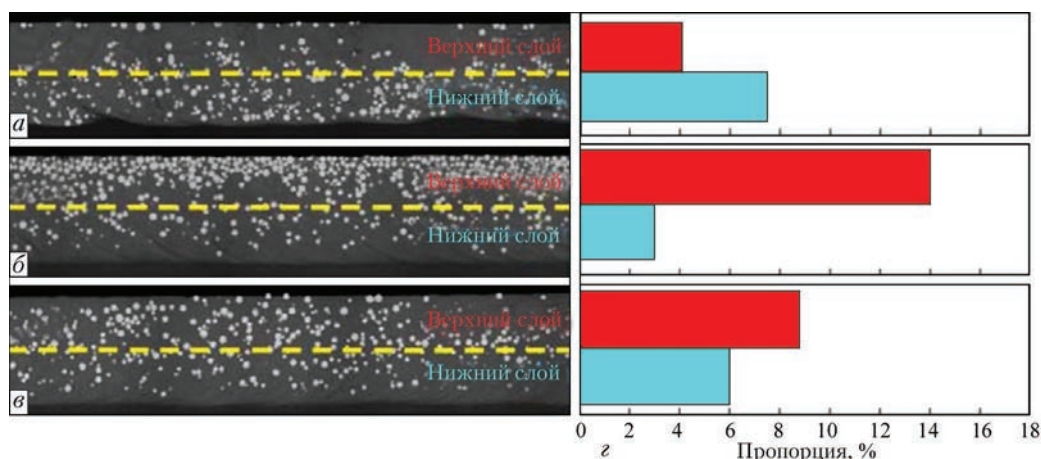


Рис. 6. Распределение частиц WC в продольных сечениях слоев ЛИН: а — сила Лоренца направлена вверх; б — вниз; в — без силы Лоренца

$$L_f = -L_p, \quad (18)$$

где L_p — противодействующая сила Лоренца, действующая на частицу. Поскольку частицы WC являются непроводящими и немагнитными, сила Лоренца не действует на частицу непосредственно.

На рис. 7 представлена диаграмма сил, действующих на одну частицу и окружающую жидкость. Когда сила Лоренца, действующая на жидкость, принимается направленной вверх, уравнение баланса определяется, чтобы выразить силу (в направлении y), действующую на частицу следующим образом:

$$-F_{iy} = F_B - L_p + F_{dy} - G_p, \quad (19)$$

где F_{iy} , F_B , L_p , F_{dy} и G_p — сила инерции, подъемная сила, сила Лоренца, сила сопротивления и тяжести, соответственно; F_B , F_{dy} и G_p предполагаются постоянными. Таким образом, F_{iy} и L_p положительно пропорциональны.

Следовательно, когда сила Лоренца, действующая на жидкость, направлена вверх, скорость погружения частицы увеличится. При непрерывном процессе введения порошка частицы легче опускаются в нижнюю часть ванны расплава. По аналогичному принципу частицы будут захвачены в верхней области, когда сила Лоренца, действующая на жидкость, направлена вниз.

Точные позиции захваченных частиц описываются имитационной моделью на рис. 8. Распределение частиц в продольных участках слоев ЛИН показаны на рис. 8, а, б. Точки обозначают инжектируемые частицы, ориентация «стрелок» указывает направление движения частиц, а длина «стрелок» показывает величину скорости движения частиц. При тех же параметрах процесса ЛИН количество вводимых частиц, глубина ванны расплава и длительность затвердевания одинаковые. При непрерывном процессе ЛИН частицы равномерно распределены в ванне расплава, как показано на рис. 8, б. Рис. 8, а показывает, что скорость

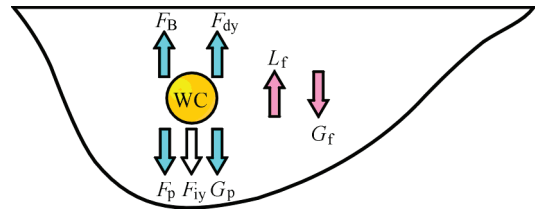


Рис. 7. Схема сил, действующих на частицу и окружающую жидкость

погружения частиц затухает при воздействии направленной вниз силы Лоренца. В течение того же периода затвердевания частицы, вводимые в ванну расплава, вряд ли могут опуститься на дно ванны расплава до затвердевания ванны расплава, и они концентрируются в верхней части ванны расплава. Фактически, частицы в ванне расплава не погружаются по прямой линии; траектории погружения были рассчитаны на имитационной модели и представлены на рис. 8, в (траектории погружения различны для частиц в разных положениях впрыскивания; частицы, показанные на рис. 8, в, взяты из центральной зоны лазерного пятна). Когда частицы проникают через поверхность ванны расплава, они переносятся вместе с движением жидкости из-за сильной конвекции Марангони у поверхности. Получаемые в результате траектории погружения частицы становятся различными, в основном из-за синергетического электромагнитного эффекта. Полученная выталкивающая сила, действующая на частицы, увеличивается при действии направленной вниз силы Лоренца. В результате, глубина погружения частиц уменьшается более явно. Между тем, конвекция Марангони больше влияет на частицы вблизи поверхности ванны расплава; они легче притягиваются к краю ванны расплава, где она подвержена затвердеванию.

Уравнение (18) получается из уравнения (16) путем разложения сил F_B и L_p . Принимается, что эквивалентное ускорение силы тяжести является синтезом локального ускорения силы тяжести и силы

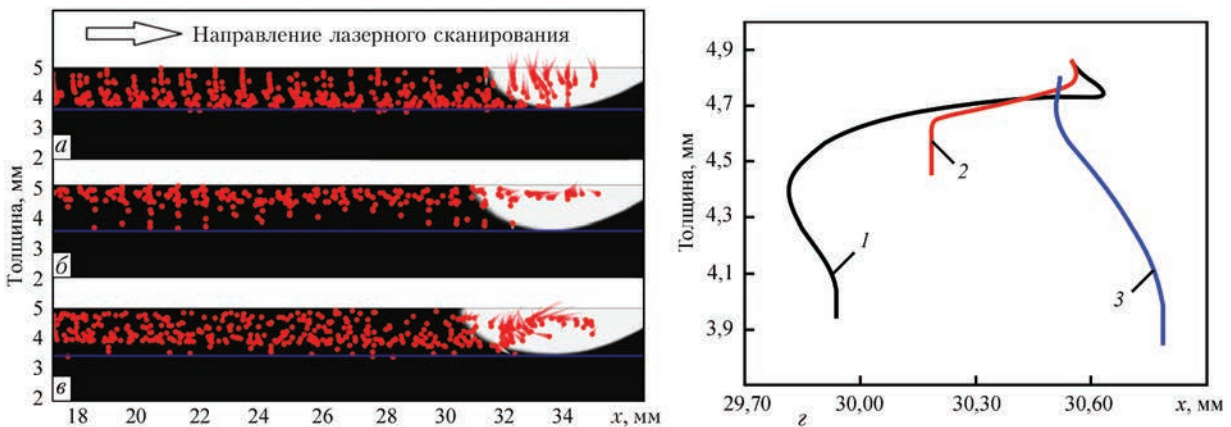


Рис. 8. Модель положения захваченных частиц в слое ЛИН: а — сила Лоренца, направленная вверх; б — вниз; в — без силы Лоренца; г — траектории погружения вводимых частиц (1 — без силы Лоренца; 2 — сила Лоренца направлена вниз; 3 — сила Лоренца направлена вверх)

Лоренца, связанной с плотностью жидкости. Согласно приведенным выше уравнениям, когда сила Лоренца и сила тяжести направлены в одну сторону, частицы в ванне расплава находятся только в состоянии гипергравитации, а когда сила Лоренца и сила тяжести направлены в противоположные стороны, частицы в ванне расплава можно считать находящимися в состоянии гипогравитации. В итоге, направление силы Лоренца можно легко регулировать путем изменения направления электрического и магнитного полей, контролируя, таким образом, перемещение частиц в процессе ЛИН.

$$\left(g - \frac{jB}{\rho_f}\right)\rho_f V + F_{dy} - G_p + F_{iy} = 0, \quad (20)$$

где ρ_f — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Выводы

Синергетический эффект КМЭП на распределение упрочняющих частиц при инъекционной лазерной наплавке был изучен экспериментально и с помощью численного моделирования. Сила Лоренца, создаваемая КМЭП, может изменить градиент распределения частиц WC. КМЭП показало влияние на распределения частиц WC в слоях ЛИН без корректировки исходных параметров ЛИН. Когда сила Лоренца и сила тяжести направлены в одном и том же направлении, большинство частиц задерживаются в верхней области, в случае, когда сила Лоренца и сила тяжести имеют противоположное направление, большинство частиц сосредоточены в нижней области. С помощью КМЭП скорость погружения и траектория частиц WC были изменены благодаря дополнительной объемной силе, действующей на жидкий металл ванны в процессе ЛИН.

Авторы благодарны за финансовую поддержку от Национального фонда естественных наук Китая. Отдельная благодарность проф. Ронг Лю из университета Карлтона за ее любезную помощь в совершенствовании статьи.

1. In situ investigation of fracture behavior in monocrystalline WCp-reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites produced by laser melt injection / D. Liu, Y. Chen, I. Li [et al.] // Scripta Materialia. – 2008. – 59. – P. 91–94.
2. Electron microscopy study of reaction layers between single-crystal WC particle and Ti-6Al-4V after laser melt injection / L. Li, D. Liu, Y. Chen [et al.] // Acta Materialia. – 2009. – 57. – P. 3606–3614.
3. Performance of a cutting tool made of steel matrix surface nano-composite produced by in situ laser melt injection technology / O. Verezub, Z. Kálazi, A. Sytcheva [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – 211. – P. 750–758.
4. Wear resistance of WCp/Duplex Stainless Steel metal matrix composite layers prepared by laser melt injection / Do Nascimento A. M., Ocelik V., Ierardi M. C. F. [et al.] //

- Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202. – P. 4758–4765.
5. A study of laser melt injection of TiN particles to repair maraging tool steels / M. Cabeza, G. Castro, P. Merino [et al.] // Surface and Interface Analysis. – 2014. – 46. – P. 861–864.
6. Microstructure of reaction zone in WCp/duplex stainless steels matrix composites processing by laser melt injection / Do Nascimento A. M., Ocelik V., Ierardi M. C. F. [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202. – P. 2113–2120.
7. Laser melt injection in aluminum alloys: on the role of the oxide skin / J. A. Vreeling, V. Ocelik, Y. T. Pei [et al.] // Acta Materialia. – 2000. – 48. – P. 4225–4233.
8. Li FQ. Arc enhanced laser melt injection WC particles on Al surface / F. Q. Li, L. Q. Li, Y. B. Chen // Surface Engineering. – 2013. – 29. – P. 296–299.
9. Pei YT. SiCp/Ti6Al4V functionally graded materials produced by laser melt injection / Y. T. Pei, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson // Acta Materialia. – 2002. – 50. – P. 2035–2051.
10. Vreeling JA. Ti-6Al-4V strengthened by laser melt injection of WCp particles / J. A. Vreeling, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson // Fcta Materialia. – 2002. – 50. – P. 4913–24.
11. WCp/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection / Y. Chen, D. Liu, F. Li [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202. – P. 4780–4787.
12. Liu A. Improved Wear Resistance of Low Carbon Steel with Plasma Melt Injection of WC Particles / A. Liu, M. Guo, H. Hu // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2009. – 19. – P. 848–851.
13. Microstructure of Cr₃C₂-reinforced surface metal matrix composite produced by gas tungsten arc melt injection / A. Liu, M. Guo, H. Hu [et al.] // Scripta Materialia. – 2008. – 59. – P. 231–234.
14. Microstructure and wear resistance of low carbon steel surface strengthened by plasma melt injection of SiC particles / M. Guo, A. Liu, M. Zhao [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202. – P. 4041–4046.
15. Microstructures and wear resistance of large WC particles reinforced surface metal matrix composites produced by plasma melt injection / A. Liu, M. Guo, M. Zhao [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2007. – 201. – P. 7978–7982.
16. WCp/Fe metal matrix composites produced by laser melt injection / D. Liu, L. Liu, F. Liu [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202. – P. 1771–1777.
17. In-situ synthesis of a carbide reinforced steel matrix surface nanocomposite by laser melt injection technology and subsequent heat treatment / O. Verezub, Z. Kálazi, G. Buza [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2009. – 203. – P. 3049–3057.
18. Guo B. Simulation of the agglomeration in a spray using Lagrangian particle tracking / B. Guo, D. F. Fletcher, T. A. G. Langrish // Applied Mathematical Modelling. – 2004. – 28. – P. 273–90.
19. Minier J-P. On Lagrangian stochastic methods for turbulent polydisperse two-phase reactive flows / J-P. Minier // Progress in Energy and Combustion Science. – 2015. – 50. – P. 1–62.
20. Microstructure evolution of single crystal WCp reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites produced at different cooling rates / Y. Chen, D. Liu, L. Li [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – 484. – P. 108–12.
21. Kloosterman AB Electron microscopy of reaction layers between SiC and Ti-6Al-4V after laser embedding / A. B. Kloosterman, B. J. Kooi, J. T. M. De Hosson // Acta Materialia. – 1998. – 46. – P. 6205–6017.
22. Anandkumar R. Influence of powder particle injection velocity on the microstructure of Al-12Si/SiCp coatings produced by laser cladding / R. Anandkumar, A. Almeida, R. Vilar [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2009. – 204. – P. 285–90.
23. Gatzen M. Effect of electromagnetic Stirring on the Element Distribution in Laser Beam Welding of Aluminium with Filler Wire / M. Gatzen, Z. Tang, F. Vollertsen // Physics Procedia. – 2011. – 12. – P. 56–65.

24. Tang Z. Influence on the dilution by laser welding of aluminum with magnetic stirring / Z. Tang, M. Gatzen // Physics Procedia. – 2010. – 5. – P. 125–137.
25. Gatzen M. Influence of Low-frequency Magnetic Fields During Laser Beam Welding of Aluminium with Filler Wire // Physics Procedia. – 2012. – 39. – P. 59–66.
26. Velde O. Numerical investigations of Lorentz force influenced Marangoni convection relevant to aluminum surface alloying / O. Velde, R. Gritzki, R. Grundmann // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2001. – 44. – P. 2751–2762.
27. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts / M. Bachmann, V. Avilov, A. Gumenyuk [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – 60. – P. 309–321.
28. Laser Beam Welding of Aluminum Alloys Under the Influence of an Electromagnetic Field / A. Schneider, V. Avilov, A. Gumenyuk [et al.] // Physics Procedia. – 2013. – 41. – P. 4–11.
29. Zhou J. Effects of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding / J. Zhou, H.-L. Tsai // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – 50. – P. 2217–2235.
30. Numerical simulation of full-penetration laser beam welding of thick aluminium plates with inductive support / M. Bachmann, V. Avilov, A. Gumenyuk [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2012. – 45. – P. 035201.
31. Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy / M. Akbari, S. Saedodin, D. Toghraie [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2014. – 59. – P. 52–59.
32. 2D longitudinal model ing of heat transfer and fluid flow during multilayered direct laser metal deposition process / S. Morville, M. Carin, P. Peyre [et al.] // Journal of Laser Applications. – 2012. – 24. – P. 032008.
33. Brent A. D. Enthalpy-Porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to the Melting of a Pure Metal / A. D. Brent, V. R. Voller, K. J. Reid // Numerical Heat Transfer Part B-fundamentals. – 1988. – 13. – P. 297–318.
34. A theoretical model for laser and powder particles interaction during laser cladding / Y. Fu, A. Loreda, B. Martin [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – 128. – P. 106–112.

Поступила в редакцию 08.12.2015



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Конференция, посвященная 70-летию Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины

Языки конференции: украинский, русский, английский

Конференция состоится **25-27 мая 2016 г.** по адресу: г. Киев, бульвар Академика Вернадского, 36

ТЕМАТИКА

- ◆ Физика прочности и пластичности металлов и сплавов
- ◆ Атомное строение металлов и металлосодержащих гетерофазных структур
- ◆ Электронная структура и свойства металлов и соединений на их основе
- ◆ Наномасштабные и наноструктурированные системы

ДАТЫ

до **15.03.2016 г.** — прием заявок на участие вместе с короткими тезисами (до ½ стр.)

до **30.03.2016 г.** — уведомление о включении доклада в программу конференции и его формат

Информация об условиях проведения и участия в конференции размещена на официальной странице Института

<http://www.imp.kiev.ua>
E-mail: mpmms@imp.kiev.ua