

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

УДК 621.793

В.Н. ЧАЧИН, М.А. КАРДАПОЛОВА,
Н.В. СПИРИДОНОВ, О.Г. ДЕВОЙНО,
В.К. ЛАЗНЕВ

СНИЖЕНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИХ ЛОКАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ С ПЛАВЛЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ

Перспективным методом восстановления-упрочнения рабочих поверхностей быстроизнашивающихся деталей является газотермическое напыление никелевых самофлюсующихся сплавов с последующим оплавлением концентрированным источником энергии, например лазерным лучом [1]. Метод обеспечивает возможность получения износостойких покрытий с комплексом улучшенных физико-механических свойств и, кроме того, позволяет восстанавливать крупногабаритные и тонкостенные детали.

Одной из проблем, возникающих при разработке технологии лазерного оплавления покрытий из самофлюсующихся сплавов, является снижение трещинообразования.

Возникновение трещин в процессе лазерного оплавления имеет место при "жестких" режимах лазерной обработки (больших плотностях мощности и скоростях перемещения луча), характеризующихся высокими скоростями нагрева и охлаждения оплавляемого покрытия. Как показывает анализ образующейся сетки трещин на оплавляемом покрытии (рис. 1, а), основной причиной трещинообразования являются термические напряжения, обусловленные высокими скоростями охлаждения зоны обработки из жидкой фазы и возникающим при этом значительным градиентом температур по глубине слоя. Ситуация усугубляется различием коэффициентов линейного расширения материалов покрытия и основы.

При таких условиях основными путями снижения трещинообразования в покрытиях является "смягчение" условий кристаллизации ванны расплава и охлаждения зоны обработки, что в общем случае достигается использованием более "мягких" режимов лазерного оплавления или охлаждением детали вместе с печью, начиная с 973 К или введением в покрытие добавок, снижающих температуру его оплавления или стабилизирующих γ -твердый раствор никеля. Необходимо отметить, что не рассматривалось влияние распределения энергии по сечению лазерного луча на формирование оплавленного слоя. Улучшение условий кристаллизации и охлаждения ванны расплава может быть достигнуто при неравномерном ступенчатом подводе энергии к определенной точке поверхности в начальный и конечный моменты воздействия лучом лазе-

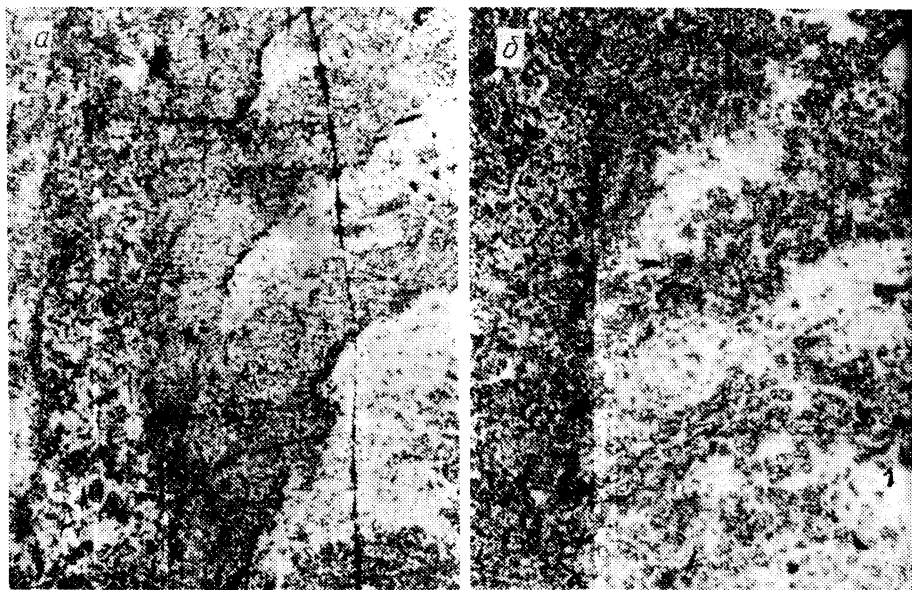


Рис. 1. Покрытие из самофлюсующегося сплава, оплавленное лучом лазера с равномерным (а) и "ступенчатым" (б) распределением энергии по сечению. Гравление электролитическое (x100)

ра. На первом этапе на нее будет воздействовать часть луча с высокой плотностью мощности. По мере его перемещения эта точка станет подвергаться воздействию другой части луча с пониженной плотностью мощности.

Следует ожидать снижения скорости охлаждения ванны расплава или изменения условий ее кристаллизации, в этом случае начинающейся с нижней ее части. Сохранение в верхней части жидкой фазы будет способствовать залечиванию микротрещин, возникающих в процессе кристаллизации в нижних слоях, и релаксации возникающих напряжений.

Для получения экспериментальных данных по влиянию распределения энергии на трещинообразование была проведена серия опытов. Использовались призматические образцы с размерами 60x20x10 мм из стали X18H10T. На установке УПУ-ЗД плазмотроном ПП-25 на них напылялся слой самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ толщиной 0,7 мм.

Обработку лучом лазера проводили на установке непрерывного действия ЛГН-702. Распределение плотности мощности по лазерному пятну изменялось резюстировкой концевых зеркал резонатора и подбирались методом проб и ошибок, причем контроль проводился на глубине следа, полученного при кратковременном воздействии на органическое стекло.

Как видно из приведенных в табл. 1 экспериментальных данных, трещинообразование сильно зависит от распределения плотности энергии по лазерному пятну. Ступенчатый подвод энергии в зону обработки оказывается более выгодным с точки зрения снижения трещинообразования. Причины такого эф-

фекта могут быть раскрыты при изучении температурных полей в зоне лазерного воздействия.

Тепловые поля при различных условиях подвода энергии были получены путем решения прямой нестационарной и нелинейной краевой задачи теплопроводности с граничными условиями 2-го рода, с движущейся границей фазового перехода (задача Стефана). Нелинейность задачи определяется зависимостью теплофизических свойств материалов от температуры. Нелинейность усугубляется и движением границы фазового перехода 1-го рода (граница расплава).

Рассматривалось тело в виде прямоугольного параллелепипеда размерами $xx'xz$, состоящее из m слоев различного состава. Толщина каждого i -го слоя — H_i (м).

Теплофизические свойства для каждого агрегатного состояния металла задавались в виде параболических уравнений:

$$\lambda_{ij} = a_{ij_0} + a_{ij_1} T + a_{ij_2} T^2;$$

$$c_{ij} = b_{ij_0} + b_{ij_1} T + b_{ij_2} T^2,$$

где λ — коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К); c — объемная теплоемкость металла при постоянном давлении; a, b — коэффициенты регрессии, рассчитанные на базе статистических справочных данных; j — индекс, обозначающий температурный интервал; $j = 1$ соответствует температуре ниже линии солидус, $j = 2$ — интервалу между линиями солидус и ликвидус, $j = 3$ — температуре выше линии ликвидус.

В начальный момент времени ($\tau_0 = 0$) поле температур в теле описывается зависимостью от координат $T_0 = f_0(x, y, z)$. С этого момента на поверхность тела начинает воздействовать поверхностный тепловой источник (лазерный луч) диаметром D (м) и мощностью $W = \epsilon W_{\text{л}}$, где $W, W_{\text{л}}$ — соответ-

Табл. 1. Зависимость эффекта трещинообразования от распределения энергии по площади лазерного пятна

Соотношение интенсивностей второй и первой зон лазерного пятна, %	Отношение продолжительности воздействия второй зоны лазерного излучения к общему времени его воздействия, %	Удельная длина трещин, мкм/мм ²
20	50	95
30	50	80
50	50	20
30	30	90
30	40	95
30	70	130
Равномерное распределение		250

исинно поглощенная телом тепловая мощность и полная мощность лазерного излучения, Вт; ϵ – эффективный коэффициент поглощения.

В результате неравномерного распределения энергии в луче плотность поглощенной мощности ($\text{Вт}/\text{м}^2$) зависит в общем случае от координат, т.е.

$$W = f(x, y),$$

при этом

$$W = \int_A W dA,$$

где A – площадь пятна нагрева, м^2 .

Начальное поглощение центра луча на поверхности тела задано координатами x_0, y_0 (м), а положение центра в текущий момент времени определяется выражениями

$$y = y_0, \quad x = x_0 + v(\tau - \tau_0),$$

где v – скорость перемещения луча, м/с.

Процесс распространения теплоты в теле определяется для точек вне границ фазового перехода дифференциальным уравнением Фурье [2]

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right);$$

для точек с фазовым переходом (плавление–затвердевание) [3]

$$(c + L) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где L – энтальпия фазового перехода, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$).

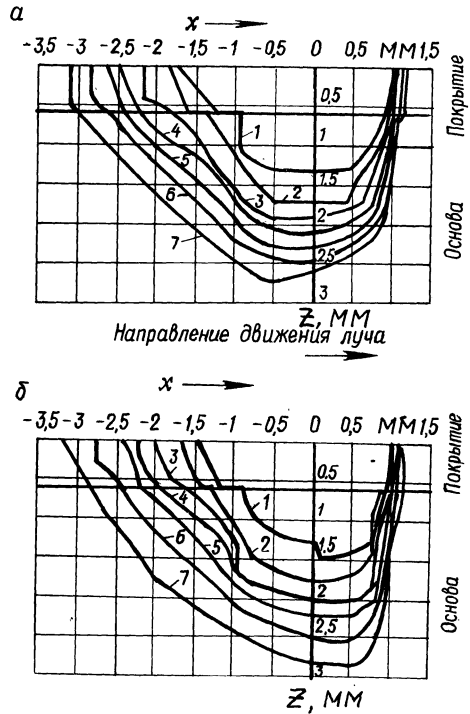
Поставленная нелинейная нестационарная задача решалась методом конечных разностей.

При постановке задачи было сделано достаточно много допущений и упрощений. Например, не учитывалась динамика движения расплава, охлаждение расплава в атмосферу, пористость напыленного покрытия и т.д. Поэтому математическая модель дает довольно приближенные значения абсолютных размеров ванны расплава и изотермы, но позволяет достаточно точно оценивать характер тех изменений, которые вызываются неравномерным распределением мощности по площади пятна.

Характерные осевые продольные сечения тепловых полей, возникающих при лазерном оплавлении покрытия, представлены на рис. 2.

Из приведенных данных следует, что при одних и тех же режимах лазерной обработки изменение распределения энергии по пятну не вызывает заметного изменения положения и формы изотерм в диапазоне от 773 до 1173 К. Это влияет в большей степени на форму ванны расплава. При обеспечении

Рис. 2. Продольные осевые сечения тепловых полей, возникающих в случае лазерного оплавления покрытия при равномерном распределении плотности мощности по пятну (а) и при "ступенчатом" подводе энергии в зону обработки (б)



"ступенчатого" подвода энергии ванна расплава приобретает такое же неоднородное по глубине строение; ее длина меняется незначительно, как и положение изотерм. Это указывает на то, что изменение условий подвода энергии не вызывает заметного изменения времени нахождения покрытия в жидком состоянии, а также скорости его охлаждения. Поэтому наиболее вероятной причиной уменьшения трещинообразований покрытий является кинетика кристаллизации ванны расплава. Как видно из рис. 2, б, на первом этапе кристаллизуется нижняя часть ванны расплава. При кристаллизации верхних зон нижние области находятся еще в пластическом состоянии, обеспечивая возможность протекания релаксационных процессов. Последней кристаллизуется верхняя часть ванны расплава, что способствует залечиванию образующихся при быстром его остывании в нижних областях первичных трещин. При обработке лазерным лучом с равномерным распределением энергии кристаллизация происходит практически одновременно по всей глубине ванны расплава, что ухудшает условия релаксации напряжений и приводит к их росту, а значит, служит причиной повышенного трещинообразования.

Таким образом, результаты проведенных исследований и теоретические оценки показывают, что изменение распределения энергии излучения по лучу — эффективный фактор воздействия на качество оплавляемых покрытий и, в частности, на интенсивность трещинообразования. Снижение количества трещин связано с изменением условий кристаллизации ванны расплава. Учитывая, что варьирование распределения энергии по лазерному лучу обеспечивает получение ряда других положительных эффектов, целесообразно реко-

мендовать выпуск установок со стабильным регулированием распределения энергии по лучу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кардаполова М.А., Спиридонов Н.В. Применение лазерной обработки для оплавления покрытий из никелевых самофлюсующихся сплавов // Композиц. покрытия. – Житомир, 1985. – С. 55–56. 2. Рихтмайер Р., Мортон К. Разносторонние методы решения краевых задач. – М., 1972. – 418 с. 3. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема складного счета для многомерной задачи Стефана // Вычисл. математика и математич. физика. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816–827.

УДК 621.793

Б.А. КАЛЕДИН

ВЫБОР УПРАВЛЯЕМЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ МЕТОДОМ АПРИОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ

Процесс нанесения покрытий на изделия – многостадийный, определяется большим числом факторов (по некоторым данным, от 30 до 60). Поэтому возникает задача выделить из них наиболее существенные и управляемые для проведения, например, активного эксперимента. Для решения этой задачи может быть использован метод априорного ранжирования, который позволяет путем целенаправленного опроса специалистов и соответствующей обработки результатов этого опроса определить роль и место каждого из исследуемых факторов [1].

Рассмотрим применение этого метода на следующем примере. Требовалось выделить наиболее значимые факторы при исследовании процесса нанесения покрытия на стальную компактную основу. В качестве определяющего параметра оптимизации была выбрана прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{\text{в}}$. Изучались следующие факторы: метод нанесения покрытия (x_1), конструкция горелки или плазмотрона (x_2), размеры частиц напыляемого порошка (x_3), форма частиц порошка (x_4), исходная плотность порошка (x_5), температура нагрева частиц порошка (x_6), давление сжатого воздуха (x_7), температура подогрева основы (подложки) (x_8), подача плазмотрона или горелки (x_9), расстояние от них до подложки (x_{10}), материал подложки (x_{11}), материал порошка (x_{12}), исходная обработка поверхности (x_{13}), толщина покрытия (x_{14}).

Эти факторы оценивались двумя группами специалистов: в первой группе было 7, а во второй – 8 экспертов. Специалисты представляли различные научные школы, учреждения и предприятия.

Каждому из специалистов предлагалось заполнить анкету, куда, помимо перечня факторов, их уровней, диапазона изменения, была внесена графа "ранг фактора".

Эксперт располагал факторы в порядке убывания их воздействия на прочность сцепления покрытия с основой, т.е. ранжировал их. Когда он не мог ука-