

Рис. 4. Распределение температуры в поверхностном слое металла:

- а) схема движения источника нагрева; б) изотермы по глубине поверхностного слоя; в) расчетные значения температуры по глубине образца; г) изотермы на поверхности образца.

УДК

Девойно Ю.О., Авсиевич А.М., Кундас С.П., Марковник Д.В.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧАСТИЦАХ ПОРОШКА ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

При создании прогрессивных технологий нанесения упрочняющих покрытий все большее внимание уделяется применению порошков на основе железа. Это обусловлено в первую очередь невысокой стоимостью таких материалов по сравнению с традиционно широко используемыми порошками на основе никеля, а также рядом технологических преимуществ. Газотермическое напыление может являться как основной операцией, обеспечивающей формирование свойств покрытий, так и предварительной, предшествующей различным способам оплавления или химико-термической обработки.

Наиболее эффективным путем снижения затрат на упрочнение-восстановление деталей напылением является применение недорогих материалов отечественного производства, а чаще всего – использование в качестве сырья отходов метал-

лургических, машиностроительных и других производств. В этом отношении с экономической и технологической точки зрения значительный интерес представляет порошок износостойкого высокохромистого чугуна ИЧХ28Н2. Этот высоколегированный материал (28 % Cr, 2,5 % C, 2 % Ni, 1 % Mn, остальное Fe), образуется в виде дисперсных частиц оптимальной для напыления сферической формы в результате электроэрозионной обработки. В Беларуси количество таких отходов достигает 60 тонн в год. Согласно проведенному анализу, из них около 25 % имеет грануляцию ниже 160 мкм.

Традиционно материалы сходного химического состава наносились различными видами наплавки, поэтому отработка технологии напыления порошка высокохромистого чугуна представляется актуальной задачей. Существенное влияние

*Девойно Ю.О.*, аспирант кафедры «Технологическая эксплуатация автомобилей» Белорусского национального технического университета.

*Авсиевич А.М.*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая эксплуатация автомобилей» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.

*Кундас Семен Петрович*, доктор технических наук, профессор, ректор Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова.

Беларусь, МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 220009, г. Минск, ул. Долгобродская, 23.

*Марковник Денис Викторович*, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Беларусь, БГУИР, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

на процесс формирования покрытий оказывают теплофизические свойства материала и размер частиц. Исследование динамики тепловых процессов и кинематики частиц с различной грануляцией при напылении порошка ИЧХ28Н2 явилось предметом исследований с применением компьютерного моделирования.

В основу моделирования положены разработки [1-3]. Расчет температурного поля частиц порошка при напылении проводился путем решения уравнения теплопроводности в сферических координатах

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $c$  – соответственно плотность и теплоемкость в точке расчета (зависимые от температуры),  $T$  – температура,  $t$  – время,  $r$  – расстояние от центра частицы до точки расчета,  $\lambda$  – теплопроводность в точке расчета.

При решении уравнения (1) устанавливались граничные условия теплового потока, воспринимаемого поверхностью частицы, симметричности нагрева, а также условие плавления. Составлялись разностные схемы второго порядка точности, представляющие собой трехдиагональную нелинейную систему уравнений. Данная нелинейная система линеаризуется при помощи итерационного метода Ньютона и решается методом прогонки.

При расчете скорости частицы использовалось дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{3 A v_g (V_g - V_p)}{4 d_p^2 \rho_p}, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент динамического сопротивления,  $v_g$  – динамическая вязкость газа,  $V_g$  и  $V_p$  соответственно скорости газа и частицы,  $\rho_p$  – плотность частицы.

Уравнение (2) решалось методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

С помощью разработанной модели исследовался процесс нагрева и ускорения частиц различной грануляции в плазменной струе азота при силе тока 200 А, напряжении 90 В, диаметре сопла плазмотрона 4 мм. Такие режимы напыления отличаются невысоким энергопотреблением и реализуются на серийно выпускаемых и широко применяемых в промышленности установках. Диапазон расчетной грануляции частиц, наиболее широко используемый при напылении – от 40 до 120 мкм. Теплофизические свойства высокохромистого чугуна марки ИЧХ28Н2 были взяты из литературы [4], а свойства железа с учетом зависимости его теплоемкости от температуры – из [5, 6]. Для сравнения также моделировался процесс напыления железных частиц без легирующих добавок. Учитывая отклонение траектории от оси плазменной струи при тангенциальной подаче порошка, частица находится в ядре факела плазмы, проходя дистанцию 15...20 мм от среза сопла плазмотрона.

По результатам расчетов для частиц различной грануляции построены зависимости их температуры и скорости от дистанции напыления, представленные на рис. 1 и 2.

Как видно из графиков, степень разогрева частиц в высокой степени зависит от их грануляции. Для принятых режимов напыления предельный размер, при котором частицы достигают температуры плавления, составляет 120 мкм. Расплавленные частицы грануляцией 80 мкм перегреваются выше точки плавления примерно на 400 градусов, тогда как при грануляции 40 мкм температура перегрева на порядок выше. Указанная разница определяется многократным различием в массе частиц. При этом двух- или трехкратное различие в

скорости и, соответственно, более длительное нахождение частиц большей грануляции в горячей части струи оказывает мало значимым фактором для динамики нагрева. При одинаковых размерах частицы высокохромистого чугуна по сравнению с железными частицами характеризуются меньшим перегревом, что объясняется их большей теплоемкостью во всем интервале температур.

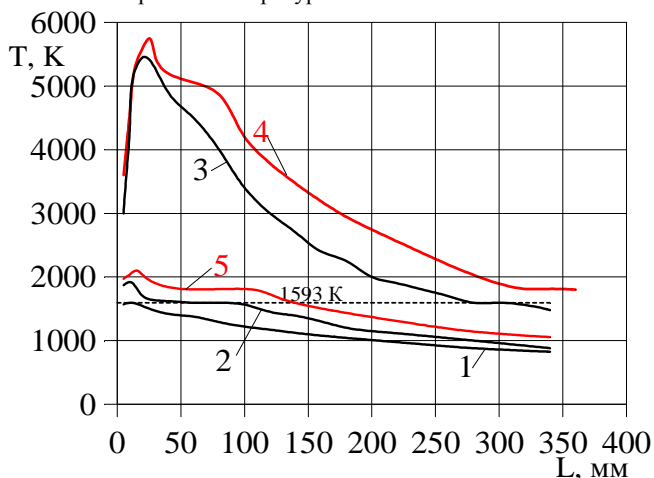


Рис. 1. Зависимость температуры порошковых частиц различной грануляции от дистанции напыления: 1 – 120 мкм (порошок ИЧХ); 2 – 80 мкм (порошок ИЧХ); 3 – 40 мкм (порошок ИЧХ); 4 – 40 мкм (железо); 5 – 80 мкм (железо).

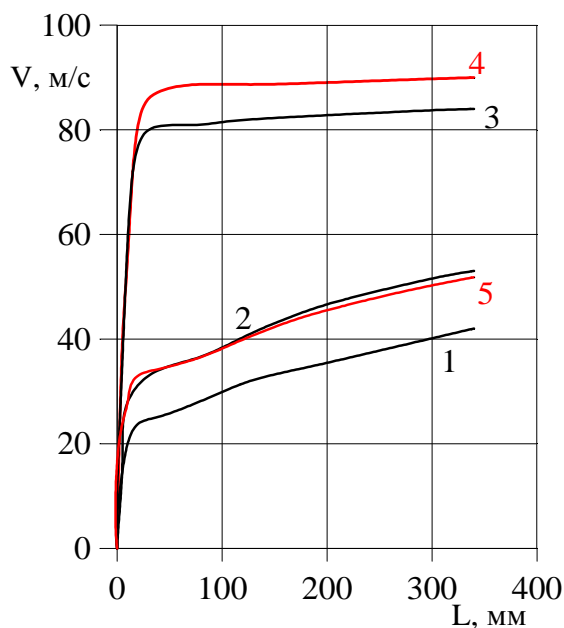


Рис. 2. Зависимость скорости порошковых частиц различной грануляции от дистанции напыления: 1 – 120 мкм (порошок ИЧХ); 2 – 80 мкм (порошок ИЧХ); 3 – 40 мкм (порошок ИЧХ); 4 – 40 мкм (железо); 5 – 80 мкм (железо).

Несмотря на относительно невысокую энергию струи плазмы, при указанных выше режимах напыления для частиц размером от 40 до 120 мкм характерна высокая скорость нагрева: полное проплавление происходит на дистанции от 1 мм (для грануляции 40 мкм) до 12 мм (для грануляции 120 мкм). Перегрев выше температуры плавления для всего диапазона грануляций происходит на дистанции до 30 мм, пока частица находится в горячей части факела плазменной струи. Частицы высокохромистого чугуна, по сравнению с железными, быстрее проплавляются на всю глубину, что объясняется их более низкой температурой плавления (1593 К и 1812 К соответственно).

Динамика остывания частиц от максимальных температур до температуры кристаллизации для обоих рассматриваемых материалов практически одинакова. Для оптимизации технологических параметров важным фактором является расстояние (дистанция), на котором происходит обратный переход частиц из жидкого состояния в твердое. Соответствующие значения приведены в табл.1.

**Таблица 1.** Зависимость расстояния от сопла плазмотрона, на котором происходит полное затвердевание частицы, от ее грануляции

Грануляция частицы, мкм	Расстояние от сопла плазмотрона, мм	
	порошок ИЧХ	железо
40	320	350
60	195	-
80	105	110
100	100	-
120	20	-

Согласно рекомендациям [7] температура частицы в момент удара об основу должна находиться в пределах  $T_{пл} < T < 0,8T_{пл}$ . При этом частицы обладают достаточно высокой температурой, способностью к адгезии и пластичностью, но не находятся в жидкой фазе, что предотвращает разбрызгивание и расплавление уже нанесенного покрытия.

Как видно из таблицы, дистанция затвердевания в высокой степени зависит от грануляции частиц, что определяется многократным различием в максимальной температуре их нагрева. В то же время при одинаковой грануляции различие приведенного параметра для частиц порошка высокохромистого чугуна и железа составляет 5...10 %, что соответствует различию теплоемкостей этих материалов в жидкой фазе.

Проведенное исследование позволяет сделать ряд выводов и рекомендаций по оптимизации режимов плазменного напыления порошковых материалов.

1. Для материалов на железной основе имеет место существенное различие теплофизических свойств, определяемое присутствием разных легирующих элементов и их процентным содержанием. Это существенно влияет на динамику про-

текания тепловых процессов и должно учитываться при назначении режимов нанесения покрытий из конкретного материала. Указанные эффекты более заметны при меньшей грануляции частиц.

2. Высокая степень зависимости дистанции затвердевания частиц от их размеров позволяет выделить приемлемый диапазон грануляции, обеспечивающий достаточно равномерный разогрев и остывание частиц. Для плазменного напыления порошка износостойкого высокохромистого чугуна в струе азота при силе тока 200 А и напряжении 90 В наиболее широкий диапазон грануляции составляет от 75 до 110 мкм. Проведение аналогичных расчетов для различных порошковых материалов создает предпосылки для оптимизации гранулометрического состава компонентов порошковых композиций различного назначения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильюшенко и др. – Мн.: Бестпринт, 1998. – 212 с.
2. Кундас С.П., Гуревич В.А., Кашко Т.А. Моделирование нагрева частиц порошка в плазменной струе с учетом движения фронтов плавления и испарения // Известия Белорусской инженерной академии. 2000. – №1 (9) / 2. – С. 82 – 84.
3. Kundas S.P., Kashko T.A, Markovnik D.V., Reut O.P. 3-D simulation of particle acceleration and heating under TBC plasma spraying. Proceeding of Powder Metallurgy 2004 World Congress. Vienna. Vol.5, 2004. P. 561-567.
4. Комаров О.С. Формирование структуры чугунных отливок. Мн.: Наука и техника, 1977. – 222 с.
5. Физический энциклопедический словарь. В 5-ти т. Т.2. Е – Литий. М.: Советская энциклопедия, 1962. – 608 с.
6. Лариков Л. Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1985. – 437 с.
7. Кудинов В.В. Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

УДК 621.793

**Оковитый В.А., Шевцов А.И., Девойно О.Г.**

### ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Лазер, как источник энергии имеет свои особенности и преимущества при обработке плазменных покрытий:

- 1) высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют обрабатывать только поверхностный участок покрытия без нагрева всего объема и нарушения его структуры и свойств;
- 2) возможность управления параметрами лазерного воздействия обеспечивает регулирование структуры поверхностного слоя, его твердости, шероховатости, износостойкости, геометрических размеров обработанных участков и др.

Лазерная обработка газотермических покрытий может обеспечить значительное уплотнение внешнего слоя, устранить пористость в поверхностном слое, снизить шероховатость. Однако следует учитывать, что лазерная обработка приводит к существенным структурным превращениям и перераспределению напряжений в покрытии, определяемым режимами лазерной обработки, поэтому требуется их оптимизация [1, 2].

Оптимизация лазерной обработки покрытий NiCr(FeCr/FeCrMo)+MoS<sub>2</sub>/CaF<sub>2</sub>(графит)+TiC проводилась по критерию получения плотной, оплавленной структуры по всей толщине напыленного материала. При варьировании

**Оковитый В.А.**, кандидат технических наук, Лаборатория плазменного напыления, Институт порошковой металлургии НАН Республики Беларусь.

**Шевцов В.А.**, кандидат технических наук, Лаборатория плазменного напыления, Институт порошковой металлургии НАН Республики Беларусь.

Беларусь, ГНУ, 220005, г. Минск, ул. Платонова, 41.

**Девойно О.Г.**, доктор технических наук, Лаборатория плазменных и лазерных технологий, Белорусский национальный технический университет.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.