

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ-ПОДЛОЖКА» ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ *STELLITE 190* СКАНИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ

© 2009 С.С. Жаткин, В. И. Никитин, А.А. Паркин

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 20.11.2009

Проведен анализ влияния параметров плазменной наплавки (ток и напряжение дуги, скорость наплавки и расход подаваемого порошка *Stellite 190*) на процесс нагрева наплавленного слоя на стали 19ХГНМА. Исследовано влияние данных параметров на степень проплавления поверхности заготовки.

Ключевые слова: *плазменная наплавка, порошковые материалы, сканирование пучка, компьютерное моделирование, процесс нагрева*

Важное место в ряду высокотехнологичных плазменных процессов занимает наплавка покрытий на рабочие поверхности с определенными физико-механическими свойствами. На процесс наплавки влияют такие факторы как ток и эффективный диаметр плазменной дуги; скорости сканирования плазмотрона и движения детали; расход порошка, состав, процентное содержание и дисперсность его компонентов; соотношение теплофизических свойств наплавленного покрытия и материала заготовки и ряд других. В большинстве имеющихся работ [2-4] не анализируется в полной мере влияние ряда указанных выше факторов на процессы нагрева при наплавке. В данной работе приводятся результаты моделирования нагрева системы «покрытие-подложка» с учетом роста толщины наплавленного слоя при плазменной наплавке. При моделировании использовались свойства порошкового материала наплавки *Stellite 190* и долотной стали 19ХГНМА в качестве подложки.

**Физическая модель процесса и исходные данные.** Состав и процентное содержание компонентов порошка *Stellite 190* представлены в таблице 1. При моделировании процесса наплавки ток дуги менялся от 60 до 120 А. Скорость перемещения детали менялась от 2 до 6 мм/с, расход порошка составлял  $0,13 \cdot 10^{-3}$ ,  $0,27 \cdot 10^{-3}$  и  $0,54 \cdot 10^{-3}$  кг/с (8, 16 и 32 г/мин). При диаметре сопла плазмотрона 2 мм

эффективный радиус пучка принимался  $R_{эфф}=1,4$   $R_c=1,4$  мм. Были реализованы модели неподвижного источника и со сканированием пучка и движением детали. Расчеты проводились в пакете Mathcad 14.

В расчетах плотность и теплоемкость наплаваемого слоя считали аддитивными величинами с учетом процентного содержания компонентов в смеси, а теплопроводность приближенно оценивалась из соотношения [1].

$$\lambda_{покр} \approx \prod_{i=1}^m \lambda_i^{p_i} \quad (1)$$

где  $m$  – число компонентов в наплаваемом материале;  $\lambda_i$  – теплопроводность отдельного элемента;  $p_i$  – относительная объемная концентрация элемента.

Теплофизические свойства элементов наплаваемого материала и матрицы взяты при температуре 1850 К. При данной температуре плавятся почти все компоненты *Stellite 190* (см. табл. 1) кроме вольфрама. Однако растворение хрома и вольфрама в кобальте приводит к образованию эвтектика с температурой плавления 1573-1810 К [5]. Рассчитанные значения теплофизических свойств наплаваемого материала и подложки приведены в табл. 2, 3. Общая толщина наплавленного покрытия разбивалась на промежуточные слои равной толщины, каждый из которых наносится за промежуток времени  $t_n$ . Рассматривая покрытие и подложку как единое целое, состоящее из заготовки и слоев, наносимых за время  $t_n$ , для теплофизических расчетов можно воспользоваться понятием эквивалентной теплопроводности для многослойной системы [1].

*Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий. E-mail: sergejat@mail.ru*

*Никитин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой литейных и высокоэффективных технологий. E-mail: laser@samgtu.ru*

*Паркин Анатолий Алексеевич, кандидат технических наук, профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий*

**Таблица 1.** Химический состав и процентное содержание компонентов *Stellite190*

Состав <i>Stellite 190</i>	Co	Ni	Fe	C	Cr	Mn	Si	W
содержание, %	основа	1	2,5	3,3	26	0,5	1	14
T <sub>пл.</sub> К	1765	1728	1811	субл.	2150	1518	1688	3693
T <sub>кип.</sub> К	3230	3073	3145		2946	2353	3573	5933

**Таблица 2.** Теплофизические свойства покрытия *Stellite 190*

T <sub>пл</sub> , К	λ, Вт/м·К	C, Дж/кг·К	ρ, кг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup>	a, м <sup>2</sup> /с·10 <sup>-6</sup>
1573-1810	72,4	687	8,82	12

**Таблица 3.** Теплофизические свойства стали 19ХГНМА

T <sub>пл</sub> , К	T <sub>кин</sub> , С	λ, Вт/ м·К	C, Дж/ кг·К	ρ, кг/м <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup>	a, м <sup>2</sup> /с·10 <sup>-6</sup>
1813	3142	35	780	7,4	6,01

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{\lambda_i}} = \frac{h_{\text{подл}} + n \cdot g_n}{\frac{h_{\text{подл}}}{\lambda_{\text{подл}}} + n \cdot \frac{g_n}{\lambda_{\text{покр}}}} \quad (2)$$

где  $n$  – число слоев,  $\Delta_i$  – толщина отдельного  $i$ -го слоя, а  $\lambda_i$  – его теплопроводность. В нашем случае первый слой – это толщина  $h_{\text{подл}}$  подложки, а наплавленный слой состоит из  $n$  слоев толщиной  $g_n$ . За время наплавки одного слоя матрица прогреется на толщину  $h_{\text{подл}} = \sqrt{4 \cdot a_{\text{подл}} \cdot t_n}$ . Эквивалентные теплоемкость и плотность нашей многослойной системы определяются по формулам:

$$C_{\text{экв}} = \frac{m_{\text{покр}} C_{\text{покр}} + m_{\text{подл}} C_{\text{подл}}}{m_{\text{покр}} + m_{\text{подл}}}; \quad (3)$$

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{m_{\text{покр}} \rho_{\text{покр}} + m_{\text{подл}} \rho_{\text{подл}}}{m_{\text{покр}} + m_{\text{подл}}}; \quad (4)$$

где  $m_{\text{покр}}$ ,  $C_{\text{покр}}$ ,  $\rho_{\text{покр}}$  – масса, теплоемкость и плотность наплавленного подслоя покрытия.

Расчеты температуры при моделировании проводились по формуле [2]:

$$T(x, y, z, t_m) = \frac{P_{\dot{y}} \cdot \hat{E}}{4\pi\lambda H} \int_0^{t_n} \frac{1}{t+t_0} \exp\left[-\frac{(x+v_{\text{ад}}t)^2 + [y-A \cdot \sin[\omega \cdot (t_m-t)]]^2}{4 \cdot a \cdot (t+t_0)}\right] \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi iz}{H}\right) \cdot \exp\left(-\pi^2 i^2 \cdot \frac{at}{H^2}\right) \cdot \frac{1}{P_{\dot{y}}} \int_0^H q_1(\zeta) \cos\frac{\pi i \zeta}{H} d\zeta\right] dt + T_0 \quad (6),$$

В данном случае масса подслоя определяется через его плотность и объем:

$V_{\text{покр}} = S_{\text{кр}} g(t) = \pi R_{\text{эфф}}^2 g(t)$ , где  $g(t)$  – толщина наплаваемого слоя, зависящая от времени. За время наплавки одного подслоя масса прогретой зоны матрицы определяется через ее плотность (сталь 19ХГНМА) и объем прогретого материала  $V_{\text{подл}} = \pi \cdot R_{\text{эфф}}^2 \cdot \sqrt{4 \cdot a_{\text{подл}} \cdot t}$ .

Тогда температуропроводность системы «покрытие-подложка»  $a_{\text{экв}} = \lambda_{\text{экв}} / (c_{\text{экв}} \cdot \rho_{\text{экв}})$ .

Пренебрегая потерями порошка при наплавке, толщина наплавленного слоя определяется как:

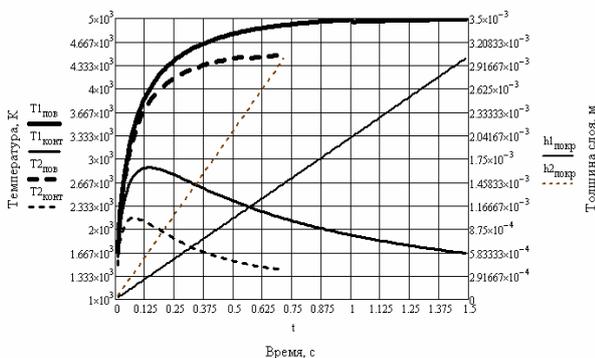
$$g(t) = \frac{G_{\text{порошка}} t}{S_{\text{кр}} \rho_{\text{покр}}}; \quad (5)$$

где  $G_{\text{порошка}}$  – массовый расход порошка;  $t$  – время воздействия,  $\rho_{\text{покр}}$  – плотность наплаваемого покрытия.

где  $P_Э = \eta \cdot P$  – эффективная мощность плазменной дуги;  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$ ,  $\eta_1$  – эффективный к.п.д. дуги, который в большинстве случаев можно принять равным 60%,  $\eta_2 = 0,7$ ;  $H$  – толщина плоского слоя;  $t_n$  – время нагрева, равное времени нанесения одного слоя покрытия;  $v_{дв}$  – скорость движения заготовки;  $\omega = 2\pi/T_{скан}$  – частота сканирования дуги;  $T_{скан}$  – период сканирования; амплитуда сканирования  $A = D/2$ ;  $D$  – размах колебаний;  $t_0 = R_{эфф}^2 / 4 \cdot a$ ;  $T_0$  – начальная температура;  $q_l(\zeta)$  – функция интенсивности источника теплоты по толщине.

Будем считать, что источник нагрева поверхностный и согласно [3] для такого источника интеграл под суммой равен  $P_Э$ . При этом мощность дуги определяется через ток и напряжение дуги  $P_д = I_д U_д$ ;  $U_д = C + 0,03 I_д$ , где  $C = 22$  В для дуги прямой полярности. Кроме того, при температурах выше 2500 К следует учитывать потери за счет теплового переизлучения. Это можно учесть введением коэффициента  $K$ . Как показали расчеты его можно принять равным 0,8-0,9. Если же учесть протекание возможных экзотермических реакций в зоне наплавки при синтезе соединений, то он может принимать значения 1,0-1,1. Плоский слой  $H$  в (6) включает глубину прогрева подложки и толщину нанесенного слоя покрытия за время  $t_n$   $H = \sqrt{4 \cdot a \cdot t_n} + g(t_n)$ . Для сравнения процессов нагрева ниже приведены результаты расчетов неподвижной и сканирующей плазменной дугой.

**Модель неподвижного источника нагрева.** Пусть толщина покрытия 3 мм. Тогда из (5) при расходе порошка 8 г/мин время наплавки таким источником составит 1,5 с. Разобьем покрытие на равные слои и зададим время наплавки одного слоя. Считая, что слои равномерно накладываются друг на друга, примем толщину одного слоя равной «моно-слою», состоящему из частиц наплавляемого порошка одного диаметра 50 мкм. Тогда число слоев равно 60, а время наплавки одного слоя –  $t_{мм} = 0,01$  с. Таким образом, толщина покрытия является дискретной величиной и зависит от времени наплавки одного слоя и количества слоев. Время воздействия в этом случае  $t_n = t_{мм} n$ , где  $n$  – число нанесенных слоев. В нашем случае  $t_n$  меняется от нуля до 1,5 с.



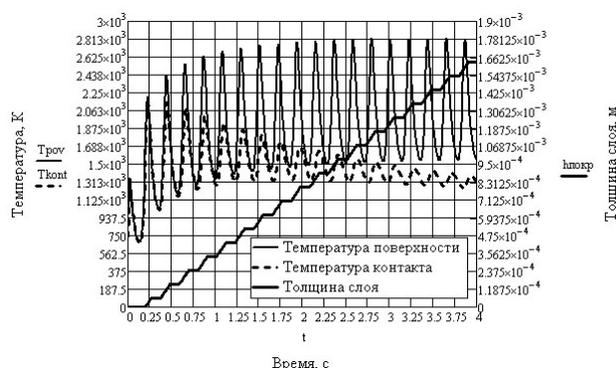
**Рис. 1.** Изменение температуры наплавляемого *Stellite 190* и зоны контакта с подложкой при наплавке неподвижной дугой с  $I_д = 80$  А

На основе выражения (6) в Mathcad 14 была составлена программа, учитывающая рост плоского слоя  $H$  от времени  $t_n$ , а также изменение эквивалентных теплофизических свойств системы «покрытие-подложка» после нанесения каждого слоя. Частота сканирования и скорость движения были равны нулю. На рис. 1 представлено изменение во времени температуры поверхности и на границе наплавляемого слоя с подложкой. Данные представлены с учетом роста толщины покрытия. Сплошные линии соответствуют расходу порошка 8 г/мин, а пунктирные линии – расходу 16 г/мин.

Из рис. 1 видно, что при расходе порошка 8 г/мин максимальная температура на поверхности заготовки равна 2880 К. При  $T_{пл} = 1811$  К расчетная глубина проплавления составила 0,8 мм при допустимом значении этой величины для наплавки на стали 0,1-0,3 мм. Повышение расхода порошка до 16 г/мин приводит к снижению температуры на границе с подложкой до 2160 К. Однако на поверхности практически через 0,1 с в обоих случаях температура становится выше температуры кипения основных компонентов материала наплавки (см. табл. 1) и дальнейший анализ процесса теряет смысл. Поэтому требуется включение режима с движением детали или сканированием пучка.

**Модель источника со сканированием пучка.** В этом режиме наплавки процесс нагрева в значительной степени определяется скоростью сканирования  $v_{скан}$  и диаметром дуги. Вместе со скоростью движения детали  $v_{дв}$  эти величины определяют время воздействия, период сканирования и коэффициент перекрытия, определяемые как  $t_в = 2R_{эфф} / v_{скан}$ ;  $T_{скан} = 2D / v_{скан}$ ;  $K_{п} = 1 - (v_{дв} T_{скан} / 2R_{эфф})$ . Для данного режима также была составлена программа, учитывающая периодический рост покрытия в заданной области и изменение теплофизических свойств системы «покрытие-подложка» после нанесения каждого слоя и позволяющая определить глубину проплавления подложки. В расчетах менялся ток дуги, скорость движения детали и расход порошка при частоте сканирования 1,55 Гц (скорость сканирования 28 мм/с и размах колебаний 6 мм). Результаты расчетов представлены на рис. 2 и в табл. 4. Предполагалось, что рост покрытия начинается, когда на подложке

достигается температура плавления. При токе дуги 80 А и скорости движения заготовки 2 мм/с плавление подложки начинается через 0.2 с, после чего начинается рост покрытия (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменение температуры наплавляемого *Stellite 190* и зоны контакта с подложкой при наплавке сканирующей дугой:

$I_{дл} = 80$  А, расход порошка 16 г/мин, частота сканирования 2,3 Гц, скорость движения 2 мм/с.

Введение сканирования дуги значительно меняет картину нагрева. Толщина покрытия увеличивается ступенчато – рост происходит за время воздействия дуги  $t_в$  и затем прямая выходит на полку – плазменная дуга выходит за пределы заданной области. Процесс повторяется через каждые полпериода сканирования. Видно, что при токе дуги 80 А режим наплавки со сканированием становится оптимальным – при этом на поверхности для всех компонентов (кроме хрома) температура не достигает температуры кипения, а проплавленные подложки происходит на допустимую глубину 0,15 мм. Максимальная глубина проплавления подложки рассчитывалась в момент достижения в зоне контакта с покрытием максимальной температуры. В таблице представлены результаты расчетов в зависимости от тока дуги, расхода порошка и скорости движения заготовки.

**Таблица 4.** Влияние тока дуги на глубину проплавления подложки

Расход порошка, г/мин	Ток дуги, А	Глубина проплавления, мм	Скорость движения, мм/с		
			2	4	6
16	60		-	-	0,091
	70		0,027	0,099	0,19
	80		0,15	0,19	0,29
	90		0,23	0,28	0,37
	100		0,32	0,36	0,46
	110		0,42	0,44	0,54
	120		0,50	0,52	0,62
32	60		-	-	0,024
	70		-	-	0,12
	80		-	0,054	0,21
	90		-	0,15	0,29
	100		0,078	0,24	0,37
	110		0,16	0,33	0,44
	120		0,23	0,41	0,52

Увеличение проплавления подложки с ростом скорости движения обусловлено снижением коэффициента перекрытия при сканировании и, следовательно, толщины наносимого слоя. Ранее проведенные эксперименты по наплавке *Stellite 190* [6] при токах дуги 80-100А и расходе порошка 16 г/мин показали удовлетворительное качество наплавки и глубина проплавления заготовки составляла 0,1-0,3 мм, что вполне согласуется с данными в табл. 4.

**Выводы:**

1. Предложено рассматривать процесс наплавки как нагрев многослойной системы с введением эквивалентных теплофизических свойств для системы «покрытие-подложка».
2. В среде Mathcad 14 составлены программа для моделирования нагрева системы «покрытие-подложка» неподвижной и сканирующей дугой, позволяющая рассчитывать изменения температуры поверхности, зоны проплавления подложки, глубину проплавления подложки с учетом роста толщины покрытия.

3. На основе моделирования показано влияние тока и частоты сканирования плазменной дуги, скорости движения детали, расхода порошка на глубину проплавления подложки.

4. Приведенные результаты моделирования позволяют определять оптимальные режимы наплавки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 287 с.
2. Соснин, Н.А. Плазменные технологии / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 405 с.
3. Нефедов, Б.Б. Управление тепловыми процессами при плазменно-порошковой наплавке. Материалы 6 Международной практической конференции-выставки «Технология ремонта, восстановления и упрочнения ....». С-Пб., 13-16 апреля 2004. – С. 54-65.
4. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3-х томах. Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1023 с.
6. Паркин, А.А. Плазменная наплавка порошковых материалов на элементы буровых долот / А.А. Паркин, С.С. Жаткин, А.В. Тупунков, Д.А. Писарев // Материалы международной научно-технической конференции «Современная электротехнология в машиностроении». – Тула, 5-6 июня 2007. – С. 22-29.

## MODELLING OF HEATING THE SYSTEM "COATING-BASE" AT PLASMA POWDER WELD DEPOSIT *STELLITE 190* BY SCANNING ARCH

© 2009 S.S. Zhatkin, V.I. Nikitin, A.A. Parkin

Samara State Technical University

The analysis of influence of parameters plasma weld deposit (current and pressure of arch, speed of weld deposit and charge of submitted powder *Stellite 190*) on process of heating welded layer on steel 19ХГНМА is lead. Influence of the given parameters on degree of profusion on surface of preparation is investigated.

Key words: *plasma weld deposit, powder materials, scanning of bunch, computer modelling, heating process*

*Sergey Zhatkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Founding and High Effective Technologies. E-mail: sergejat@mail.ru*

*Vladimir Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Founding and High Effective Technologies. E-mail: laser@samgtu.ru*

*Aleksey Parkin, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Founding and High Effective Technologies*